

Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken unter rollendem Verkehr

**Dynamische Belastungsversuche
an der Bergspurbrücke Deibüel**

Teil A

von Reto Cantieni, dipl. Ing. ETH

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
Abteilung Massivbau
Überlandstrasse 129
CH- 8600 Dübendorf**

Dezember 1988

Inhaltsverzeichnis Teil A

ZUSAMMENFASSUNG - RESUME - SUMMARY

1	EINLEITUNG	1
2	VORVERSUCHE	7
2.1	Der Schwerverkehr in der Schweiz	7
2.2	Die Versuchsfahrzeuge	9
2.21	Fahrzeugtypen, Geometrie, Lasten	9
2.22	Kennlinien der Reifen- und Aufbaufedern	21
2.3	Das dynamische Uebertragungsverhalten von zweiachsigen Solofahrzeugen	27
2.31	Theoretische Grundlagen	27
2.32	Experimentelle Bestimmung des Uebertragungsverhaltens mittels harmonischer Anregung	31
2.4	Messung der dynamischen Radlasten schwerer Fahrzeuge	36
2.5	Die Versuchsbrücke	40
2.6	Das dynamische Uebertragungsverhalten der Deibüel-Brücke	42
2.61	Analytische Bestimmung der Eigenschwingungen	42
2.62	Experimentelle Bestimmung der Eigenschwingungen mittels harmonischer Anregung	46
2.63	Vergleich Theorie/Experiment	69
2.7	Der Versuchsbelag	73
2.71	Allgemeines	73
2.72	Belag A	74
2.73	Belag B	81
2.74	Das Brett	84
3	HAUPTVERSUCHE	85
3.1	Das Versuchsprogramm	85
3.2	Die Instrumentierung der Fahrzeuge	86
3.21	Ueberwachung der Fahrgeschwindigkeit	86
3.22	Messung der dynamischen Radlasten	87
3.23	Transfer der Daten vom Fahrzeug zur Messzentrale	91
3.3	Die Instrumentierung der Brücke	94
3.31	Durchbieungsmessung	94
3.32	Dehnungsmessung	94

3.4	Datenaufzeichnung	97
3.41	Mittel	97
3.42	Konzept	100
3.5	Auswertemethoden	100
3.51	Auswertung von digitalisierten dynamischen Signalen	100
3.52	Im Zeitbereich	104
3.53	Im Frequenzbereich	108
3.6	Resultate: Die dynamischen Radlasten	110
3.61	Im Zeitbereich	110
3.62	Im Frequenzbereich	118
3.7	Resultate: Die Reaktion der Brücke	118
3.71	Beispiele von Zeitsignalen und $\phi(v)$ -Funktionen	118
3.72	Die Maximalwerte der dynamischen Inkremente in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp	123
3.73	Vergleich mit den EMPA-Standardversuchen	130
3.74	Charakterisierung der $\phi(v)$ -Funktionen	131
3.75	Die $\phi(v)$ -Funktionen für fünf Gruppen von Fahrzeugtypen (Reifendruck 10 bar, Belag A)	134
3.76	Der Einfluss des Reifendruckes	143
3.77	Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche	150
3.78	Wichtigste Ergebnisse der Auswertung im Zeitbereich	157
3.79	Die Brückenreaktion im Frequenzbereich	161
4.	BEURTEILUNG DER RESULTATE	164
4.1	Ergebnisse der Vorversuche	164
4.2	Ergebnisse der Hauptversuche	166
4.21	Die dynamischen Radlasten	166
4.22	Die Brückenreaktionen	166
5.	DANK	169
	LITERATURVERZEICHNIS	169
	HÄUFIG VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	172

Inhaltsverzeichnis Teil B, Anhänge

- Anhang 1: Das Uebertragungsverhalten der Deibüelbrücke:
Räumlich dargestellte modale Formen und die
zugehörigen Zeitsignale
- Anhang 2: Die dynamischen Radlasten: Standardabweichung
der Radlast in Funktion der Fahrgeschwindigkeit;
Tabellen und grafische Darstellungen
- Anhang 3: Die Reaktion der Brücke: Beispiele von
Schwingungsaufzeichnungen und $\phi(v)$ -Funktionen
- Anhang 4: Die Reaktion der Brücke: Zusammenstellung der
maximalen dynamischen Inkremente für alle Versuchs-
serien und Instrumente
- Anhang 5: Die Reaktion der Brücke: Grafische Darstellung der
wichtigsten maximalen dynamischen Inkremente in
Funktion des Fahrzeugtyps
- Anhang 6: Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen für fünf
Gruppen von Fahrzeugtypen (Reifendruck 10 bar, Belag A)
- Anhang 7: Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen in Abhängigkeit
vom Reifendruck (Belag A)
- Anhang 8: Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen in Abhängigkeit
von der Fahrbahnoberfläche (Reifendruck 10 bar)

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden die dynamischen Versuche beschrieben, die im Jahr 1978 in Form einer Parameterstudie an der Bergspurbrücke Deibüel bei Baar (ZG) durchgeführt wurden. Es war das Ziel dieser Versuche, den Einfluss von Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeugtyp, Fahrzeugdynamik und Ebenheit der Fahrbahnoberfläche auf das dynamische Verhalten dieser Brücke während der Ueberfahrt eines oder mehrerer schwerer Fahrzeuge kennenzulernen.

Ausgangspunkt und Motiv für die Durchführung dieser Versuche war die Tatsache, dass die Interpretation der Resultate der von der EMPA routinemässig an Strassenbrücken durchgeführten, bis zu einem gewissen Grad auch standardisierten, dynamischen Belastungsversuche Schwierigkeiten bereitete. Aus dem Studium der Resultate von mehr als 200 solcher Versuche ergab sich, dass dies auf das Fehlen exakter Informationen über die dynamischen Charakteristika von Fahrzeug und Brücke und über die Ebenheit des Fahrbahnbelages zurückzuführen war [6]. Das Kapitel 1 umfasst einen Abriss dieser Vorgeschichte und der Entwicklung der vorgenannten Zielsetzungen.

Im Kapitel 2 wird über die Vorversuche berichtet, die die Auswahl der Versuchsfahrzeuge, die Bestimmung des dynamischen Uebertragungsverhaltens von Fahrzeugen und Brücke, die Entwicklung eines Systems für die Messung dynamischer Radlasten sowie den Bau und die Vermessung geeigneter Fahrbahnbeläge zum Inhalt hatten.

Das Kapitel 3 befasst sich mit den Hauptversuchen, den dynamischen Belastungsversuchen, die an der Deibüel-Brücke durchgeführt wurden. Diese umfassten knapp 6'000 Versuchsfahrten mit 14 verschiedenen schweren Fahrzeugen, die meist einzeln, aber auch in Gruppen von zwei oder vier Fahrzeugen mit einer konstanten Geschwindigkeit - zwischen $v = 5$ km/h und $v = 70...80$ km/h - über die Brücke fuhren. Es wurden immer Fahrten auf einer zentrischen und einer exzentrischen Fahrachse sowie mit und ohne Ueberquerung eines auf der Fahrbahn liegenden Brettes durchgeführt. Für einige der Fahrzeuge wurde der Reifendruck systematisch variiert, und es wurden Fahrten auf zwei Belägen unterschiedlicher Ebenheit durchgeführt. Die dynamischen Radlasten wurden für alle Zweiachser sowie für einen vierachsigen Lastenzug gemessen.

Nach der Beschreibung der Instrumentierung von Fahrzeugen und Brücke und der verwendeten Methoden für die Aufzeichnung und Auswertung der Messsignale werden die Resultate der im Zeitbereich durchgeführten Analysen präsentiert. Diese beginnen mit einer Charakterisierung der gemessenen Zeitsignale sowie einer Diskussion der gemessenen Radlastschwankungen.

Die Untersuchung der Brückenreaktionen umfasst dann die Bestimmung der parameterunabhängig pro Messstelle festgestellten Grösstwerte des dynamischen Inkrementes und einen Vergleich mit den Resultaten der routinemässigen EMPA-Versuche. Dieser ergibt, dass die Deibüel-Brücke insbesondere für Fahrten ohne Brett als dynamisch empfindlich eingestuft werden kann. In drei Abschnitten wird dann die Auswirkung von gezielten Variationen jeweils eines der drei Parameter "Fahrzeug", "Reifendruck" und "Belageebenheit" auf den Verlauf des dynamischen Inkrementes ϕ oder DI über die Fahrgeschwindigkeit v präsentiert. Insbesondere für Durchbiegungen weist dieser Verlauf oft deutlich ausgeprägte Charakteristika auf, die als DI-Struktur bezeichnet werden. Die DI-Struktur ist unter anderem abhängig von Lage und Art der Messstelle.

Jeder der drei erwähnten Parameter beeinflusst die DI-Struktur in signifikanter Weise. Dabei kann es sich um Änderungen an der DI-Struktur als solche oder um sogenannte Strukturstreuungen handeln. Je nach Fahrzeugtyp treten meist unterschiedliche DI-Strukturen auf. Ebenfalls sind für Fahrzeuge des gleichen Typs zum Teil beträchtliche Strukturstreuungen oder sogar unterschiedliche DI-Strukturen zu registrieren. Der Einfluss des Parameters "Belageebenheit" ist markanter als jener des Parameters "Reifendruck".

Aus verschiedenen Gründen sind die Ergebnisse der im Frequenzbereich durchgeführten Analysen noch nicht verfügbar. Die im Kapitel 4 enthaltene Beurteilung der Resultate kann deshalb lediglich den Einfluss von Variationen der drei untersuchten Parameter auf das Verhalten von Fahrzeugen und Brücke im Zeitbereich, schwergewichtig auf das dynamische Inkrement und seinen Verlauf über die Fahrgeschwindigkeit, umfassen. Eine gezielte Interpretation dieser Einflüsse ist allenfalls nach Abschluss der Frequenz- und Phasenbeziehungen zwischen dynamischen Radlasten und Brückenreaktionen möglich.

Resumé

Le présent rapport décrit des essais dynamiques qui ont été effectués en 1978 sous forme d'une étude de paramètres sur le pont amont de Deibüel près de Baar (ZG). Ces essais avaient pour but de déterminer l'influence de la vitesse, du type et de la dynamique du véhicule ainsi que celle de la planéité du revêtement sur le comportement dynamique de ce pont lors du passage d'un ou de plusieurs véhicules lourds.

L'exécution de ces essais a été motivée par le fait que des difficultés étaient apparues dans l'interprétation des résultats des épreuves de charge dynamiques, en partie standardisées, qu'effectue l'EMPA de manière routinière sur les ponts routiers. L'étude des résultats de plus de 200 épreuves de ce genre avait montré que ces difficultés provenaient d'un manque d'informations sur les caractéristiques dynamiques des véhicules et du pont ainsi que sur la planéité du revêtement de la chaussée [6]. Le chapitre 1 donne un résumé de cet historique et du développement de ces objectifs.

Le chapitre 2 traite des essais préliminaires destinés à la sélection des véhicules d'essai, à la détermination du comportement de transfert dynamique des véhicules et du pont, au développement d'un système de mesure des charges dynamiques de roue ainsi que pour la pose et le mesurage de revêtements de chaussée adéquats.

Le chapitre 3 est consacré aux essais de charge dynamiques proprement dits effectués sur le viaduc de Deibüel. Ces essais comprennent quelques 6000 passages avec 14 véhicules lourds différents, le plus souvent isolément, mais aussi en groupes de deux ou quatre véhicules, à vitesse constante - entre $v = 5$ km/h et $v = 70...80$ km/h. On a toujours effectué des passages suivant un axe centré et un axe excentré ainsi qu'avec et sans passage par dessus une planche placée en travers de la chaussée. Sur quelques véhicules, on a varié systématiquement la pression des pneumatiques et on a effectué des passages sur deux revêtements de planéité différente. Les charges de roue dynamiques ont été mesurées sur tous les véhicules à deux essieux et sur un train routier à quatre essieux.

Après une description des instruments installés sur les véhicules et sur le pont ainsi que des méthodes utilisées pour l'enre-

gistement et le dépouillement des signaux de mesure, les résultats des analyses effectuées dans le domaine du temps sont présentés. Ces analyses commencent par une caractérisation des signaux mesurés ainsi que par une discussion des variances des charges de roue mesurées.

L'étude des réactions du pont comprend la détermination pour chaque point de mesure de la plus grande valeur constatée, indépendante des paramètres, de l'incrément dynamique ainsi qu'une comparaison avec les résultats des épreuves de routine de l'EMPA. Cette comparaison montre que le pont de Deibüel peut être qualifié de dynamiquement sensible, ceci particulièrement pour les passages sans planche transversale. Trois paragraphes sont consacrés à la description de l'effet de variations déterminées de l'un des trois paramètres "véhicule", "pression des pneumatiques" et "planéité du revêtement" sur l'allure de la courbe de l'incrément dynamique ϕ ou DI en fonction de la vitesse v . Pour les flèches en particulier, cette courbe présente souvent des caractéristiques nettement marquées désignées par le terme "structure DI". La structure DI dépend entre autres de la position et du type de point de mesure.

Chacun des trois paramètres mentionnés influence la structure DI de manière significative. Il peut s'agir là de variations de la structure DI en tant que telle ou de ce que l'on peut appeler des dispersions de structure. Les structures DI sont le plus souvent différentes selon le type de véhicule. Pour un même type de véhicule, on enregistre aussi des dispersions de structure importantes ou même des structures DI différentes. L'influence du paramètre "planéité du revêtement" est plus marquée que celle du paramètre "pression des pneumatiques".

Pour différentes raisons, les résultats des analyses effectuées dans le domaine des fréquences ne sont pas encore disponibles. L'évaluation des résultats présentée dans le chapitre 4, ne concerne ainsi que l'influence de la variation des trois paramètres étudiés sur le comportement des véhicules et du pont, avec un accent particulier sur l'incrément dynamique et ses variations en fonction de la vitesse des véhicules. Une interprétation précise de ces influences ne sera possible qu'une fois les analyses de fréquence terminées, soit après achèvement de l'étude des relations au niveau des fréquences et des phases entre les charges de roue dynamiques et les réactions du pont.

Summary

This report describes dynamic tests which were carried out in the form of a parametric study on the up-hill section of the Deibüel Bridge near Baar (ZG) in 1978. The goal of the tests was to ascertain the influence of vehicle speed, vehicle type, vehicle dynamics and pavement roughness on the dynamic behavior of this bridge during the passage of one or several heavy vehicles.

The starting point and motivation for these tests was the fact that the interpretation of the results of dynamic load tests routinely performed on highway bridges by EMPA (and to a degree also standardized) presented difficulties. The study of results on more than 200 such tests revealed that this is due to a lack of exact information on the dynamic characteristics of the vehicle and bridge as well as on the pavement roughness [6]. Chapter 1 summarizes this background and development of the above-mentioned goals.

Chapter 2 describes the preliminary tests undertaken toward selection of the test vehicles, determination of the dynamic transfer function of vehicles and bridge, development of a system for measuring the dynamic wheel loads as well as the construction and profile evaluation of appropriate pavements.

Chapter 3 is concerned with the main tests, namely the dynamic load tests performed on the Deibüel Bridge. These included almost 6,000 drive-bys with 14 different heavy vehicles. The vehicles were driven over the bridge at constant speeds ranging from $v = 5$ km/h to $v = 70 \dots 80$ km/h. Although most of the vehicles drove individually over the bridge, groups of two or four vehicles were also included. All of the drive-bys were performed on a centric as well as an eccentric lane and were undertaken on the undisturbed pavement as well as with a plank lying across the pavement. For some of the vehicles, the tire pressure was varied systematically and drive-bys were carried out on two pavements of different roughness. The dynamic wheel loads were measured on all the two-axle vehicles as well as one four-axle tractor-trailer.

First, a description of the instrumentation for the vehicles and the bridge and the

methods applied for the registration and processing of the measurement signals is given. This is followed by a presentation of the results of analyses carried out in the time domain. This begins with a characterization of the measured time signals as well as a discussion of the measured wheel load variances.

The investigation of the bridge response involves determination of the largest values of the dynamic increment for each measurement position, independent of the parameters and also a comparison with the results of the routine EMPA tests. This reveals that the Deibüel Bridge can be classified as dynamically sensitive, especially for drive-bys without the plank. In three following sections, the influence of selective variation of each of the three parameters "vehicle", "tire pressure" and "pavement roughness" on the dynamic increment ϕ or DI as a function of vehicle speed v are presented. Particularly for displacements, this function often exhibits a distinct character which is designated as the DI structure. The DI structure is dependent (among other factors) on the position and type of the measurement instrument.

Each of the three parameters mentioned above influences the DI structure significantly. This can involve changes in the DI structure itself or so-called structural scattering. Normally, each vehicle type yields its own DI structure. Likewise, for vehicles of the same type, considerable structural scattering or even different DI structures may be observed. The influence of the parameter "pavement roughness" is greater than that of the parameter "tire pressure".

For a number of reasons, the results of the analyses performed in the frequency domain are not yet available. Thus, the evaluation of results given in Chapter 4 can merely include the influence of the three parameters investigated on the behavior of the vehicles and bridge in the time domain, with emphasis on the dynamic increment as a function of vehicle speed. A selective interpretation of these influences may be possible after completion of the frequency analyses, i.e. the investigation of the frequency and phase relationships between the dynamic wheel loads and the bridge response.

1 Einleitung

Seit mehr als 25 Jahren führt die Abteilung Massivbau der EMPA routinemässig standardisierte dynamische Belastungsversuche an Strassenbrücken durch. Dabei wird der zeitliche Verlauf der vertikalen Verformung einer Brücke während und nach der Ueberfahrt eines einzelnen Versuchsfahrzeuges gemessen, aufgezeichnet und anschliessend analysiert (Bilder 1 und 2). Als Ergebnisse solcher Versuche erhält man im Normalfall

- die Frequenz f und die Dämpfung δ der im freien Ausschlagen dominierenden Eigenschwingung der Brücke und
- den Verlauf des dynamischen Inkrementes ϕ (auch als Stosszuschlag oder dynamischer Beiwert bezeichnet) über die Fahrgeschwindigkeit.

Während es bei experimentellen Untersuchungen üblicherweise möglich ist, deren Resultate einer Beurteilung zu unterziehen, sie zum Beispiel mit den Ergebnissen theoretischer Ueberlegungen oder mit Normvorschriften zu vergleichen, musste Mitte der siebziger Jahre festgestellt werden, dass dies für die vorgenannten Versuche nicht zutraf.

Der Vergleich mit analytisch bestimmten Werten war nicht möglich, weil diese entweder gar nicht berechnet werden konnten (δ , ϕ), oder weil deren Ermittlung so aufwendig war (f), dass sie nur in vereinzelt Fällen durchgeführt wurde [1]. Die schweizerischen Normen hätten lediglich bezüglich des dynamischen Inkrementes ϕ zu Rate gezogen werden können [2]. Die dort angegebenen ϕ -Werte beziehen sich jedoch auf ein fiktives statisches Lastmodell, das experimentell nicht nachvollziehbar ist. Diese Normwerte eigneten sich deshalb nicht für quantitative Vergleiche.

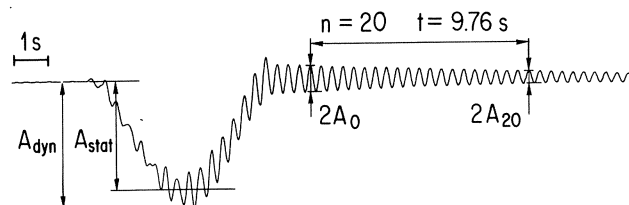
Zusammenfassend blieb demnach festzustellen, dass während vieler Jahre Versuche durchgeführt worden waren, deren Sinn nicht sofort einzusehen war [3]. Der damalige Vorsteher der Abteilung Massivbau beschloss daher vor gut zehn Jahren, diesen für ein amtliches Prüfinstitut wie die EMPA unbefriedigenden Zustand zu verbessern. Es lag auf der Hand, in einer ersten Phase die Randbedingungen und Resultate der bis zu jenem Zeitpunkt durchgeführten Versuche zusammenzustellen und zu analysieren. Dabei stand zunächst das dynamische Inkrement ϕ im Vordergrund, da

dieser Wert bei der Dimensionierung von Strassenbrücken, d.h. bei der Festlegung der Verkehrslasten, eine nicht unwesentliche Rolle spielt.

Es zeigte sich bald, dass die EMPA-Versuchsergebnisse den qualitativen Zusammenhang zwischen ϕ und der mittleren Spannweite L_m einer Brücke, wie er von der Norm SIA 160/1970 [2] impliziert wird, nicht bestätigen konnten. Weitere Untersuchungen führten zum Ergebnis, dass das dynamische Inkrement ϕ in wesentlichem Mass von der tiefsten Frequenz f der Längsbiegeschwingungen einer Brücke, der Grundfrequenz, abzuhängen scheint [4]. Damit wurde aber auch klar, dass es nicht möglich sein würde, die Reaktion einer Brücke auf die Ueberfahrt eines Lastwagens zu



Bild 1: Dynamischer Belastungsversuch mit einem zweiachsigen Lastwagen.



$$f = \frac{n}{t} \quad \delta = \frac{1}{20} \ln \frac{A_0}{A_{20}} \quad \phi = \frac{A_{dyn} - A_{stat}}{A_{stat}} \cdot 100$$

$$f = 2.05 \text{ Hz} \quad \delta = .040 \quad \phi = 17 \%$$

Bild 2: Zeitsignal der Durchbiegung einer einfeldrigen Brücke in Feldmitte; Bestimmung der Ergebnisse f , δ und ϕ .

interpretieren, ohne die auf die Brücke einwirkenden Kräfte, insbesondere deren Frequenzspektrum, zu kennen.

Da sich demzufolge der Problembereich erheblich ausweitete, wurde in einer zweiten Phase die Lage einer umfassenden Analyse unterzogen [5], aus der zunächst hervorging, dass das dynamische Verhalten einer Strassenbrücke im Betriebszustand von einer Reihe von Parametern bestimmt wird, die in vier Gruppen eingeteilt werden können:

a) Verkehrsparameter

- Anzahl Fahrspuren;
- Anzahl schwerer Fahrzeuge, die innerhalb einer Störungsphase (Ruhe - Schwingung - Ruhe) die Brücke überqueren;
- Verteilung der schweren Fahrzeuge auf die Fahrrichtungen und -spuren; zeitliche Aufeinanderfolge, Fahrgeschwindigkeit;
- Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Fahrzeugtypen;

b) Fahrzeugparameter

- Fahrzeugtyp (Solofahrzeug, Lastenzug, Sattelschlepper);
- Fahrzeuggeometrie, Anzahl und Anordnung der Achsen;
- Ladungsgrad (z.B. leer, vollbeladen);
- Dynamisches Übertragungsverhalten (Eigenschwingungen), abhängig von Geometrie, Massenverteilung, Aufhängung des Aufbaus, Reifenart, Reifendruck;

c) Fahrbahnparameter

- Spektrum der Fahrbahnunebenheiten im Bereich der Anfahrstrecken und auf der Brücke;
- Ebenheit der Fahrbahnübergänge und Fugen;
- Andere lokale, nicht mit stochastischen Methoden erfassbare Unebenheiten;
- Längs- und Quergefälle, Kurven;

d) Brückenparameter

- Geometrie, Tragsystem (z.B. Balken, Rahmen, Bogen);
- Masse und Steifigkeit;
- Statische und kinematische Randbedingungen;
- Ausbildung des Unterbaus;
- Dynamisches Übertragungsverhalten (Eigenschwingungen);

Bei den routinemässigen EMPA-Versuchen, deren Planung, Durchführung und Auswertung in [6] im Detail beschrieben sind, wurden diese Parameter jeweils wie folgt fixiert oder variiert bzw. im Laufe der Versuche und ihrer Auswertung bestimmt oder nicht bestimmt:

a) Verkehrsparameter

- Ein einzelnes Fahrzeug bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit über die sonst unbelastete Brücke. Die Geschwindigkeit wird stufenweise von $v = 5 \text{ km/h}$ bis zum möglichen Maximalwert gesteigert.
- Die Fahrachse und die Fahrrichtung sind immer gleich. Die Fahrachse liegt im allgemeinen über der Längsachse der Brücke.

b) Fahrzeugparameter

- Als Versuchsfahrzeug wird immer ein vollbeladener, zweiachsiger Lastwagen mit einer Masse von rund 16 t eingesetzt.
- Der Radstand beträgt zwischen 3.5 m und 6 m.
- Das Übertragungsverhalten und die dynamischen Radlasten werden nicht bestimmt.

c) Fahrbahnparameter

- Das Längsprofil der Versuchsstrecke (Unebenheiten) wird messtechnisch nicht erfasst.
- Die Art und der Zustand des Fahrbahnbelages werden visuell beurteilt und nach einem groben Raster klassiert.
- Lokale Unebenheiten werden im Bericht vermerkt, aber meist nicht ausgemessen.
- Gefällsverhältnisse und Krümmungsradien der Brückenachse sind in den Untersuchungsberichten meist angegeben.
- Im allgemeinen finden zusätzliche Versuche statt, bei denen das Fahrzeug über ein 45 - 50 mm dickes Brett fährt, das in der Mitte des grössten Brückenfeldes quer zur Fahrrichtung auf der Fahrbahn liegt.

d) Brückenparameter

- Jede Versuchsreihe findet an einer anderen Brücke statt, so dass jeweils sämtliche Parameter verändert werden.
- Die Steifigkeit einer Brücke geht aus den statischen Versuchen hervor, die ebenfalls durchgeführt werden. Die Masse wird in den Berichten nicht angegeben.

- Die planmässigen statischen und kinematischen Randbedingungen sowie die Ausbildung des Unterbaus sind meist bekannt.
- Vom Uebertragungsverhalten der Brücke können meist nur die Grundfrequenz und die zugehörige Dämpfung bestimmt werden.

Es ist leicht einsehbar, dass bei den routinemässigen EMPA-Versuchen zwar viele verschiedene Brücken in analoger Art und Weise geprüft wurden, dass man dabei aber die meisten anderen Parameter nicht variierte bzw. nicht oder nur ungenau erfasste. Die Stossrichtung des Vorgehens lag damit auf der Hand: Es waren Versuche durchzuführen, die sich einerseits auf eine einzelne Brücke konzentrierten, bei denen aber andererseits alle anderen Parameter möglichst systematisch variiert und vor allem exakt erfasst und überwacht wurden. Zudem war der Anschluss an die routinemässigen Versuche zu gewährleisten.

Im Herbst 1976 wurde ein Forschungsprojekt formuliert, das zur Untersuchung des Problemkreises "Dynamisches Verhalten von Strassenbrücken unter schwerem Verkehr" im wesentlichen die Durchführung von vier Versuchsreihen vorsah [5]:

a) Verkehrsparameter

Das Schwergewicht liegt auf Versuchen mit einzelnen schweren Fahrzeugen verschiedener Typen (Versuchsreihen V1, V2 und V3). Das Spektrum der in der Schweiz zirkulierenden Nutzfahrzeuge soll dabei so vollständig wie möglich abgedeckt werden. Zusätzlich soll die Wirkung der gleichzeitigen Ueberfahrt mehrerer Fahrzeuge untersucht werden (Versuchsreihe V4). Weiterführende Studien wie zum Beispiel über die dynamische Wirkung ganzer Verkehrsströme oder von Ueberhol-, Kreuzungs- und Bremsmanövern sind nicht vorgesehen.

b) Fahrzeugparameter

Bei allen Versuchsfahrzeugen sollen das Uebertragungsverhalten bestimmt und die dynamischen Radlasten gemessen werden. Das Gesamtgewicht der Fahrzeuge wird mindestens so hoch wie der gesetzlich zulässige Wert gewählt und nicht variiert. Bei einigen grossen Fahrzeugen wird das Gewicht entsprechend der technischen Kapazitätsgrenze des Fahrzeuges gewählt. Die Auswirkungen von Veränderungen der Fahrzeugparameter werden am Typ "zweiachsiges Solofahrzeug" anhand der Parameter

"Radstand", "Zustand der Blattfedern", "Reifentyp" und "Reifendruck" untersucht (Versuchsreihe V1).

Für dieses Vorgehen gab es verschiedene Gründe. Zunächst zur Wahl des Zweiachsers als Objekt für Detailstudien: Der Zweiachser ist jener Fahrzeugtyp, der bei den routinemässigen Versuchen eingesetzt wird. Da das gleiche Fahrzeug nur ausnahmsweise für mehr als einen Versuch Verwendung findet, sind die Ergebnisse den Einflüssen der vorgenannten Parameter unterworfen [6]. Es bestand deshalb ein konkretes Interesse, das Ausmass dieser Einflüsse zu untersuchen. Zudem weist das zweiachsige Solofahrzeug einen Anteil am schweizerischen Schwerverkehr von 40% auf und ist somit einer der repräsentativsten Fahrzeugtypen (siehe Abschnitt 2.1, "Der Schwerverkehr in der Schweiz"). Schliesslich war zu berücksichtigen, dass Parameterveränderungen an einem Zweiachser mit weniger Aufwand zu realisieren sind als an jedem anderen Typ. (Bezüglich des Radstandes war aber von Anfang an klar, dass er nicht an ein und demselben Fahrzeug variiert werden konnte, sondern dass dazu mehrere Lastwagen mit verschiedenen Radständen einzusetzen waren.)

Zur Wahl der Fahrzeuggewichte: Entsprechende Abklärungen hatten ergeben, dass das Uebertragungsverhalten von Lastwagen zumindest in einem bestimmten Frequenzbereich recht stark von der Grösse der Nutzlast abhängt. Trotzdem wurde es vorgezogen, auf diesen Parameter zu verzichten, d.h. ihn möglichst hoch zu wählen und nicht zu verändern. Dabei stand einerseits wiederum der Gedanke des Anschlusses an die routinemässigen Versuche im Vordergrund (deshalb war es auch nicht vorgesehen, die Zweiachser zu überladen), andererseits bestanden aber auch Bedenken hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit von Be- und Entlademanövern; denn ein Kran war im vorgesehenen Versuchsgelände nicht vorhanden. Zudem ist es fraglich, ob ein extrem grosses dynamisches Inkrement, wie es bei exakter Abstimmung von Anregungs- und Antwortfrequenz bei der Ueberfahrt eines leeren Lastwagens möglicherweise erzeugt werden kann, eine nützliche Grösse ist. Letztlich muss es doch um die Gesamtbeanspruchung einer Brücke gehen, d.h. um die Summe der statischen und dynamischen Wirkungen der Verkehrslasten. Insbesondere wird man in einer Norm kaum von einem Lastmodell ausgehen, dem die bei leeren Fahrzeugen auf-

treten statischen Lasten und dynamischen Inkremente zugrunde liegen. Gerade auch im Zusammenhang mit der Normierung der Strassenlasten wurde es dagegen als notwendig erachtet abzuklären, ob von besonders schweren Fahrzeugen, wie sie zum Beispiel im benachbarten Ausland zirkulieren, aussergewöhnliche dynamische Wirkungen zu erwarten seien.

c) Fahrbahnparameter

Die Parameter, die die Ebenheit einer Fahrbahn beschreiben, sollen möglichst genau bestimmt werden. Die Versuche sollen einerseits auf Belägen durchgeführt werden, deren Unebenheiten regellos verteilt und demnach mit statistischen Methoden zuverlässig erfassbar sind. Andererseits, dies auch wegen der Vergleichbarkeit mit den Routineversuchen, sollen immer auch Fahrten über ein Brett durchgeführt werden. Die Dicke des Brettes soll nicht variiert werden.

d) Brückenparameter

Das Uebertragungsverhalten der Versuchsbrücke wird möglichst exakt bestimmt. Die Versuchsbrücke soll ein einfaches Tragwerk mit einer Grundfrequenz von rund $f = 3$ Hz sein (Brücken mit einer solchen Grundfrequenz reagieren erfahrungsgemäss empfindlich auf die Ueberfahrt schwerer Fahrzeuge [4]). Es ist nicht vorgesehen, Brückenparameter auf irgendeine Weise zu verändern.

Der zeitliche Ablauf war wie folgt geplant: In einer Versuchsreihe V1 wird der Einfluss einzelner Fahrzeugparameter studiert. Bei im Übrigen konstanten Parametern wird in der Versuchsreihe V2 der Einfluss des Fahrzeugtypes (Verkehrsparameter) untersucht. Auf der Basis der Resultate der Reihen V1 und V2 sollen zwei bis drei kritische Fahrzeugtypen (die die grössten dynamischen Wirkungen erzeugten) mit kritisch eingestellten Fahrzeugparametern ausgewählt und mit ihnen in einer Versuchsreihe V3 der Einfluss von Veränderungen der Fahrbahnoberfläche untersucht werden. Dazu wird der Belag so oft wie möglich umgebaut. Die Versuchsreihe V4 (mehrere Fahrzeuge; siehe Verkehrsparameter) wird auf dem schlechtesten Belag durchgeführt, d.h. nach den Reihen V1 und V2, aber vor V3.

Eine einzelne Versuchsreihe setzt sich aus einer Anzahl Serien von Ueberfahrten eines oder mehrerer Versuchsfahrzeuge zusammen. Innerhalb einer Serie ist die Fahrgeschwindigkeit der einzige Parameter, der verändert

wird. Die Fahrgeschwindigkeit wird von $v = 5$ km/h bis zur erreichbaren Höchstgeschwindigkeit in Schritten von maximal $\Delta v = 5$ km/h gesteigert. Die Fahrachse liegt immer in der Mitte des Brückenquerschnittes. Bei einer einzelnen Ueberfahrt bleiben alle Parameter so konstant wie möglich.

Nachdem das Forschungsprojekt in seinen Umrissen definiert war, mussten zwei grundlegende Probleme gelöst werden:

- Finden einer Versuchsbrücke, die den technischen und logistischen Ansprüchen genügt;
- Sicherstellen der Finanzierung.

Auf der Suche nach einer geeigneten Brücke stiess man bald auf die Brücken Deibüel bei Baar im Kanton Zug (Bild 3). Zwei getrennte Bauwerke führen dort je eine Fahrrichtung der Talstrasse T4, eines Zubringers zur Nationalstrasse N4a, über einen Bach. Die Grundfrequenz der Bergspurbrücke wurde auf 3.0 Hz, jene der Talspurbrücke auf rund 4 Hz geschätzt. Die Bergspurbrücke war 1975 von der EMPA statischen Belastungsversuchen unterzogen worden, so dass ihre Steifigkeit bekannt war [7].

Die Eröffnung des Abschnittes Cham-Sihlbrugg der T4/N4a war erst für 1979 vorgesehen. Auf eine entsprechende Anfrage hin erklärte sich der Bauherr, das Tiefbauamt des Kantons Zug, Ende 1976 bereit, der EMPA die Bergspurbrücke Deibüel vom 1. September 1977 bis Ende Juli 1978 für die geplanten Versuche zur Verfügung zu stellen. In grosszügiger Art und Weise erklärte sich das Zuger Tiefbauamt auch bereit, auf unsere Pläne bezüglich des Versuchsbelages einzugehen und das Bauprogramm für den Einbau der Brückenisolation und des definitiven Belages, auch im Bereich der Anfahrtsstrecken, entsprechend anzupassen.

Ebenso grosszügig zeigte sich die EMPA, die bereit war, für Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche die gesamte vorhandene Infrastruktur zur Verfügung zu stellen und im Rahmen ihres Forschungs- und Entwicklungsbudgets zu finanzieren. Da jedoch leicht vorauszusehen war, dass auch die Leistungen Dritter in Anspruch genommen werden müssten, blieb die Suche nach weiteren Geldgebern nicht erspart. Bei der Industrie nicht fündig geworden, entschloss sich die EMPA Ende 1976, über den Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA) und in Zusammenarbeit mit dem damaligen Institut

de la construction métallique (ICOM) der ETH Lausanne ein Kreditgesuch an die Kommission für Strassenbauforschung des Eidgenössischen Departementes des Innern (EDI) zu richten.

Dieses Vorgehen ergab sich daraus, dass der Verfasser dieses Berichtes damals in der Arbeitsgruppe 3, "Dynamische Wirkungen", an der Neufassung der Norm SIA 160, "Belastungsannahmen", mitwirkte. Auf Antrag des Vorsitzenden dieser Arbeitsgruppe, in der auch die Kontakte zwischen EMPA und ICOM zustande gekommen waren, entschloss sich der SIA, das oben beschriebene Forschungsprojekt und das entsprechende Kreditgesuch zu unterstützen.

Dem im Januar 1977 eingereichten Kreditgesuch (Fr. 216'500.-) wurde in der Folge von der Kommission für Strassenbauforschung ebenso entsprochen wie einem zweiten, im Januar 1980 eingereichten Gesuch (Fr. 160'000.-) [8], [9]. Damit stand der Realisierung der geplanten Versuche nichts mehr im Weg.

Zwischen Planung und Verwirklichung ergaben sich in der Folge einige Unterschiede, auf die hier eingegangen werden soll.

Wegen Verzögerungen beim Einbau der Stabilisierungs- und der HMT-Schichten auf dem Trasse beidseits der Brücke musste der Versuchsbeginn von Anfang September 1977 auf Anfang März 1978 verschoben werden.

Mit Brief vom 31. Mai 1977 wünschte zudem die Normkommission 160 des SIA, dass bei den vorgesehenen Versuchen den Beanspruchungen

direkt belasteter Bauteile wie Fahrbahnplatten und Kragarmen verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werde. Neben einer entsprechenden Anpassung der vorgesehenen Brückeninstrumentierung konnte diesem Wunsch nur durch eine Verdoppelung der Anzahl Versuchsfahrten Rechnung getragen werden: Zusätzlich zu den Fahrten, bei denen die Fahrachse über der Längsachse der Brücke lag, waren Fahrten durchzuführen, bei denen das Fahrzeug möglichst nahe an einem Konsolrand fuhr.

Da die Versuche in jedem Fall Ende Juli 1978 abgeschlossen sein mussten, führten die zwei erwähnten Umstände (Verzögerung des Versuchsbeginns, Verdoppelung der Anzahl Fahrten) zu Änderungen am zeitlichen Ablauf des Versuchsprogrammes. Die geplanten vier Versuchsreihen

- V1: Bestimmung des Einflusses der Fahrzeugdynamik bei Zweiachsern,
- V2: Bestimmung des Einflusses des Fahrzeugtyps,
- V3: Bestimmung des Einflusses der Ebenheit der Fahrbahn und
- V4: Bestimmung des Einflusses der Anzahl Fahrzeuge,

die in zeitlichen Abständen von rund drei Monaten hätten durchgeführt werden sollen, mussten zu einer ununterbrochenen Reihe von Versuchen zusammengefasst werden. Die Vorteile, die eine Teilauswertung zwischen den Versuchsreihen gebracht hätte, fielen damit dahin.

Im weiteren zeigte sich kurz nach dem am 6. März 1978 erfolgten Beginn der Versuche,



Bild 3: Die Brücken Deibüel im Zuge der Talstrasse T4 bei Baar. Im Vordergrund die Bergspurbrücke.

dass die opto-elektronische Anlage zur Messung der dynamischen Radlasten den harten Umweltbedingungen nicht gewachsen war. Die Versuchsreihe V1 musste unterbrochen und die Reihe V2 vorgezogen werden, damit die Anlage (deren Einsatz bei V2 nicht vorgesehen war) in der Zwischenzeit umgebaut werden konnte (siehe Abschnitt 2.4, "Messung der dynamischen Radlasten schwerer Fahrzeuge"). Infolgedessen standen bei Beginn von V2 nur ungenügende Informationen über den Einfluss der Fahrzeugdynamik, die V1 hätte liefern sollen, zur Verfügung. V2 musste deshalb mit zwei verschiedenen, statt mit einem einzigen, dem kritischen, Reifendruck durchgeführt werden.

Der dadurch entstandene zusätzliche Zeitdruck und die finanzielle Lage erlaubten es nicht, in der Versuchsreihe V3 mehr als einen zweiten Belagzustand zu untersuchen.

Zum Teil technische, aber auch zeitliche und logistische Probleme erzwangen die Einsicht, dass bei der Versuchsreihe V1 auf die Variation des Parameters "Blattfedern" verzichtet werden musste.

Bezüglich des Parameters "Reifentyp": Im ersten Teil von V1 waren Versuche durchgeführt worden, bei denen ein Zweiachser zunächst mit diagonalen und dann mit radialen Reifen ausgerüstet war. Da die dynamischen Radlasten in dieser Versuchsphase nicht mit genügender Zuverlässigkeit gemessen werden konnten, wurden die entsprechenden Versuche nicht ausgewertet. Sie konnten auch nicht in einer späteren Versuchsphase wiederholt werden, so dass von den Parametern der zweiachsigen Solofahrzeuge (V1) lediglich der Radstand und der Reifendruck variiert wurden.

In den folgenden Kapiteln wird zuerst über einige Vorversuche berichtet, die in den Jahren 1976 und 1977 durchgeführt worden sind [10], [11]:

- Untersuchung des Schwerverkehrs in der Schweiz, Auswahl der Versuchsfahrzeuge;
- Bestimmung des Übertragungsverhaltens schwerer Fahrzeuge;
- Entwicklung einer Vorrichtung für die Messung der dynamischen Radlasten schwerer Fahrzeuge;
- Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Bergspurbrücke Deibüel;
- Planung und Bau eines Versuchsbelages vor und auf der Deibüel-Brücke.

Um eine gewisse thematische Einheitlichkeit zu wahren, enthält der Abschnitt 2.6, "Das dynamische Übertragungsverhalten der Deibüel-Brücke", neben den Resultaten der im Mai 1977 durchgeführten Versuchsreihe E1 auch diejenigen der analogen Versuche E2, die im Juli 1978 zwischen V4 und V3 stattgefunden haben.

Der Hauptteil dieses Berichtes ist anschliessend den dynamischen Belastungsversuchen gewidmet, die zwischen dem 6. März und dem 8. August 1978 an der Bergspurbrücke Deibüel durchgeführt worden sind.

Diese Einleitung soll mit einigen Bemerkungen zur Tatsache, dass zwischen der Durchführung der Versuche an der Deibüel-Brücke und der Erstattung dieses Schlussberichtes ein beträchtlicher Zeitraum liegt, abgeschlossen werden.

Zunächst ist festzustellen, dass zwar ausserordentlich viele Personen in der einen oder anderen Weise an Planung, Durchführung, Auswertung und Berichterstattung beteiligt waren, dass es aber, insbesondere in den beiden letzten erwähnten Phasen, letztlich doch nur ein Einzelner war, der den Hauptteil der "Knochenarbeit" zu leisten hatte. Es kann deshalb nicht erstaunen, wenn zahlreiche Unterbrüche in der Erledigung dieser Arbeit zu verzeichnen waren.

Zudem hat es dieser Einzelne, der Verfasser dieses Berichtes, zu verantworten, wenn er den Aufwand, der für die Auswertung der Deibüel-Versuche erforderlich war, in der Planungsphase erheblich unterschätzte. Rückblickend muss es als ein recht risikofreudiges Vorgehen bezeichnet werden, wenn so ausgedehnte Versuche durchgeführt werden, ohne dass dabei auf erprobte und ausgereifte Auswertemethoden basiert werden kann (vgl. dazu Abschnitt 3.5).

Abschliessend soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass eines der Hauptziele der ganzen Untersuchung schon frühzeitig erreicht war: Der Abschluss der Auswertung der an der Deibüel-Brücke gemessenen Signale im Zeitbereich, d.h. insbesondere die Bestimmung der dynamischen Inkremente ϕ , erfolgte im Frühjahr 1982. Zusammen mit den Ergebnissen der routinemässigen Belastungsversuche [6] waren damit die Informationen zusammengetragen, die für die Formulierung einer Vorschrift betreffend die dynamischen Beiwerte von Strassenlasten in einer neuen Belastungsnorm erforderlich waren [12], [13].

2 Vorversuche

2.1 Der Schwerverkehr in der Schweiz

Das Ziel der hier beschriebenen Untersuchung war die Schaffung einer zuverlässigen Datenbasis bezüglich der in der Schweiz zirkulierenden schweren Motorfahrzeuge, d.h. der Motorfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 35 kN. Auf dieser Basis sollte eine Anzahl von Fahrzeugen bestimmt werden, die die Gesamtheit der Fahrzeugtypen und der zugehörigen Radstandsgeometrien sowie Aufhängungssysteme möglichst gut repräsentierte.

Entsprechende Abklärungen ergaben, dass die beim Eidgenössischen Statistischen Amt [14], beim damaligen Eidgenössischen Amt für Strassen- und Flussbau, ASF [15] (heute Bundesamt für Strassenbau, ASB) und beim Eidgenössischen Militärdepartement unterhaltenen Datenbanken die gewünschten Informationen nicht oder nur zum Teil enthielten. Im Laufe der Diskussionen mit Beamten des ASB stellte sich jedoch heraus, dass dieses Amt jedes Jahr eine Anzahl von Schwerverkehrsuntersu-

chungen durchführt, bei denen die Lastwagen aus dem Verkehrsstrom herausgenommen und unter anderem auch gewogen werden. Zudem hatte das Institut de la construction métallique (ICOM) der ETH Lausanne im Rahmen eines eigenen Forschungsprogrammes im Mai 1975 an einer solchen ASB-Erhebung teilgenommen und dabei Typ und Radstandsgeometrie der Fahrzeuge erfasst [16].

Es lag demnach auf der Hand, eine Zusammenarbeit ASB/ICOM/EMPA herbeizuführen, um bei weiteren Erhebungen des ASB die gewünschten Fahrzeugdaten gemeinsam zu ermitteln und auszuwerten. Dies geschah denn auch im Jahr 1976 bei drei ASB-Erhebungen, so dass schliesslich die Daten von vier Messstellen je in beiden Fahrrichtungen vorlagen:

Nationalstrasse N1, Etoy,		
Dienstag/Mittwoch, 13./14. Mai 1975		
Lausanne - Genf		231 Fahrzeuge
Genf - Lausanne		284 Fahrzeuge
Nationalstrasse N3, Mumpf,		
Donnerstag/Freitag, 6./7. Mai 1976		
Basel - Zürich		369 Fahrzeuge
Zürich - Basel		371 Fahrzeuge
Nationalstrasse N1, Gossau/SG,		
Mittwoch/Donnerstag, 2./3. Juni 1976		
Zürich - St. Gallen		271 Fahrzeuge
St. Gallen - Zürich		298 Fahrzeuge
Kantonsstrasse bei Bellinzona/Castione (ohne San Bernardino-Verkehr),		
Dienstag/Mittwoch, 22./23. Juni 1976		
Chiasso - Gotthard		300 Fahrzeuge
Gotthard - Chiasso		246 Fahrzeuge
		<u>Total 2'370 Fahrzeuge</u>

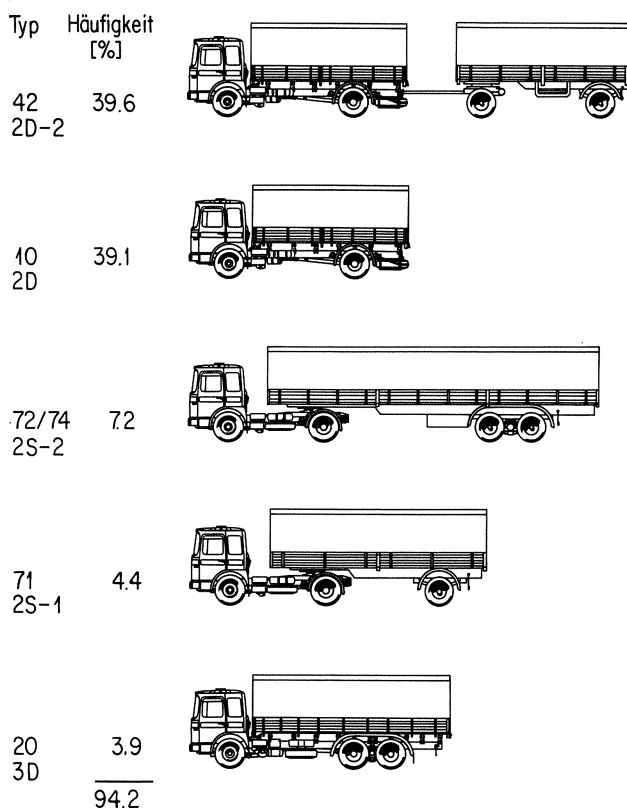


Bild 4: Schwerverkehr in der Schweiz: Die fünf häufigsten Fahrzeugtypen [16].

Die ermittelten Daten werden in [11] und [12] ausführlich dargestellt und interpretiert. Hier sollen lediglich die zwei im vorliegenden Zusammenhang wichtigsten Resultate der Untersuchung angeführt werden:

- Die zweiachsigen Solofahrzeuge (Typ 2D) und die vierachsigen Lastenzüge (Typ 2D-2) weisen je einen Anteil von rund 40% am gesamten Schwerverkehr auf.
- Mit den fünf in Bild 4 dargestellten Fahrzeugtypen werden 94.2% des schweizerischen Schwerverkehrs abgedeckt.

Für die abgekürzte Bezeichnung der verschiedenen Fahrzeugtypen werden im folgenden auch die in Bild 5 dargestellten, aus der amerikanischen Literatur entlehnten Codierungen verwendet [17].

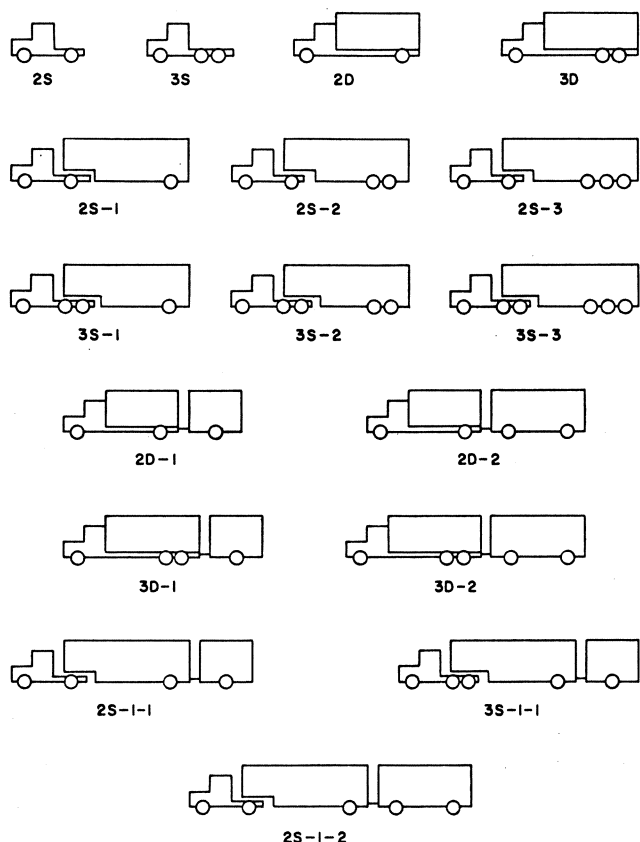


Bild 5: Codierung der schweren Fahrzeuge in den USA [17].

Die Auswahl der Versuchsfahrzeuge erfolgte, basierend auf den Ergebnissen der vorgenannten Untersuchung, aufgrund der folgenden Kriterien:

- Die fünf am häufigsten auftretenden Fahrzeugtypen sollten vertreten sein.
- Der zu erwartenden Zunahme seiner Häufigkeit entsprechend sollte zusätzlich der Fahrzeugtyp 4D, "vierachsiges Solofahrzeug", berücksichtigt werden.
- Die drei für die Versuchsreihe V1 vorgesehenen 2D-Fahrzeuge sollten einen Radstand aus je einer der Klassen mit den Mitten 3.5 m, 4.5 m und 5.0 m aufweisen (Bild 6).
- Für die 3D- und die 4D-Fahrzeuge sollten je zwei Fahrzeuge ausgewählt werden, wobei der Radstand A1 beim 3D- bzw. A2 beim 4D-Fahrzeug jeweils aus einer der beiden Klassen mit der Mitte 3.0 m und 4.0 m zu wählen war (Bilder 7 und 8).
- Von den übrigen Fahrzeugtypen sollte je ein Exemplar mit einem möglichst repräsentativen Radstand eingesetzt werden.

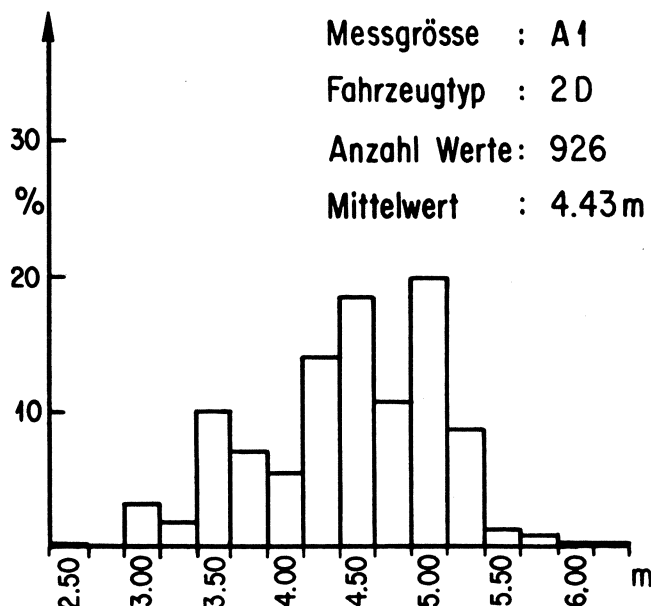
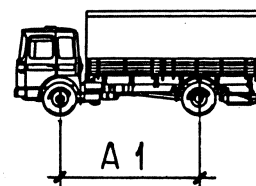


Bild 6: Schwerverkehr in der Schweiz: Histogramm des Radstandes A1 der 2D-Fahrzeuge [16].

- Alle Fahrzeuge sollten die für den jeweiligen Typ ermittelten charakteristischen Aufhängungen und Reifen aufweisen:

- keine Luftfedern,
- Einzelachsen blattgefedert; Vorderachsen mit, Hinterachsen ohne Stossdämpfer,
- Doppelachsen von Solofahrzeugen mit Waagebalken-Federung,
- Doppelachsen von zusammengesetzten Fahrzeugen mit Einzelfederung pro Achse und mit mechanischem Lastausgleichssystem,
- Überwiegend radial bereifte Räder mit normalen Dimensionen (keine Wide-Single-Räder anstelle von Zwillingsrädern).

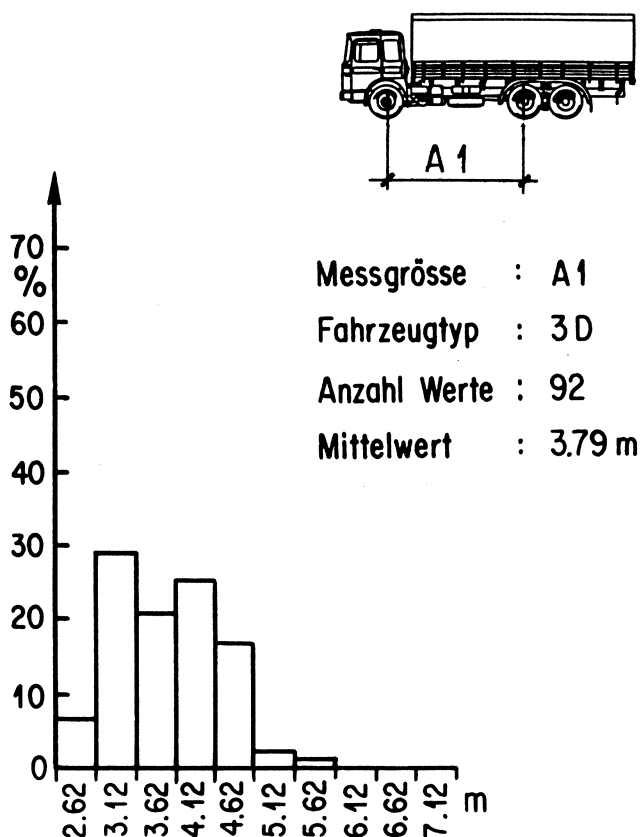


Bild 7: Schwerverkehr in der Schweiz: Histogramm des Radstandes A1 der 3D-Fahrzeuge [16].

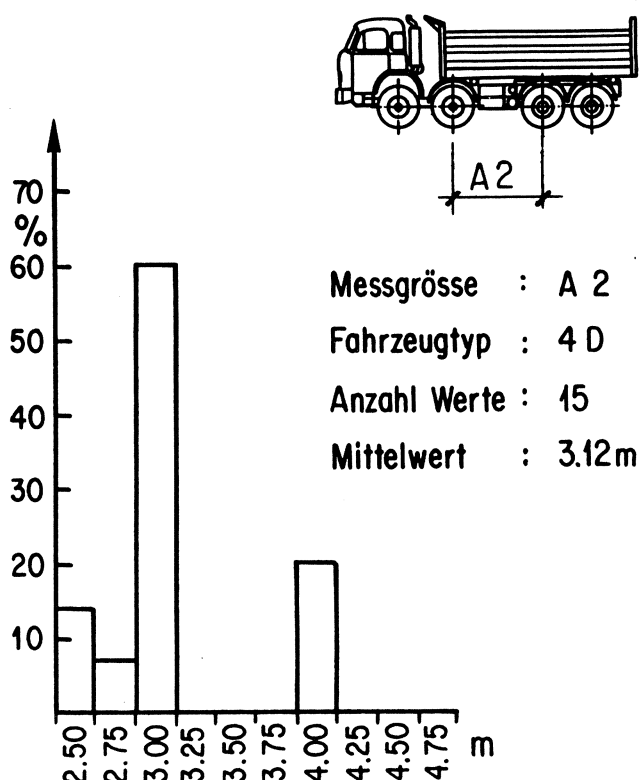


Bild 8: Schwerverkehr in der Schweiz: Histogramm des Radstandes A2 der 4D-Fahrzeuge [16].

2.2 Die Versuchsfahrzeuge

Die Durchführung der Versuche an der Deibüel-Brücke in der vorgesehenen Art wäre ohne die zuvorkommende Haltung der Firma Gebr. Saurer, Arbon, nicht möglich gewesen. Von den 14 Fahrzeugen, die schliesslich eingesetzt wurden, stellte Saurer deren neun inklusive Chauffeur zum Selbstkostenpreis zur Verfügung. Die Beschaffung der anderen Fahrzeuge geschah ebenfalls meist mit Hilfe der Firma Saurer, die uns die notwendigen Adressen von Besitzern vermittelte.

2.21 Fahrzeugtypen, Geometrie, Lasten

Die 14 eingesetzten Fahrzeuge sind in Bild 9 zusammengestellt und in den Bildern 10 bis 24 im Detail beschrieben:

- 4 zweiachsige Solo-fahrzeuge, Typ 2D Nr.11,12,13,14
- 5 mehrachsige Solo-fahrzeuge, Typ 3D Nr.20,21
Typ 4D Nr.24,25,25A
- 2 Lastenzüge, Typ 2D-2 Nr.42
Typ 3D-2 Nr.52
- 3 Sattelschlepper, Typ 2S-1 Nr.71
Typ 2S-2 Nr.74
Typ 2S-3 Nr.76

Die hier verwendeten Bezeichnungen für die Fahrzeuge und Fahrzeugtypen sind nicht ganz konsistent mit jenen, die im Bericht [11] benützt werden. Da hier teilweise pro Fahrzeugtyp mehrere Fahrzeuge eingesetzt waren, liessen sich gewisse Anpassungen nicht vermeiden. Der später benützte Zusatz R zur Fahrzeugnummer, zum Beispiel 11R, deutet darauf hin, dass das Fahrzeug mit Radialreifen ausgerüstet war.

Bezüglich der 2D-Fahrzeuge konnten die Vorstellungen recht gut realisiert werden: Zu den drei Saurer-Fahrzeugen Nr. 11, 12 und 13 mit Radständen A1 von 3.7 m, 4.3 m und 5.0 m stiess nachträglich der FBW Nr. 14 mit einem Radstand A1 von 4.7 m. Dieser FBW stammt aus den Beständen der Schweizer Armee. Nachforschungen haben ergeben, dass die Schweizerische Eidgenossenschaft entgegen ursprünglichen Annahmen über einen Fahrzeugtyp verfügt, der in Ausführung, Nutzlast und zulässigem Gesamtgewicht einem üblichen zivilen Lastwagen entspricht. Das Fahrzeug Nr. 14 fällt insofern etwas aus dem Rahmen der 2D-Fahrzeuge, als es infolge seiner verspäteten Einführung in das Versuchsprogramm nicht den gleichen Vorversuchen unterzogen werden konnte wie die Fahrzeuge Nr. 11, 12 und 13

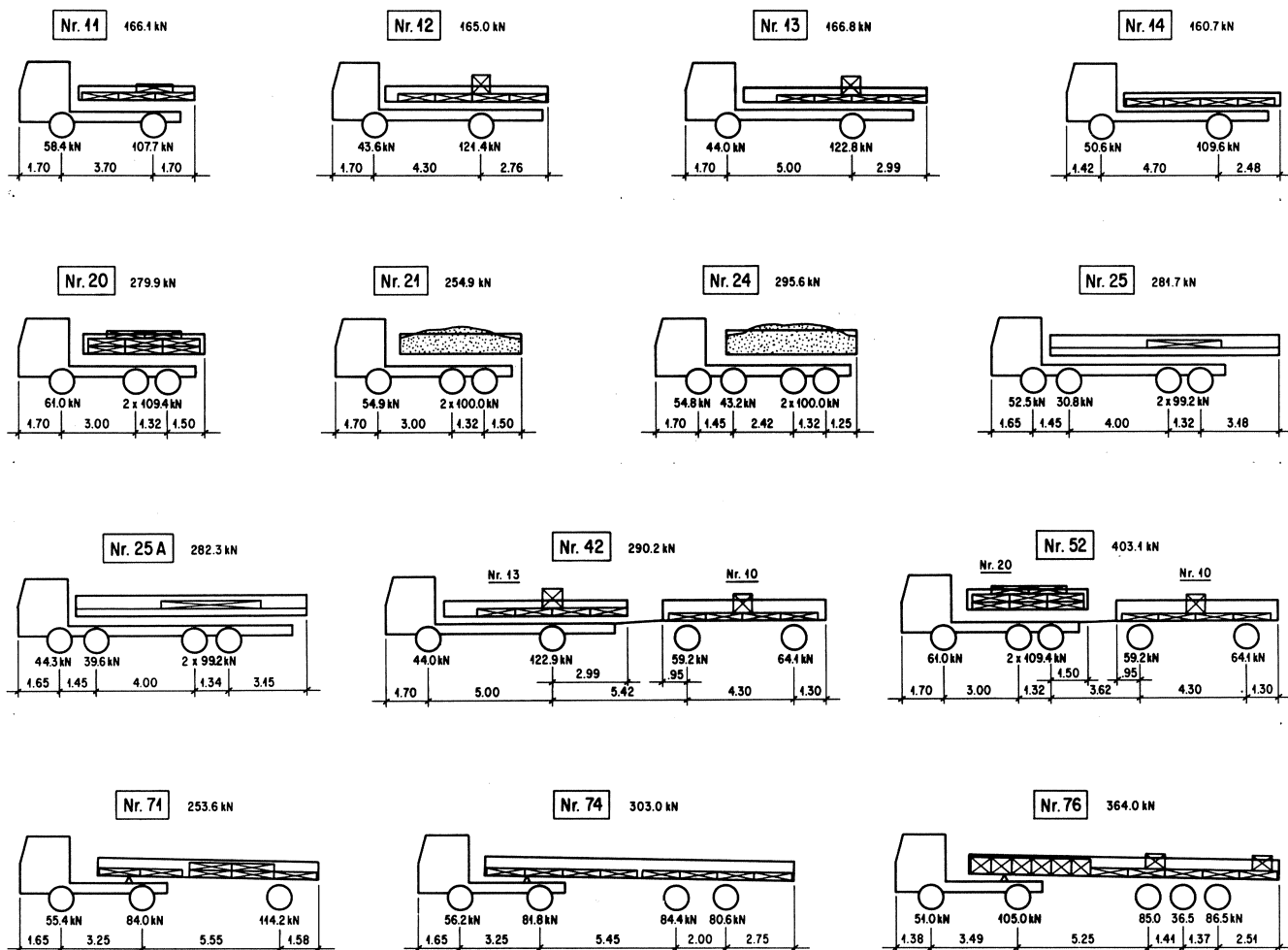


Bild 9: Geometrie und statische Achslasten aller Versuchsfahrzeuge. Dimension der Radstände: m.

und es zudem als einziges 2D-Fahrzeug nicht mit Goodyear-Reifen bestückt war. Der Hauptgrund für die ausserplanmässige Berücksichtigung des FBW war die Aussicht, dass die EMPA dieses Fahrzeug in Zukunft für alle routinemässigen dynamischen Belastungsversuche verwenden konnte. Leider erfüllte sich diese Aussicht nur teilweise, indem wir heute zwar für alle Versuche einen FBW der Armee verwenden können, jedoch nicht das für die Deibüel-Versuche verwendete, sondern ein "baumustergleiches" Fahrzeug.

Im Gegensatz zu den Ueberlandfahrzeugen (oder "Lastwagen" im engeren Sinn der Bezeichnung) Nr. 12 bis 14 handelte es sich beim Fahrzeug Nr. 11 um einen Kipper. Die vier Fahrzeuge erreichten ein Gesamtgewicht zwischen 161 kN und 167 kN, d.h. nur wenig mehr als die gesetzlich zugelassenen 160 kN.

Da kein 3D-Fahrzeug mit grossem Radstand A1 aufzutreiben war, beschloss man ursprünglich, von diesem Typ nur die Nr. 20, einen

Kipper mit einem Radstand A1 = 3.0 m, einzusetzen. Dieser Beschluss musste revidiert werden, als feststand, dass der Typ 3D in der Versuchsreihe V3 nochmals eingesetzt werden sollte, das Fahrzeug Nr. 20 in der Zwischenzeit von Saurer aber verkauft worden war. Noch im Verlauf der Versuchsreihe V2 wurde deshalb in Cham das mit Nr. 20 baugleiche Fahrzeug Nr. 21 organisiert und sowohl in V2 als auch in V3 eingesetzt. Das Gesamtgewicht des Fahrzeuges Nr. 21 entsprach ungefähr dem zulässigen Wert von 250 kN, während Nr. 20 um gut 10% überladen war. Dreiaxser sind, insbesondere wenn sie Kies transportieren, oft überladen [15].

Im Gegensatz zu den 3D-Fahrzeugen besass Saurer wohl ein 4D-Fahrzeug mit grossem Radstand A2, das Ueberlandfahrzeug Nr. 25 mit A2 = 4.0 m, nicht aber ein solches mit kleinem A2. Der Kipper Nr. 24 mit A2 = 2.42 m wurde deshalb in Brunnen gemietet. Für die Reihe V4 musste Nr. 25 durch das fast bau-

gleiche Fahrzeug Nr. 25A ersetzt werden, da Nr. 25 inzwischen ebenfalls verkauft worden war. Als einziges der an den Deibüel-Versuchen beteiligten Fahrzeuge wies Nr. 25 Stossdämpfer an der Aufhängung der ungelenkten Achsen auf. Das Gesamtgewicht des Fahrzeuges Nr. 24 lag um 6% über dem zulässigen Wert von 280 kN, während diese Limite von Nr. 25 und 25A fast exakt eingehalten wurde.

Die Lastenzüge Nr. 42 und 52 setzten sich aus den Zugfahrzeugen Nr. 13 und 20 und einem ebenfalls von Saurer stammenden zweiachsigen Anhänger, Nr. 10, zusammen. Während Nr. 42 zwar etwas zu schwer, im Übrigen aber repräsentativ für die in der Schweiz zirkulierenden Lastenzüge war, handelte es sich bei Nr. 52 um ein Fahrzeug, das mit einem Gesamtgewicht von 403 kN den zulässigen Wert um 44% überschritt.

Dieser Lastenzug wurde eingesetzt, um einen Anhaltspunkt darüber zu erhalten, ob von so schweren Fahrzeugen spezielle Einwirkungen zu gewärtigen seien. Auch wenn die absolut höchste Gewichtsgrenze in der Schweiz von heute 280 kN in absehbarer Zeit nicht den in den Nachbarländern gültigen Werten, 380 kN bis 400 kN, oder gar den in den Niederlanden gültigen 500 kN [18] angepasst werden wird, so zirkulieren doch bereits heute solche EG-Fahrzeuge völlig legal und ohne Ausnahmebewilligung in gewissen grenznahen Gebieten der Schweiz.

Von den drei Sattelschleppern stammte das Fahrzeug Nr. 74 von Saurer, war um 8% zu schwer und entsprach im Übrigen den Anforderungen. Entgegen den Zusagen des Vermieters war die Aufliegerachse des Fahrzeuges Nr. 71 mit einer Luftfederung ausgerüstet. Diese Tatsache wurde erst beim Umladen der Nutzlast von Nr. 74 auf Nr. 71, in Sursee, festgestellt, so dass es nicht mehr möglich war, für die Zugmaschine (für Nr. 74 und Nr. 71 identisch) einen einachsigen, blattgefederten Auflieger zu organisieren. Das Gesamtgewicht von Nr. 71 war gerade noch zulässig. Demgegenüber war das Fahrzeug Nr. 76 um 30% überladen und sollte wie Nr. 52 ein EG-Fahrzeug repräsentieren.

Die durch die Konstruktion der Fahrzeuge gegebenen Grenzen des Gesamtgewichtes wurden natürlich bei keinem der "überladenen" Fahrzeuge überschritten. Im Zusammenhang mit den Deibüel-Versuchen zirkulierten beide "EG-Fahrzeuge" aufgrund einer Ausnahmebewilligung auf dem normalen Strassennetz der Schweiz.

Als Nutzlast wurden, soweit möglich, an der EMPA hergestellte Betonplatten und -würfel mit einer Masse von rund 2 t bzw. 1 t benutzt. Das Be- und Entladen erfolgte aus Gründen der Zweckmässigkeit meist ebenfalls an der EMPA. Ausnahmen betrafen die Fahrzeuge Nr. 71 und 76, wo direkt beim Vermieter umgeladen wurde. Damit das vorhandene Verdeck nicht demontiert werden musste, belud die Firma Saurer die beiden 4D-Ueberlandfahrzeuge Nr. 25 und 25A jeweils im Werk in Arbon mit Stahlmasseln. Als einzige Fahrzeuge wurden Nr. 21 und Nr. 24 aus Zeitgründen mit Kies beladen.

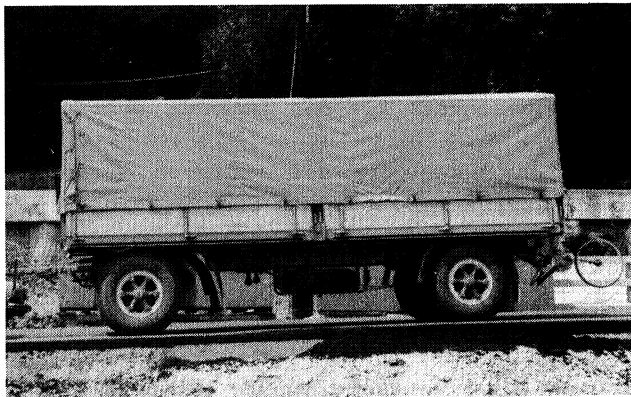
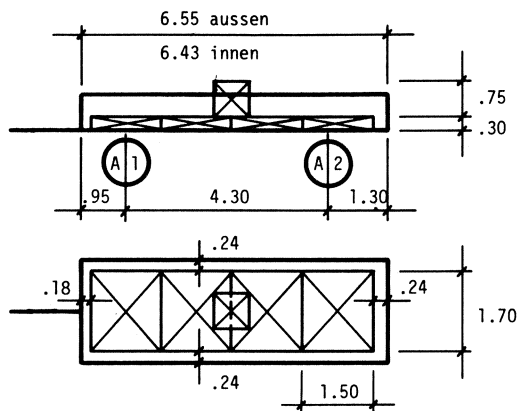
Der belastete Bereich der Brücke ist in den Bildern 9 bis 24 für jedes Fahrzeug angegeben. Alle Achslasten wurden immer vor den Versuchen auf öffentlichen Waagen bestimmt, was insbesondere für die grossen, mehrachsigen Fahrzeuge nicht immer einfach war. Für jene Fahrzeuge, die bei mehreren Versuchen eingesetzt waren, sind in den Bildern 10 bis 24 alle jeweils gültigen Achslasten angegeben:

- Ulm : Versuche zur Bestimmung des Uebertragungsverhaltens
- Baar (A) : Versuche an der Deibüel-Brücke mit dem Belag A
- Baar (B) : Versuche an der Deibüel-Brücke mit dem Belag B (Versuchsreihe V3)

Die Bilder 25 und 26 zeigen schematisch die aus mehreren Fahrzeugen bestehenden Formationen, die in der Versuchsreihe V4 untersucht wurden, sowie die zugehörigen Codierungen. Für die Bezeichnung tatsächlich durchgeführter Versuchsserien werden die allgemeinen Buchstaben H = Hintereinander und N = Nebeneinander durch die Codes für konkrete Fahrachsen und Fahrbahnzustände ersetzt.

Die Bilder 27 bis 30 zeigen vergleichende Darstellungen der Gesamtgewichte, Flächen- und Achslasten der einzelnen Versuchsfahrzeuge und Formationen. Diese Darstellungen erleichtern die Beurteilung der statischen und der quasistatischen Einwirkung eines bestimmten Lastbildes auf die Brücke, und zwar sowohl global (Durchbiegung, Längsdehnung) als auch lokal (Längs- und Querdehnung). Die Gesamtbeanspruchung einer Brücke ergibt sich aus der Ueberlagerung der Beanspruchungen aus quasistatischer und dynamischer Einwirkung.

Versuchsfahrzeug Nr. 10



KNUPP Anhänger, 1964
Chassis Nr. 2238/64

Bereifung:

A 1 : Good Year Unisteel II, G 18
11.00 R 20, 16 Ply, einfach

A 2 : Good Year Unisteel II, G 18
11.00 R 20, 16 Ply, einfach

Federung :

A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder

A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder

Nutzlast:

4 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m
1 Betonwürfel 0.75 x 0.75 x 0.75 m

4 x 20 kN + 1 x 9 kN = 89 kN

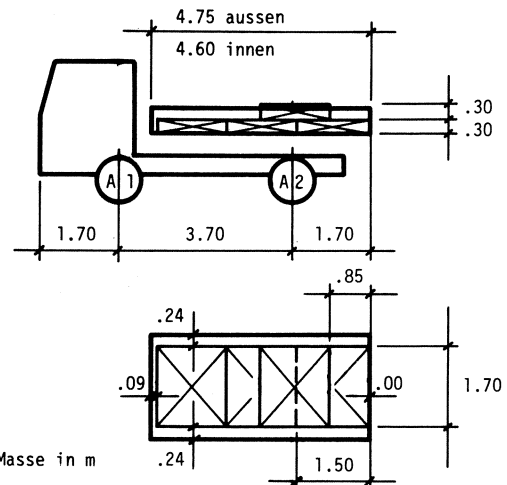
Achslasten beladen :

- Ulm A 1 : 58.7 kN
A 2 : 65.1 kN } 123.8 kN

- Baar A 1 : 59.2 kN
(A) A 2 : 64.1 kN } 124.2 kN

Bild 10: Das Versuchsfahrzeug Nr. 10R
(Anhänger).

Versuchsfahrzeug Nr. 11



SAURER D 290 F 4x2 Kipper, 1977
Chassis Nr. 205'698

Bereifung:

A 1 : Good Year Unisteel II, G 18
11.00 R 20, 16 Ply, einfach

A 2 : Good Year Unisteel II, G 19,
S & G
11.00 R 20, 16 Ply, doppelt

Federung :

A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer

A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder

Nutzlast:

4 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m

4 x 20 = 80 kN

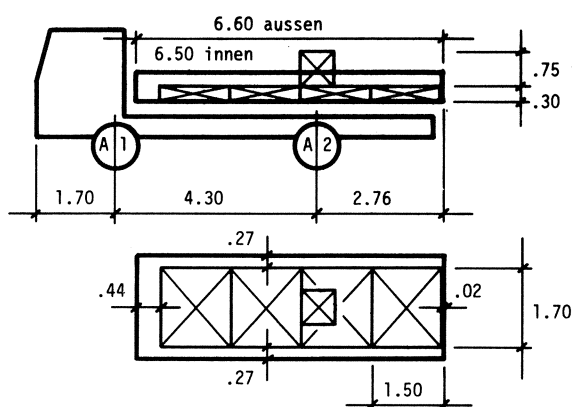
Achslasten beladen :

- Ulm A 1 : 57.7 kN
A 2 : 106.9 kN } 164.6 kN

- Baar A 1 : 58.4 kN
(A) A 2 : 107.7 kN } 166.1 kN

Bild 11: Das Versuchsfahrzeug Nr. 11R.

Versuchsfahrzeug Nr. 12



SAURER 4 DF 4x2, LW, 1973
Chassis Nr. 201'768

Bereifung:

- A 1 : Good Year Unisteel II, G 18
11.00 R 20, 16 Ply, einfach
- A 2 : Good Year Unisteel II, G 19
S & G
11.00 R 20, 16 Ply, doppelt

Federung :

- A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
- A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder

Nutzlast:

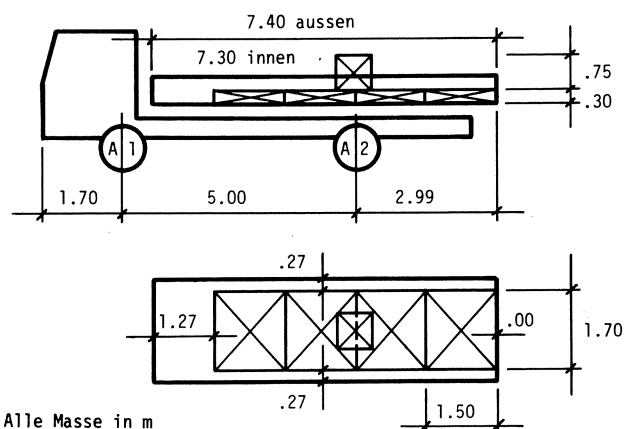
- 4 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m
1 Betonwürfel 0.75 x 0.75 x 0.75 m
- 4 x 20 kN + 1 x 9 kN = 89 kN

Achslasten beladen :

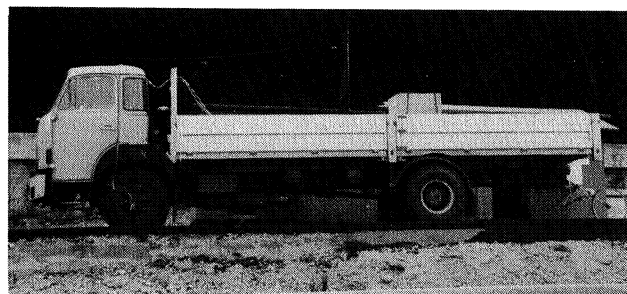
- Ulm A 1 : 43.2 kN
A 2 : 119.2 kN } 163.2 kN
- Baar A 1 : 44.2 kN
(A) A 2 : 120.4 kN } 165.0 kN
- Baar A 1 : 43.6 kN
(B) A 2 : 121.4 kN } 165.0 kN

Bild 12: Das Versuchsfahrzeug Nr. 12R.

Versuchsfahrzeug Nr. 13



Alle Masse in m



SAURER D 290 F 4x2 LW, 1975 (Federn 1977)
Chassis Nr. 205'642

Bereifung:

- A 1 : Good Year Unisteel II, G 18
11.00 R 20, 16 Ply, einfach
- A 2 : Good Year Unisteel II, G 19
S & G
11.00 R 20, 16 Ply, doppelt

Federung :

- A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
- A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder

Nutzlast:

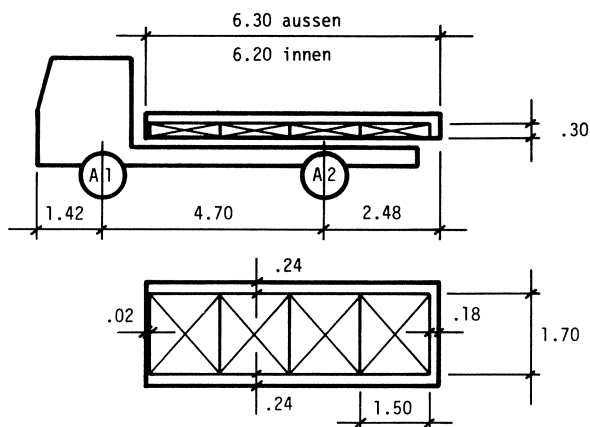
- 4 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m
1 Betonwürfel 0.75 x 0.75 x 0.75 m
- 4 x 20 kN + 1 x 9 kN = 89 kN

Achslasten beladen :

- Ulm A 1 : 44.4 kN
A 2 : 123.5 kN } 167.9 kN
- Baar A 1 : 44.0 kN
(A) A 2 : 122.9 kN } 167.1 kN
- Baar A 1 : 44.1 kN
(B) A 2 : 122.7 kN } 166.6 kN

Bild 13: Das Versuchsfahrzeug Nr. 13R.

Versuchsfahrzeug Nr. 14



FBW L 50 V - B 3/70, LW, 1972
A + 42719, Chassis Nr. 6053

Bereifung:

14 D: A 1 : Firestone Super Transport
11.00 - 20, M Ply, einfach

A 2 : Firestone T + C
11.00 - 20, 16 Ply, doppelt

14 R: A 1 : Firestone Transport 2000,
A 2 11.00 R 20, 16 P.R.

Federung :

A 1 : Einstufige Blattfeder
Stossdämpfer

A 2 : Zweistufige Blattfeder

Nutzlast:

4 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m

4 x 20 kN = 80 kN

Achslasten beladen :

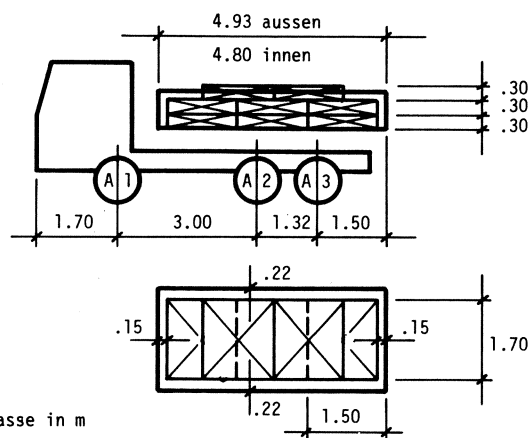
- Ulm A 1 : 52.0 kN } 156.4 kN
A 2 : 103.6 kN

- Baar A 1 : 52.7 kN } 156.5 kN
(A) A 2 : 103.4 kN

- Baar A 1 : 50.6 kN } 160.7 kN
(B) A 2 : 109.6 kN

Bild 14: Das Versuchsfahrzeug Nr. 14D/R.

Versuchsfahrzeug Nr. 20



Alle Masse in m



SAURER 5 DF 6x4 Kipper

Bereifung:

A 1 : Michelin
12 - 22.5 X, einfach

A 2, A 3 : Michelin
12 R 22.5 X, aufgummiert,
doppelt

Federung :

A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer

A 2, A 3 : Einstufige Blattfeder
(Waagebalkenachse)

Nutzlast:

8 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m

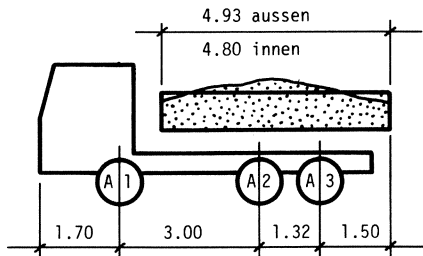
8 x 20 kN = 160 kN

Achslasten beladen :

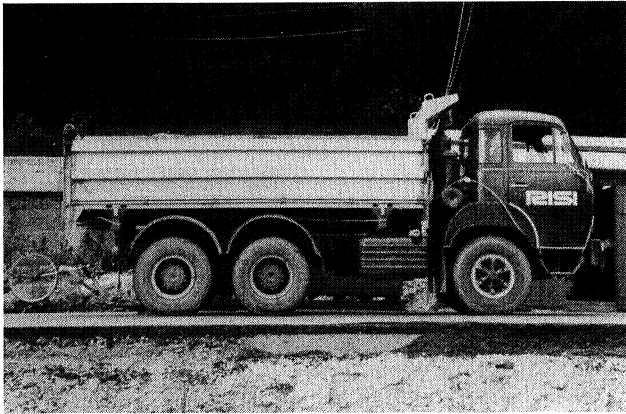
- Baar A 1 : 61.0 kN
(A) A 2 : 109.4 kN } 279.9 kN
A 3 : 109.4 kN

Bild 15: Das Versuchsfahrzeug Nr. 20R.

Versuchsfahrzeug Nr. 21



Alle Masse in m



SAURER 5 DF 6x4, 1975
ZH 85971, Chassis Nr. 206'153

Bereifung:

A 1 : Michelin
12.00 R 20 X, einfach

A 2 : Firestone T + C 1000,
A 3 aufgummiert, 11 R 20,
rechts doppelt

A 3 : Continental, aufgummiert
links 11 R 20, doppelt

Federung :

A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer

A 2, A 3 : Einstufige Blattfeder
(Waagebalkenachse)

Nutzlast: Kies

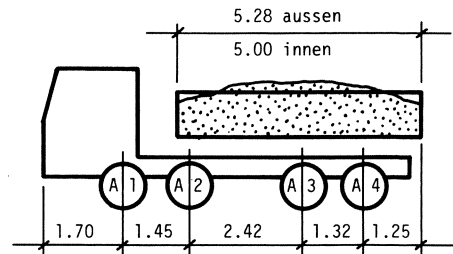
Achslasten beladen :

- Baar A 1 : 53.8 kN
(A) A 2 : 100.0 kN } 253.8 kN
A 3 : 100.0 kN

- Baar A 1 : 56.0 kN
(B) A 2 : 100.0 kN } 256.0 kN
A 3 : 100.0 kN

Bild 16: Das Versuchsfahrzeug Nr. 21R.

Versuchsfahrzeug Nr. 24



SAURER 5 DF 8x4, Kipper, 1976
SZ 12760, Chassis Nr. 207'202

Bereifung:

A 1 : Bridgestone V Steel
11 R 22.5, einfach

A 2 : Michelin Radial
11 - 22.5 X, einfach

A 3 : Continental M + S Radial GS,
aufgummiert
11 R 22.5, doppelt

A 4 : Michelin, aufgummiert
10.00 - 20 X, doppelt

Federung :

A 1, A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
(Ausgleichsachse)

A 3, A 4 : Einstufige Blattfeder
(Waagebalkenachse)

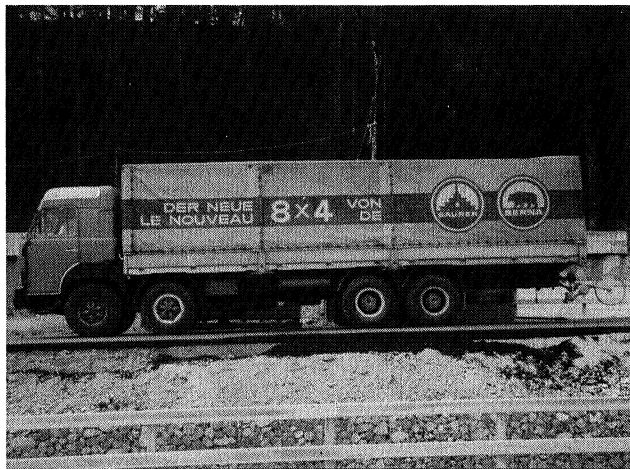
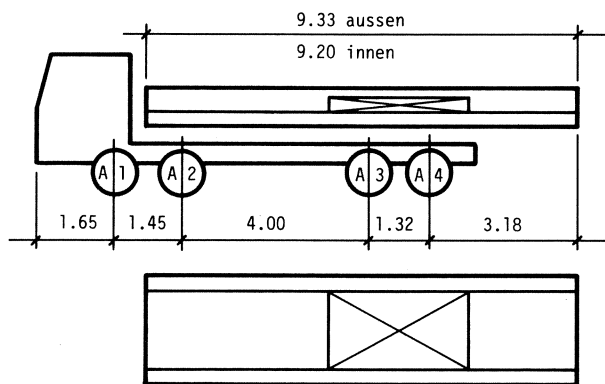
Nutzlast: Kies

Achslasten beladen :

- Baar A 1 : 54.8 kN
(A) A 2 : 43.2 kN } 295.6 kN
A 3 : 100.0 kN
A 4 : 100.0 kN

Bild 17: Das Versuchsfahrzeug Nr. 24R.

Versuchsfahrzeug Nr. 25



SAURER 5 DF 8x4, Lastwagen

Bereifung:

- A 1, A 2 : Continental Radial GS RS 415
11 R 20, einfach
- A 3, A 4 : Good Year Unisteel II, G 19
11 R 20, doppelt

Federung :

- A 1, A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
(Ausgleichsachse)
- A 3, A 4 : Einstufige Blattfeder
Stossdämpfer
(Waagebalkenachse)

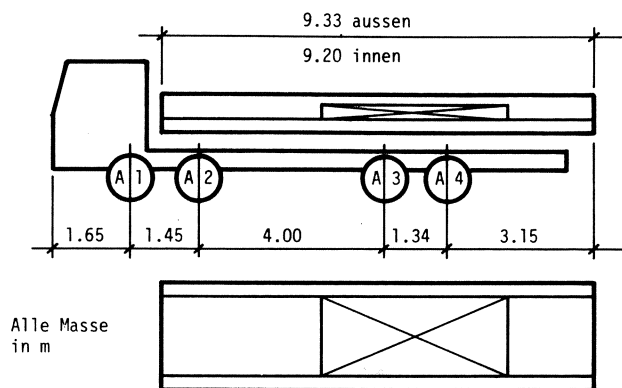
Nutzlast: Stahlmasseln

Achslasten beladen :

- | | | | |
|--------|-------|---------|------------|
| - Baar | A 1 : | 52.5 kN | |
| (A) | A 2 : | 30.8 kN | } 281.7 kN |
| | A 3 : | 99.2 kN | |
| | A 4 : | 99.2 kN | |

Bild 18: Das Versuchsfahrzeug Nr. 25R.

Versuchsfahrzeug Nr. 25A



Alle Masse
in m



SAURER D 330 F 8x4, 1978

BE 359 855, Chassis Nr. 209'153

Bereifung:

- A 1, A 2 : Michelin Radial
12 R 22.5 X, einfach
- A 3, A 4 : Michelin Radial
12 R 22.5 X, doppelt

Federung :

- A 1, A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
(Ausgleichsachse)
- A 3, A 4 : Einstufige Blattfeder
(Waagebalkenachse)

Nutzlast: Stahlmasseln

Achslasten beladen :

- | | | | |
|--------|-------|---------|------------|
| - Baar | A 1 : | 44.3 kN | |
| (A) | A 2 : | 39.6 kN | } 282.3 kN |
| | A 3 : | 99.2 kN | |
| | A 4 : | 99.2 kN | |

Bild 19: Das Versuchsfahrzeug Nr. 25AR.

Versuchsfahrzeug

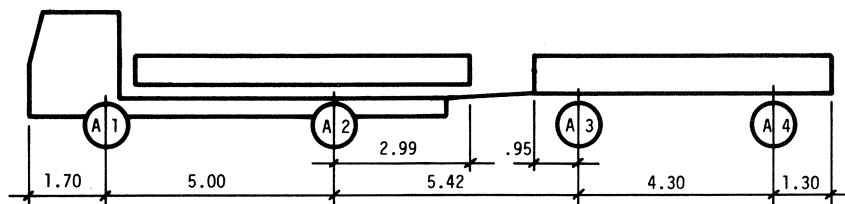
Nr. 42

Nr. 42 = Nr. 13 + Nr. 10

Alle Masse in m

Typen, Bereifung, Federung,
Nutzlast

siehe Nr. 13 bzw. Nr. 10



Achslasten beladen :

- Baar A 1:	44.0 kN	
(A) A 2:	122.9 kN	} 290.2 kN
A 3:	59.2 kN	
A 4:	64.1 kN	

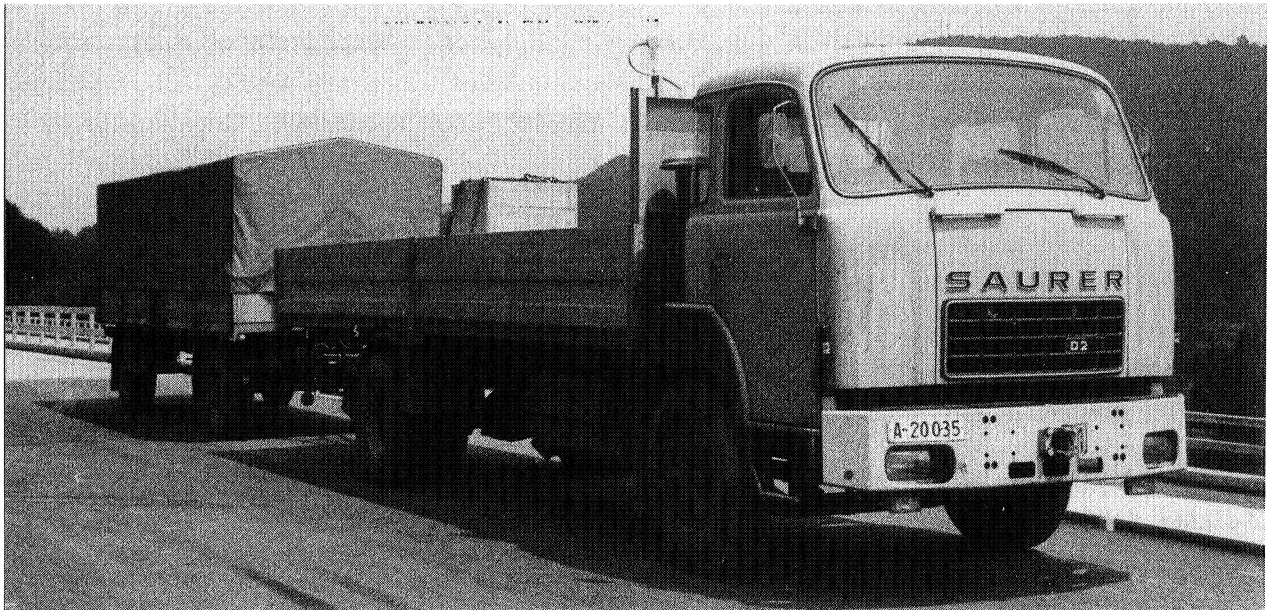


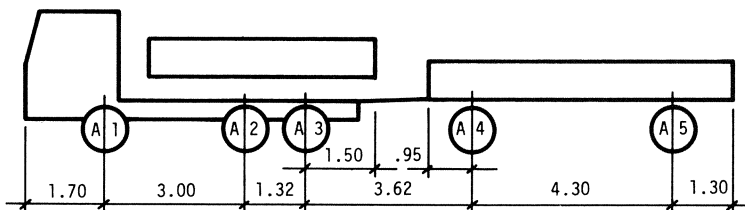
Bild 20: Das Versuchsfahrzeug Nr. 42R.

Versuchsfahrzeug

Nr. 52

Nr. 52 = Nr. 20 + Nr. 10

Typen, Bereifung, Federung, Nutzlast
siehe Nr. 20 bzw. Nr. 10



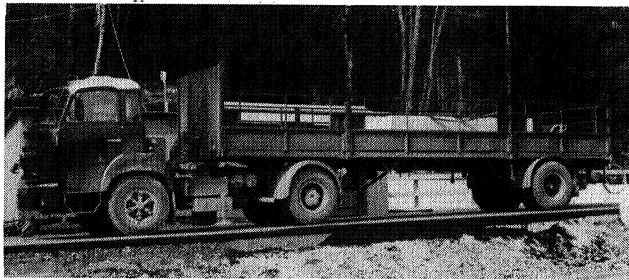
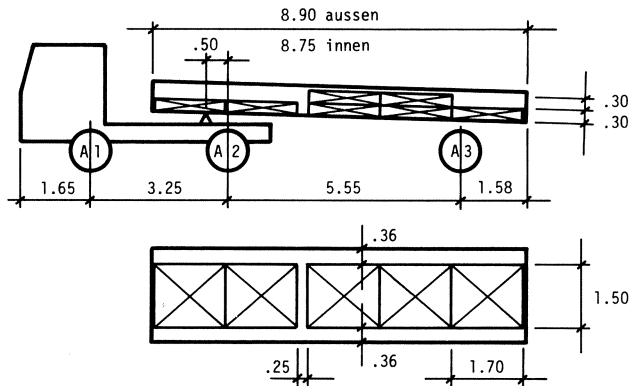
Achslasten beladen :

- Baar A 1 :	61.0 kN	
(A) A 2 :	109.4 kN	} 403.1 kN
A 3 :	109.4 kN	
A 4 :	59.2 kN	
A 5 :	64.1 kN	



Bild 21: Das Versuchsfahrzeug Nr. 52R.

Versuchsfahrzeug Nr. 71



SAURER 5 DF S 4x2, 1975
Chassis Nr. 205'508
AUFLIEGER SAMECO, Payerne

Bereifung:

- A 1 : Continental Radial GS
11 R 20, einfach
- A 2 : Continental Radial GS,
aufgummiert
11 R 20, doppelt
- A 3 : Firestone Transport R 1000
links 11 R 20, doppelt
- A 3 : Good Year Unisteel, G 18
rechts 11 R 20, doppelt

Federung :

- A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
- A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
- A 3 : Luftfederung

Nutzlast:

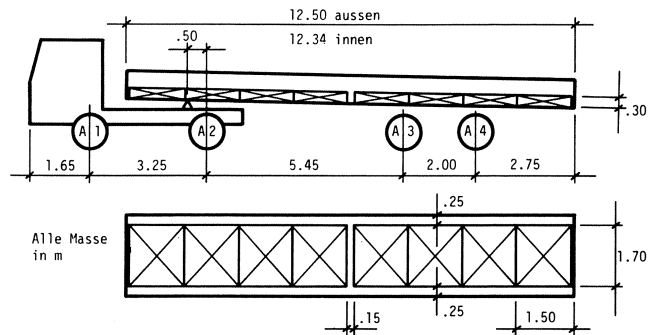
7 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m
7 x 20 kN = 140 kN

Achslasten beladen :

- Baar A 1 : 55.4 kN
(A) A 2 : 84.0 kN } 253.6 kN
A 3 : 114.2 kN

Bild 22: Das Versuchsfahrzeug Nr. 71R.

Versuchsfahrzeug Nr. 74



SAURER 5 DF S 4x2, 1975
Chassis Nr. 205'508
AUFLIEGER LANZ + MARTI, Sursee

Bereifung:

- A 1 : Continental Radial GS
11 R 20, einfach
- A 2 : Continental Radial GS,
aufgummiert
11 R 20, doppelt
- A 3, A 4 : Good Year Unisteel II, G 18
11 R 20, doppelt

Federung :

- A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer
- A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
- A 3, A 4 : Einstufige Blattfedern
(Ausgleichsachse)

Nutzlast:

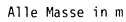
8 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m
8 x 20 kN = 160 kN

Achslasten beladen :

- Baar A 1 : 56.2 kN
(A) A 2 : 81.8 kN } 303.0 kN
A 3 : 84.4 kN
A 4 : 80.6 kN

Bild 23: Das Versuchsfahrzeug Nr. 74R.

Nr. 76



MAGIRUS 310 D 16 F S
LU 11057, Chassis Nr. 470.0021.376
AUFLIEGER LANZ + MARTI, Sursee, 1978
LU 13509, Chassis Nr. 18929-2

Bereifung:

A 1 : Michelin Radial
11 R 20 X, einfach

A 2 : Michelin Radial
11.00 - 20 X, doppelt

A3,A4,A5 : Michelin F-20 Pilote X
14/80 R 20, einfach

Federung :

A 1 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder
Stossdämpfer

A 2 : Einstufige Blattfeder
Gummi-Hohlfeder

A3,A4,A5 : Parabelfedern (3 offene Blätter, 1 Zusatzblatt)
(Ausgleichsachsen)
Hinterste Achse gelenkt

Nutzlast:

5 Betonplatten 1.7 x 1.5 x 0.3 m

8 Betonwürfel 0.75 x 0.75 x 0.78 m

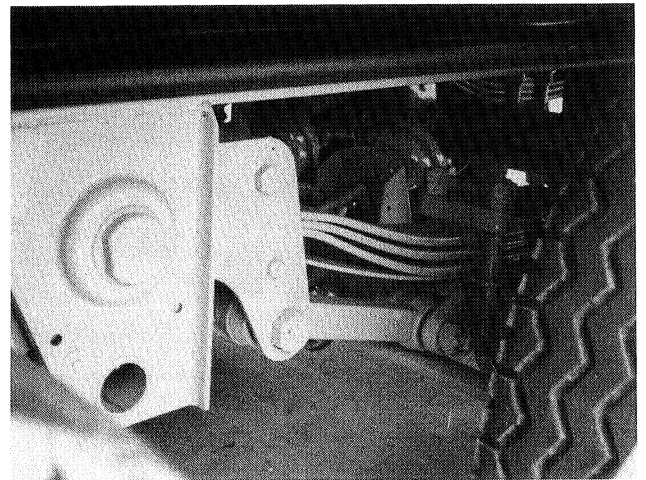
2 Betonwürfel 1.4 x 0.8 x 0.6 m

$$5 \times 20\text{kN} + 8 \times 10\text{kN} + 2 \times 16\text{kN} = 212\text{kN}$$

Achslasten beladen :

- Baar (A)

A 1 :	51.0 kN	
A 2 :	105.0 kN	
A 3 :	85.0 kN	} 364.0 kN
A 4 :	36.5 kN	
A 5 :	86.5 kN	



Detail der Aufhängung der Aufliegerachsen

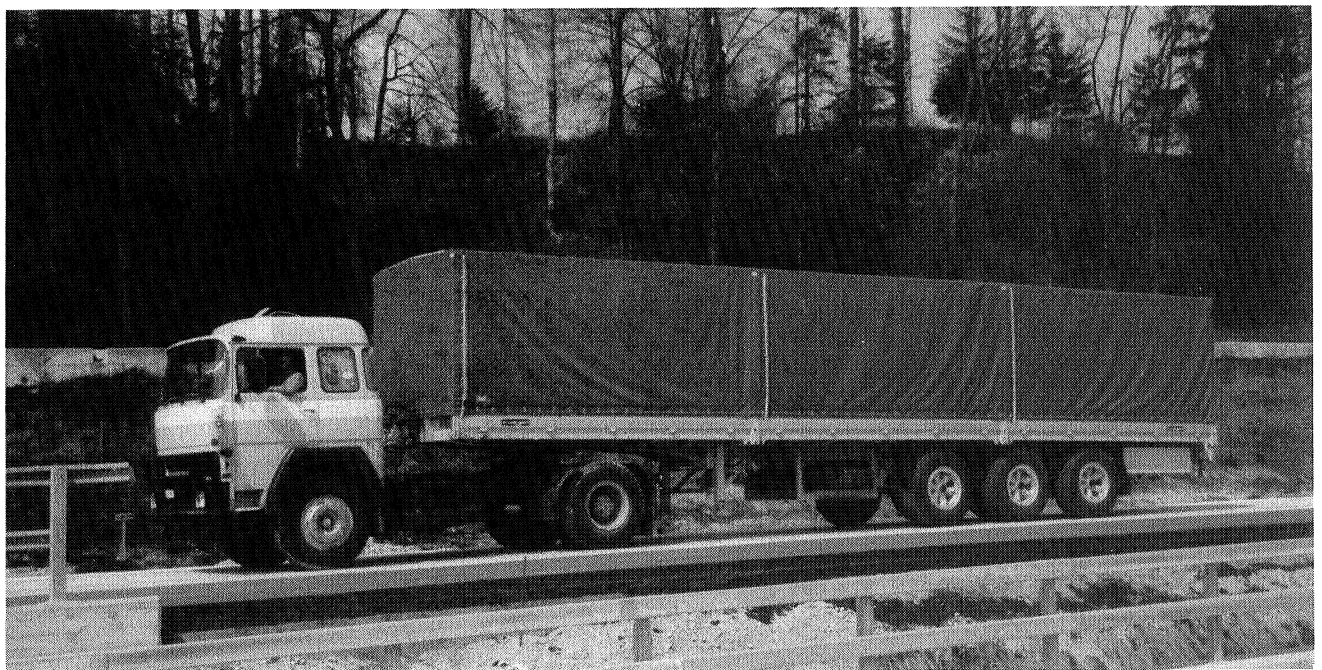
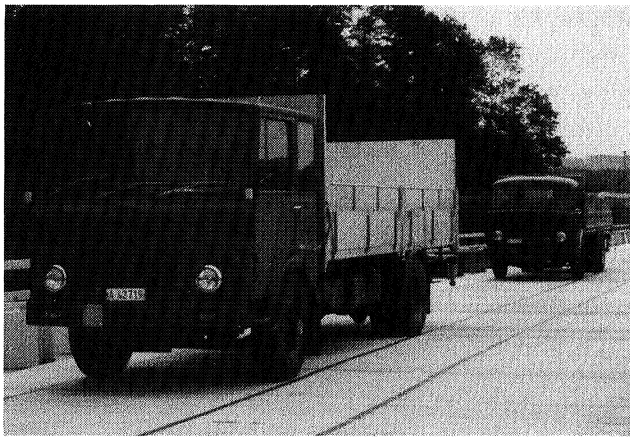


Bild 24: Das Versuchsfahrzeug Nr. 76R.



2 LH $\boxed{12} \rightarrow \boxed{14} \rightarrow A$



4 MH

$\boxed{14} \rightarrow \boxed{25A} \rightarrow \boxed{12} \rightarrow \boxed{24} \rightarrow A$



2 MH $\boxed{25A} \rightarrow \boxed{24} \rightarrow A$



4 MN $\boxed{14} \rightarrow \boxed{24} \rightarrow K$
 $\boxed{12} \rightarrow \boxed{25A} \rightarrow A$

Bild 26: Fahrten mit vier Fahrzeugen gleichzeitig: Formationen und entsprechende Codes.



2 MN $\boxed{24} \rightarrow K$
 $\boxed{25A} \rightarrow A$

Bild 25: Fahrten mit zwei Fahrzeugen gleichzeitig: Formationen und entsprechende Codes.

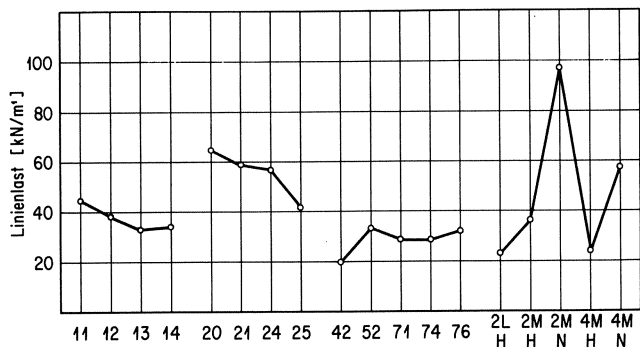


Bild 27: Gewicht der Versuchsfahrzeuge pro Laufmeter zwischen der vordersten und der hintersten Achse (Linienlast).

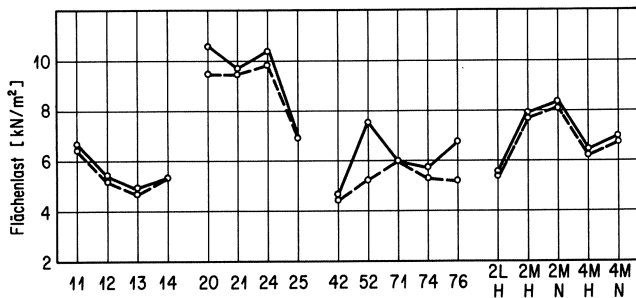


Bild 28: Fahrzeuggewicht pro Quadratmeter einer 3.5 m breiten Fahrspur, berechnet über die gesamte Fahrzeuglänge (Flächenlast). Gestrichelt: Reduziert auf das gesetzlich zulässige Gesamtgewicht.

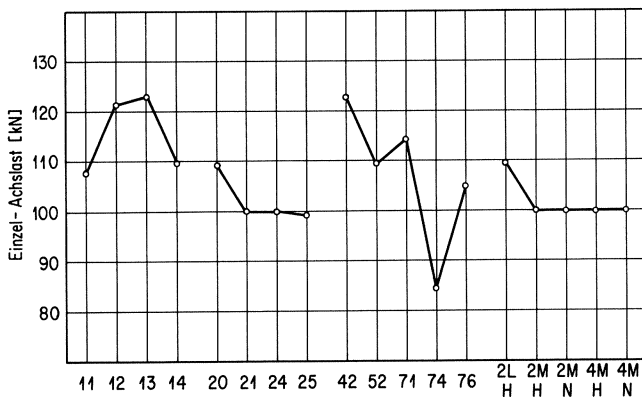


Bild 29: Maximale Einzelachslast der Versuchsfahrzeuge.

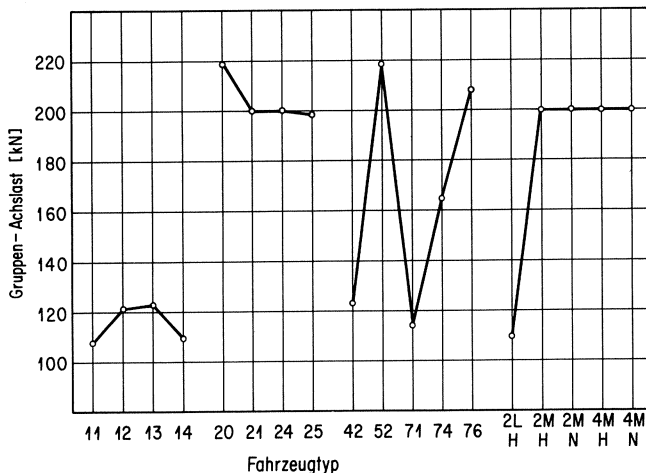


Bild 30: Maximale Gruppenachslast der Versuchsfahrzeuge.

2.22 Kennlinien der Reifen- und Aufbaufedern

Es war vorgesehen, die Reifen der zweiachsigen Versuchsfahrzeuge als Messfedern für die Bestimmung der dynamischen Radlasten zu benutzen (s. Abschnitt 2.3, "Das dynamische Uebertragungsverhalten von zweiachsigen Solofahrzeugen"). Von allen 2D-Fahrzeugen inklusive des Anhängers Nr. 10 wurde deshalb die Kraft/Verformungs-Kennlinie jedes Rades bzw. Zwillingsrades sorgfältig bestimmt. Die Bilder 31 und 32 zeigen das Fahrzeug Nr. 11 in der zu diesem Zweck in der EMPA aufgebauten Versuchseinrichtung.

Die Kraft wurde mit einem Druck- bzw. mit zwei Zugzylindern in Stufen von rund 1.5 kN bis 3.5 kN pro belastetes Rad aufgebracht und mit zwischen Reifen und Hallenboden angeordneten Kraftmessdosen gemessen. Im Bereich zwischen Null und der durch die Schwerkraft erzeugten Radlast gelangte der jeweils auf die Fahrzeugachse einwirkende Druckzylinder zum Einsatz (Bild 32). Mit Hilfe der zwei seitlich des Fahrzeuges angeordneten, über ein Joch miteinander verbundenen und im Hallenboden verankerten Zugzylinder wurde anschliessend eine Kraft von maximal rund 45 kN pro belastetes Rad erzeugt (Bild 31). Für Hinterachsen konnten so etwa 150% des unter statischen Bedingungen für Einzelachsen gesetzlich zulässigen Wertes von 120 kN erreicht werden. Die Einleitung noch grösserer Kräfte mit der beschriebenen Versuchseinrichtung erschien für das Fahrzeug als zu gefährlich.

Die Bestimmung der vertikalen Reifendeformation erfolgte mit Hilfe einer pro Rad oder Zwillingsrad angeordneten mechanischen Uhr (Bild 32).

Leider wurde die Gelegenheit nicht benützt, um gleichzeitig auch die Kennlinien der Blattfedern exakt auszumessen. Zumindest für die Erfassung im Kraftbereich zwischen Eigengewichts- und Maximalwert hätte es genügt, zwei weitere Uhren am Fahrzeug anzubringen und abzulesen. Dass die Kennlinien der Aufbaufederung von Zweiachsern recht unterschiedlich sein können, wurde erst anlässlich der im nächsten Abschnitt beschriebenen Ulmer Versuche klar. Da diese Ulmer Versuche und die Bestimmung der Reifenfederkennlinien an der EMPA für die Fahrzeuge Nr. 10 bis 13 gleichzeitig, im August 1977, stattfanden, kam die erwähnte Erkenntnis zu spät, um noch in die EMPA-Versuche einfließen zu können.

Es wurde deshalb als notwendig erachtet, von der Firma Saurer ausser den theoretischen auch experimentelle Kennlinien der Aufbaufederungen der Fahrzeuge Nr. 10 bis 13 anzufordern. Die entsprechenden Messungen fanden im September 1977 in Arbon statt, wobei die Last aber nur in relativ grossen Stufen variiert werden konnte. Die experimentellen Kennlinien der Aufbaufedern sind deshalb weniger exakt als diejenigen der Reifenfedern. Diese Aussage trifft nicht auf das radial bereifte Fahrzeug 14R zu, dessen Reifen- und Aufbaufeder-Kennlinien erst nach den Deibüel-Versuchen im Dezember 1978 an der EMPA in der oben angedeuteten Art und Weise ausgemessen wurden.

Sämtliche Kennlinien sind im Bericht [19] enthalten. Als Illustration zum Deformationsverhalten von Lastwagenreifen sind in den Bildern 33 bis 40 die Kennlinien des Fahrzeuges 11R sowohl für die einzeln bereiften Vorderräder als auch für die hinteren Zwillingsräder für einen Reifendruck von 6 bar dargestellt. Es ist festzustellen, dass diese Reifen eine nichtlineare Kennlinie und auch eine gewisse Hysterese aufweisen. Die Abweichungen in den Kennlinien zweier vergleichbarer Reifen sind sehr gering (Bilder 35 und 39). Die Bilder 36 und 40 vermitteln einen Eindruck vom Einfluss des Luftdruckes auf die Reifensteifigkeit. Auch hier ist keine Linearität zwischen den beiden Grössen festzustellen.

Für die weitere Verwendung der Kennlinien musste realistischerweise darauf verzichtet werden, den Einfluss der mit offenbar vorhandener Coulomb-Reibung verbundenen Hysterese zu berücksichtigen. Mit Hilfe eines entsprechenden Computerprogrammes wurde für jedes Rad bzw. Zwillingsrad ein Polynom durch die einen ganzen Lastzyklus umfassenden Messpunkte gelegt. Für die Kurve "Kraft = $f(\text{Deformation})$ ", abgekürzt als RFK = "Reifenfederkennlinie" bezeichnet, ergab eine Optimierungsstudie ein Polynom vierten Grades (z.B. Bild 33).

Während die RFK später als Basis für die Umrechnung der gemessenen Reifendeformation in die Radlast dienen sollte und deshalb für den gesamten Lastbereich exakt definiert sein musste, genügte es, die Kurven "Deformation = $f(\text{Kraft})$ " = IRFK = "Inverse Reifenfederkennlinie" nur im Bereich der Radlasten des beladenen, ruhenden Fahrzeuges zu bestimmen. Dafür lieferte ein Polynom zweiten Grades genügend exakte Resultate (Bilder 41 bis 44). Für allfällige Modellrechnungen ist

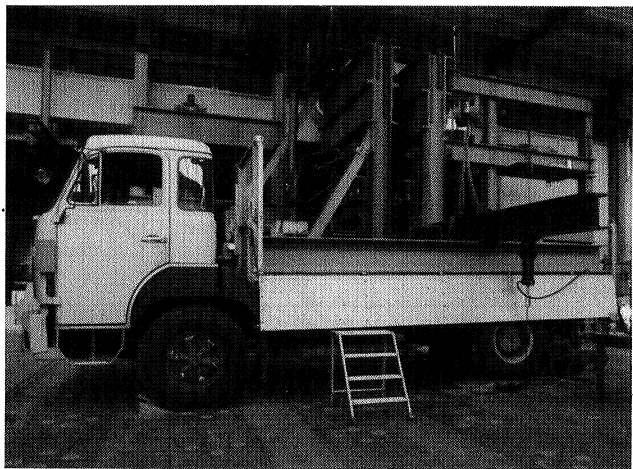


Bild 31: Versuchseinrichtung an der EMPA zur Bestimmung der Reifenfederkennlinien.

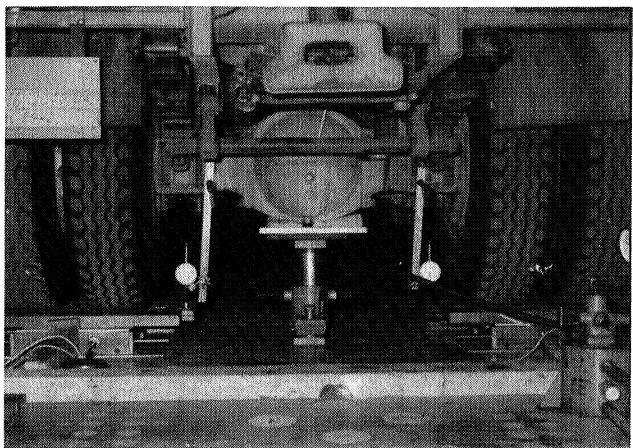


Bild 32: Details der Vorrichtung zur Messung von Radlast und Reifeneinfederung.

es interessant, einen approximativen Wert für die Steifigkeit k_1 der Reifenfeder in kN/mm zu kennen. In Bild 45 sind deshalb die k_1 -Werte für die untersuchten Reifen zusammengestellt. Der Kraftbereich, innerhalb dessen die Linearisierung der Kennlinien erfolgte, ist jeweils angegeben. Weitere auf den statischen Arbeitspunkt der Reifenfedern bezogene Kennwerte enthält Bild 48.

Sowohl die theoretischen als auch die experimentell bestimmten Kennlinien der Aufbaufedern der Fahrzeuge Nr. 10 bis 14 sind in den Bildern 46 und 47 dargestellt. Auch diese Kennlinien sind nichtlinear, wobei hier im Gegensatz zu den Reifen die Krümmung für kleine Lasten vernachlässigbar ist, dann aber mit steigender Last zunimmt, d.h. die Blattfedern werden mit steigender Last härter. Die Hysterese ist den Erwartungen entsprechend beachtlich. Die Dämpfungswirkung von Blattfedern beruht praktisch ausschliesslich auf Coulomb-Reibung.

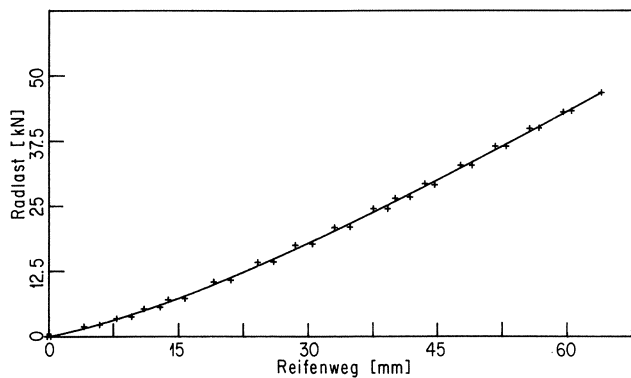


Bild 33: RFK: Fahrzeug 11R, vorne links, 6 bar Reifendruck.

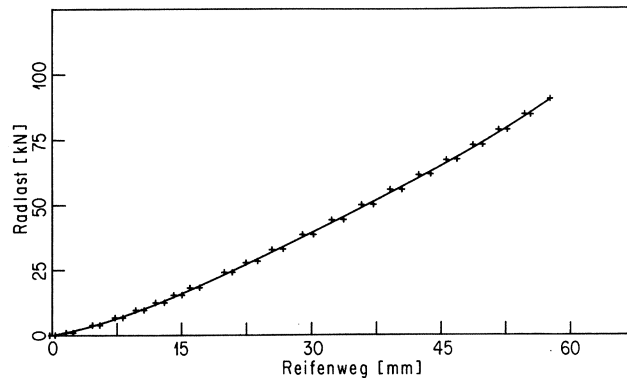


Bild 37: RFK: Fahrzeug 11R, hinten links, 6 bar Reifendruck.

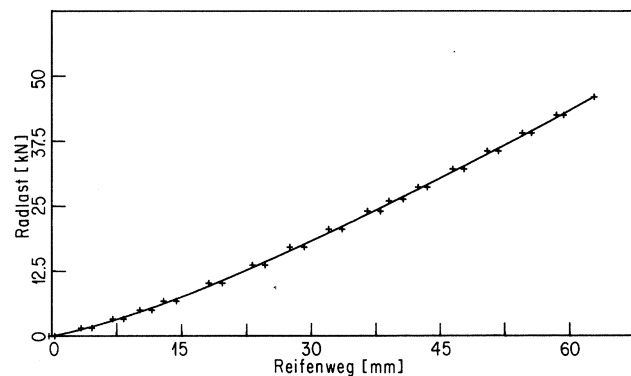


Bild 34: RFK: Fahrzeug 11R, vorne rechts, 6 bar Reifendruck.

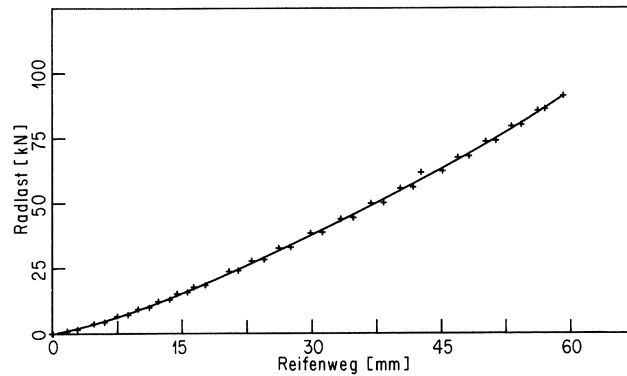


Bild 38: RFK: Fahrzeug 11R, hinten rechts, 6 bar Reifendruck.

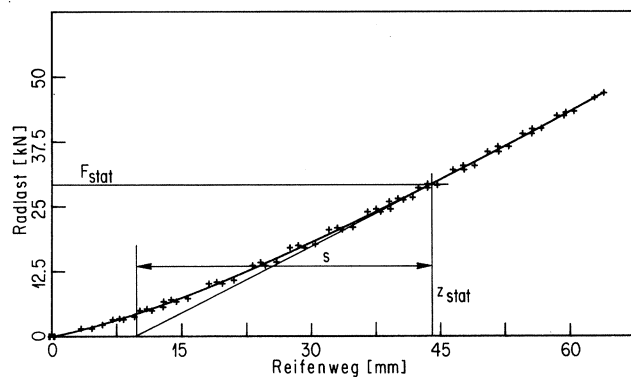


Bild 35: RFK: Fahrzeug 11R, vorne, 6 bar Reifendruck. Zusätzlich ist die Bedeutung der Subtangente s eingetragen.

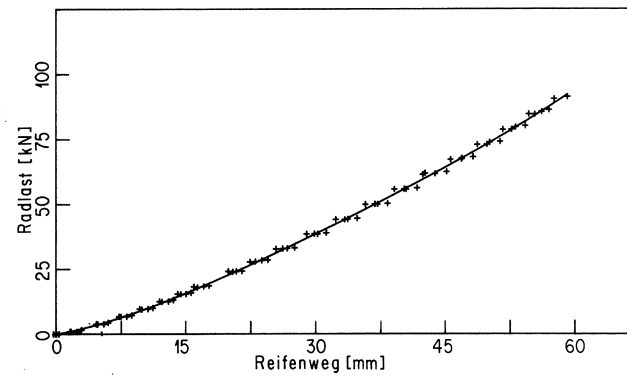


Bild 39: RFK: Fahrzeug 11R, hinten, 6 bar Reifendruck.

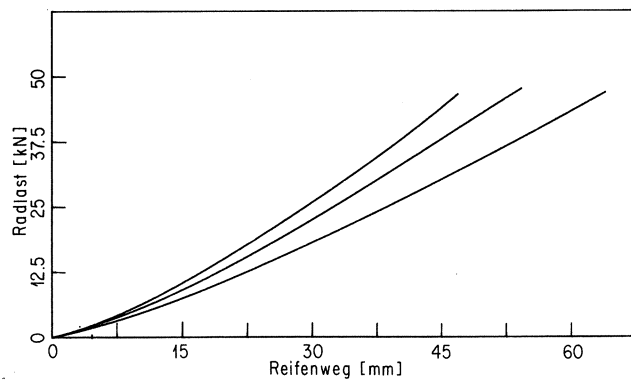


Bild 36: RFK: Fahrzeug 11R, vorne, Reifendruck 6/8/10 bar.

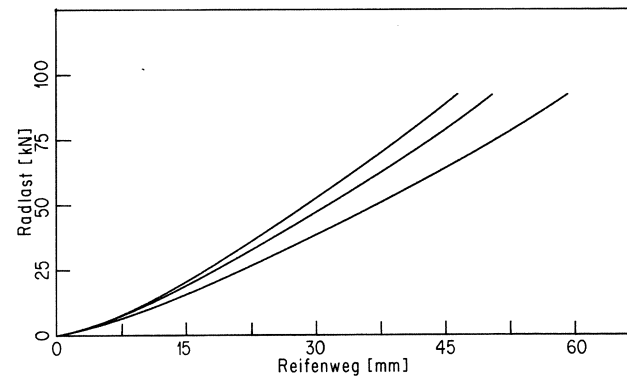


Bild 40: RFK: Fahrzeug 11R, hinten, Reifendruck 6/8/10 bar.

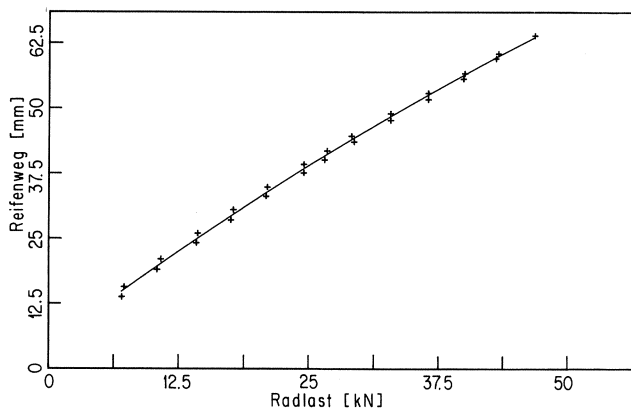


Bild 41: IRFK: Fahrzeug 11R, vorne links, 6 bar Reifendruck.

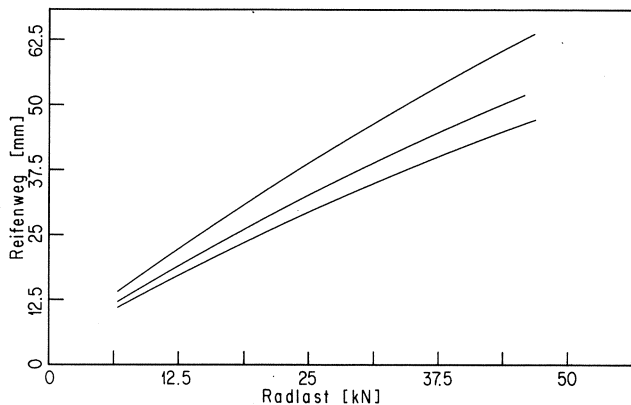


Bild 42: IRFK: Fahrzeug 11R, vorne, Reifendruck 6/8/10 bar.

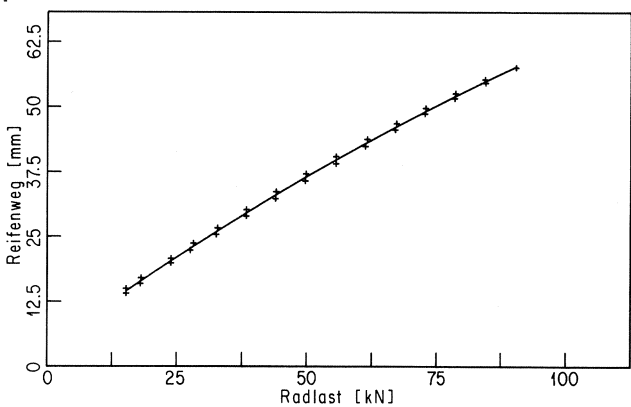


Bild 43: IRFK: Fahrzeug 11R, hinten links, 6 bar Reifendruck.

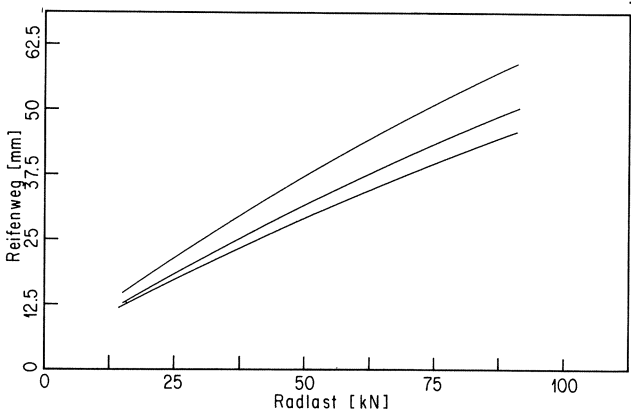


Bild 44: IRFK: Fahrzeug 11R, hinten, Reifendruck 6/8/10 bar.

Es fällt auf, dass das Fahrzeug Nr. 13 mit ausgesprochen harten vorderen Federn ausgerüstet war. Bei diesem Fahrzeug handelte es sich um eine spezielle Version, die für den Export nach Südamerika bzw. für die Entwicklung zu exportierender Fahrzeuge bestimmt war. Diese Tatsache kam jedoch erst ans Licht, nachdem anlässlich der bereits erwähnten Ulmer Versuche festgestellt worden war, dass die Federung der Hinterachse von Nr. 13 aussergewöhnlich hart war. In der Folge wurde es jedoch unterlassen, ausser den hinteren auch die vorderen Federn durch in Westeuropa gebräuchliche Modelle zu ersetzen.

In Bild 48 sind die experimentell bestimmten mittleren Steifigkeiten k_2 der Aufbaufedern in kN/mm zusammengestellt. Diese Werte gelten für den Kraftbereich um die für die vollbeladenen, ruhenden Fahrzeuge gültigen Werte. Da für die IRFK und die RFK Bestimmungsgleichungen zur Verfügung standen, konnten auf einfache Weise aus der ersteren die statische Reifeneinfederung und aus der zweiten die für diesen Punkt gültige Tangente an die RFK und damit k_1 und die Subtangente s berechnet werden. Die Bedeutung der Subtangente s ist in Bild 35 eingezeichnet [20]. Bild 48 liefert demnach die für den statischen Arbeitspunkt gültigen Federsteifigkeiten k_1 und k_2 aller eingesetzten 2D-Fahrzeuge.

Reifentyp	Druck [bar]	Einfach bereift (10 - 45 kN)	Doppelt bereift (30 - 90 kN)
Goodyear R (je 6 Werte)	10	1.11 ± 0.03	2.36 ± 0.04
	8	0.99 ± 0.01	2.09 ± 0.06
	6	0.82 ± 0.01	1.78 ± 0.04
Firestone R (je 2 Werte)	10	1.13	2.55
	8	0.98	2.28
	6	0.81	1.80
Firestone D (je 2 Werte)	8.5	1.52	2.97
	7	1.35	2.59
	5.5	1.20	2.13

Goodyear R, einfach bereift: Goodyear Unisteel II, G 18, radial
11.00 R 20, 16 Ply

doppelt bereift: Goodyear Unisteel II, G 19, S&G, 11.00 R 20, 16 Ply

Firestone R, beide Fälle : Firestone Transport 2000, radial
11.00 R 20, 16 P.R.

Firestone D, einfach bereift: Firestone Super Transport, diagonal
11.00 - 20, M Ply

doppelt bereift: Firestone I + C,
11.00 - 20, 16 Ply

Bild 45: Mittlere Reifenfederkonstanten k_1 in kN/mm.

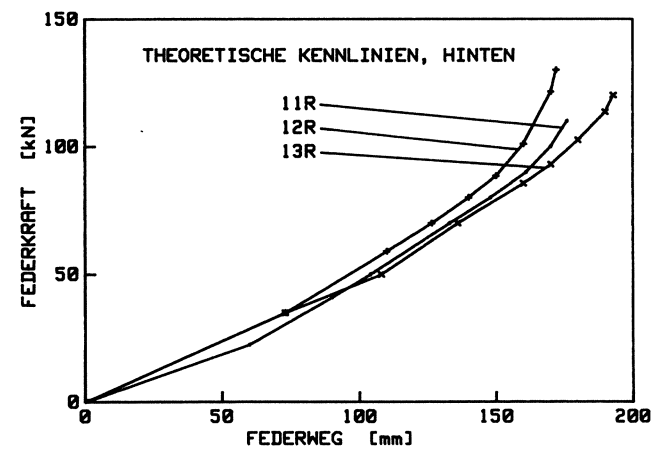
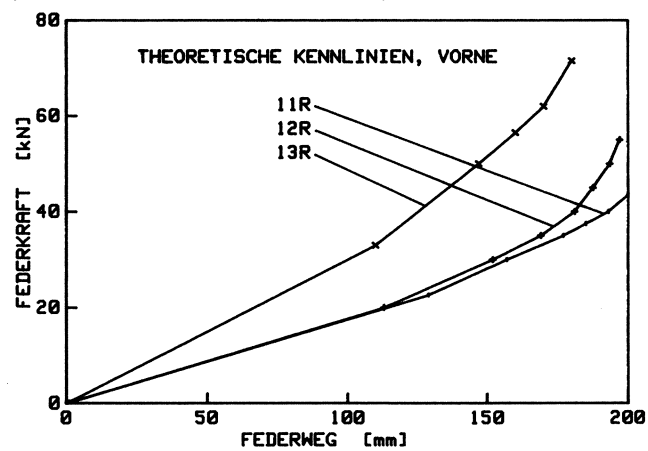
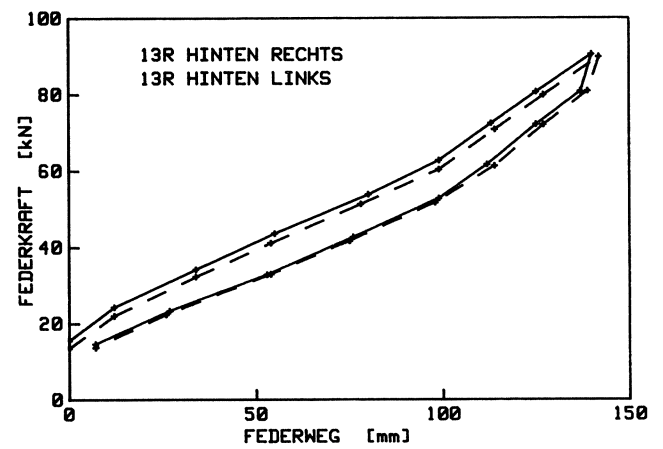
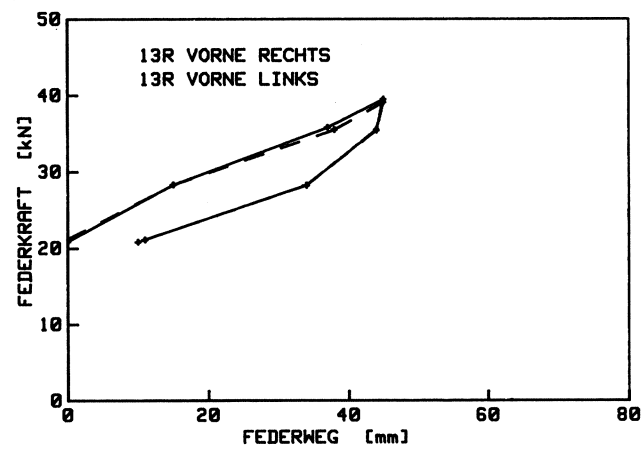
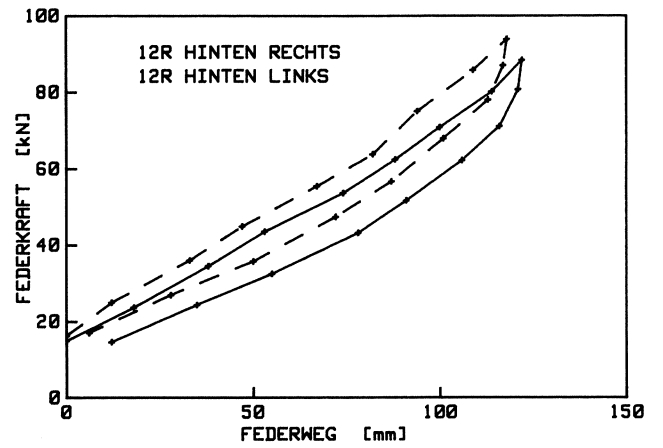
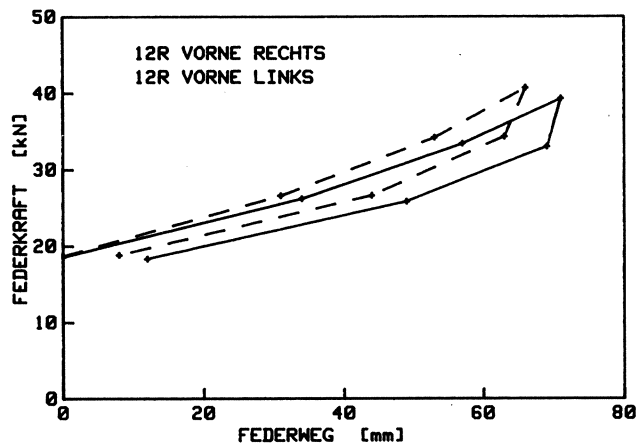
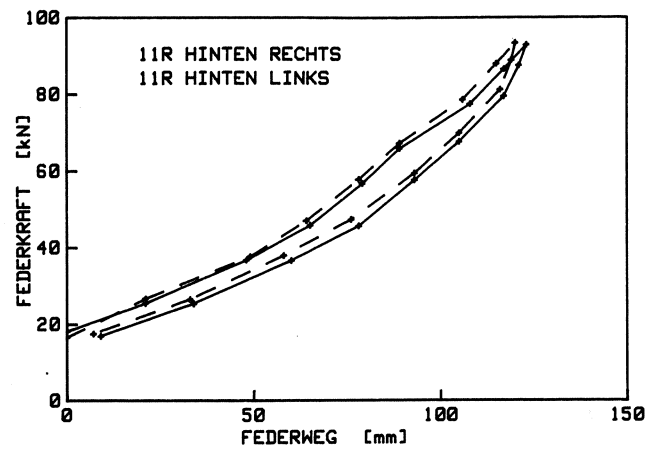
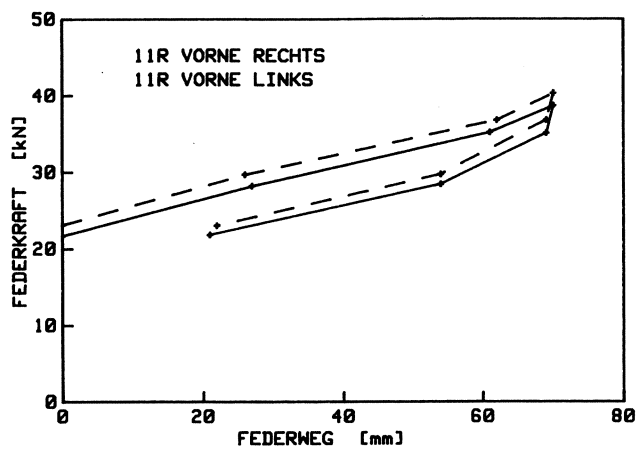


Bild 46: Kennlinien der Aufbaufedern der Fahrzeuge Nr. 11R, 12R und 13R.

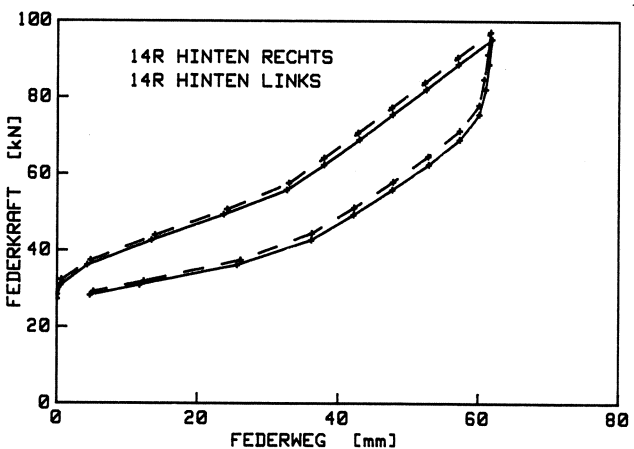
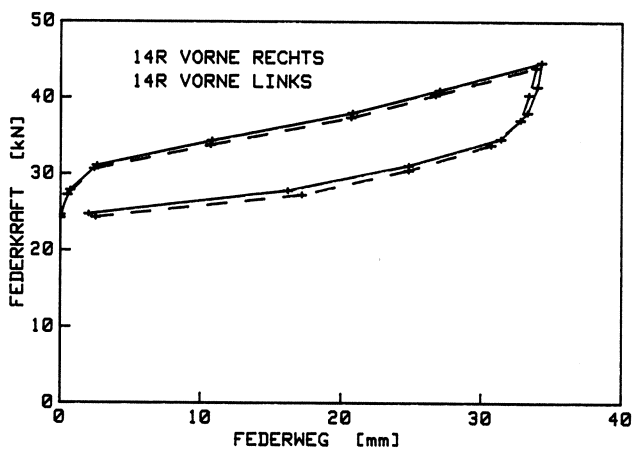
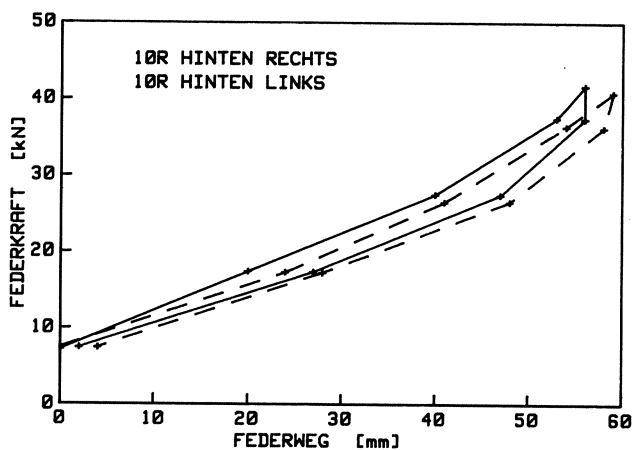
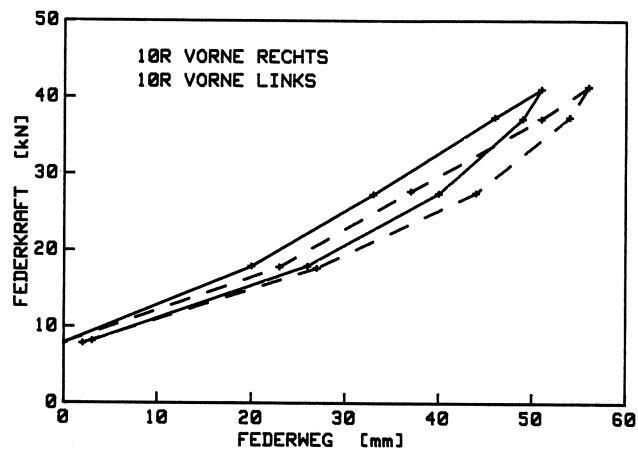


Bild 47: Kennlinien der Aufbaufedern der Fahrzeuge Nr. 10R und 14R.

Fahrzeug	p [bar]	Radlast [kN]	k ₂ [kN/mm]	k ₁ [kN/mm]	s [mm]
10R V1	6	29.60	0.830	0.836	35.5
	8			1.035	28.8
	10			1.149	25.8
10R V2	6	32.00	0.819	0.847	37.9
	8			1.043	30.9
	10			1.172	27.4
11R V	6	29.20	0.241	0.834	35.1
	8			1.033	28.4
	10			1.145	25.6
12R V	6	21.80	0.215	0.803	27.2
	8			0.966	22.6
	10			1.071	20.4
13R V	6	22.00	0.386	0.802	27.4
	8			0.977	22.5
	10			1.080	20.4
14R V	6	25.30	0.182	0.804	31.6
	8			0.965	26.3
	10			1.122	22.6
14D V	5.5	25.30	0.182	1.198	21.1
	7			1.394	18.2
	8.5			1.532	16.6
11R H	6	53.85	0.769	1.721	31.4
	8			2.031	26.6
	10			2.285	23.7
12R H	6	60.70	0.735	1.725	35.2
	8			2.074	29.4
	10			2.362	25.8
13R H	6	61.40	0.706	1.705	36.0
	8			1.999	30.8
	10			2.282	26.9
14R H	6	54.80	0.719	1.738	31.6
	8			2.203	25.0
	10			2.473	22.3
14D H	5.5	54.80	0.719	2.089	26.5
	7			2.618	21.0
	8.5			3.003	19.1

p = Reifendruck

Bild 48: Zusammenstellung der mittleren Federsteifigkeiten k_1 (Reifen) und k_2 (Aufbau) sowie der Subtangente s der Reifenfedern. Die Werte gelten für den statischen Arbeitspunkt der Federung eines Rades (V) bzw. Zwillingsrades (H) der beladenen Fahrzeuge.

2.3 Das dynamische Uebertragungsverhalten von zweiachsigen Solofahrzeugen

2.31 Theoretische Grundlagen

Die Theorie der Dynamik von Kraftfahrzeugen wird von Mitschke in [20] eingehend behandelt. Die folgenden Angaben, die sich auf das absolut Notwendigste beschränken, stützen sich auf den Band B der 2. Auflage dieses Standardwerkes ab.

Ein Strassenfahrzeug ist ein mechanisches, schwingungsfähiges System mit einer beträchtlichen Anzahl von Freiheitsgraden. Es geht hier darum, ein Modell für einen zweiachsigen Lastwagen zu finden, das einerseits möglichst wenig Freiheitsgrade aufweist und demzufolge übersichtlich ist. Andererseits soll aber das Modell die beim Befahren einer unebenen Oberfläche auftretenden Radlasten möglichst wirklichkeitsgetreu wiedergeben können.

In Bild 49 sind ein vierrädriges Fahrzeug und sein räumliches mechanisches Modell dargestellt. Das globale, rechtwinklige Koordinatensystem ist durch die drei Achsen x , in Fahrtrichtung zeigend = Längsachse, y , seitlich zeigend = Querachse, und z , senkrecht nach oben zeigend = Hochachse, definiert. Der Aufbau des Fahrzeuges mit der Masse m_2 und den Massenträgheitsmomenten um die Querachse I_{2y} , um die Längsachse I_{2x} und um die Hochachse I_{2z} stützt sich über vier Federn mit den zugehörigen Dämpfern auf die Räder ab. Die Räder haben die Masse m_1 . Sie stützen sich über die Reifenfedern und -dämpfer auf die unebene Fahrbahn ab.

Für die Freiheitsgrade des Aufbaus, bezogen auf ein in seinem Schwerpunkt angreifendes lokales Koordinatensystem x_2, y_2, z_2 werden folgende Bezeichnungen verwendet:

- Translation z_2 : Hubbewegung
- Translation y_2 : Querbewegung, Seitenbewegung
- Rotation φ_2 um y_2 : Nickbewegung
- Rotation κ_2 um x_2 : Wankbewegung
- Rotation ψ_2 um z_2 : Gierbewegung

Bei Fahrt über eine unebene Strasse führen die Räder hauptsächlich Bewegungen in z_1 -Richtung aus. Bei Fahrzeugen mit Starrachsen, dazu gehören die hier zu untersuchenden Zweiachser, sind die Bewegungen der durch eine Achse verbundenen Räder nicht unabhängig voneinander (Bild 50). Die Frei-

heitsgrade der Achse sind hier die Hubbewegung, eine Translation z_{1i} , bezogen auf den Schwerpunkt der Achse i , und die Wankbewegung κ_{1i} , eine Rotation um eine durch das Momentanzentrum MZ_i gehende Achse in x -Richtung, die auch als Trampelbewegung bezeichnet wird. Die Bewegungen der Räder leiten sich aus diesen Achsbewegungen ab.

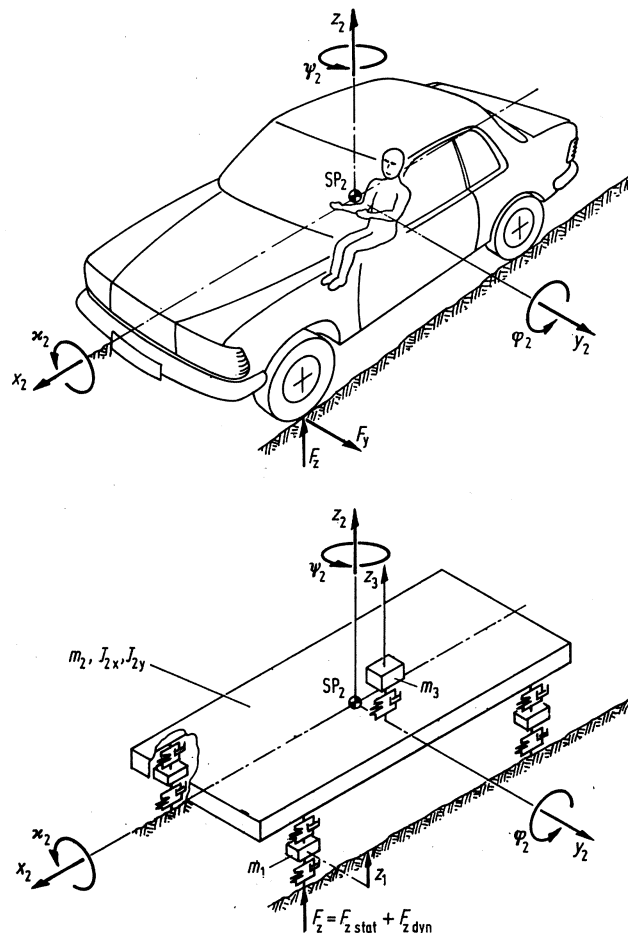


Bild 49: Vierrädriges Fahrzeug (oben) und ein einfaches, dreidimensionales mechanisches Modell (unten, aus [20]).

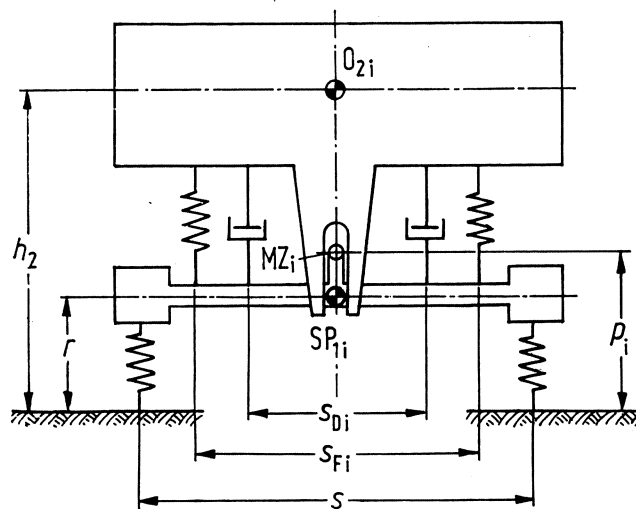


Bild 50: Mechanisches Modell einer Starrachse (aus [20]).

Das einfache räumliche Modell nach Bild 49 weist bereits neun Freiheitsgrade auf: Fünf für den Aufbau und vier für die einzeln aufgehängten oder durch eine Starrachse miteinander verbundenen Räder. Die Frage muss jedoch gestellt werden, ob die Modellierung des Aufbaus und der Achsen als starre Einzelmassen gerechtfertigt ist. Für die tiefste Biege-Eigenschwingung eines Lastwagenchassis gibt Mitschke in [20] Frequenzen von $f > 6$ Hz an. Da sich der für dynamische Radlasten massgebende Frequenzbereich bis mindestens $f = 20$ Hz erstreckt, muss damit gerechnet werden, dass die Vernachlässigung dieses Freiheitsgrades nicht ohne Konsequenzen bleiben wird. In welchem Rahmen sich diese Konsequenzen bewegen, wird bei der Besprechung der Messresultate zu diskutieren sein. Die Biegeschwingungen von Starrachsen - Mitschke gibt für Personenwagen $f = 40$ Hz an - dürfen dagegen wohl ohne Bedenken vernachlässigt werden.

Hier soll nun aber versucht werden, die Freiheitsgrade des Modelles weiter zu reduzieren. Dazu wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug um seine Längsachse x_2 symmetrisch aufgebaut sei. Bei reiner Hubanregung, d.h. wenn die Unebenheiten am rechten und am linken Rad einer Achse gleich sind, führt der Aufbau keine Wank- und Seitenschwingungen aus, sondern nur Hub- und Nickbewegungen. Die Bewegungen der Starrachse beschränken sich auf Hubschwingungen. Umgekehrt führt eine reine Wankanregung, d.h. wenn die Unebenheiten rechts und links gleich gross, aber einander entgegen gerichtet sind, zu reinen Wank- und Seitenschwingungen des Aufbaus und zu reinen Trampelbewegungen der Starrachse.

Mitschke zeigt in [20], dass sich die wirklichen Strassenunebenheiten in reine Hub- und Wankanregungen aufteilen lassen, so dass das Fahrzeugmodell in zwei entkoppelte Modelle, je eines für die Hub/Nickbewegung und eines für die Wank/Seitenbewegung, aufgeteilt werden kann. Bei der Herstellung des Fahrbahnbelages im Bereich der Deibüel-Brücke wurde darauf geachtet, dass die Unebenheiten möglichst reine Hubanregungen erzeugten (s. Abschnitt 2.7, "Der Versuchsbelag").

Bei reiner Hubanregung kann das räumliche Fahrzeugmodell durch ein ebenes ersetzt werden (Bild 51a). Eine weitere Vereinfachung ergibt sich, wenn die Aufbaumasse m_2 in drei Punktmassen m_{2v} und m_{2h} über den Achsen und die sogenannte Koppelmasse m_k im Aufbauswerpunkt aufgeteilt wird (Bild 51b).

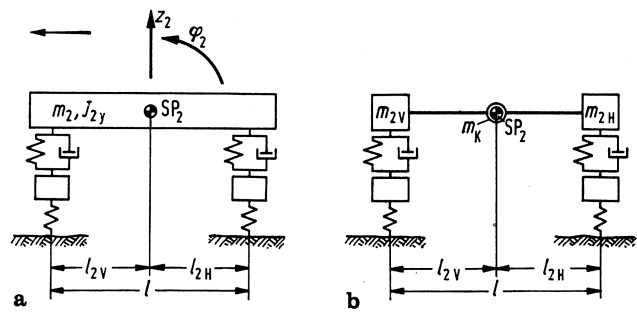


Bild 51: Ebene mechanische Modelle eines zweiachsigen Fahrzeuges (aus [20]).

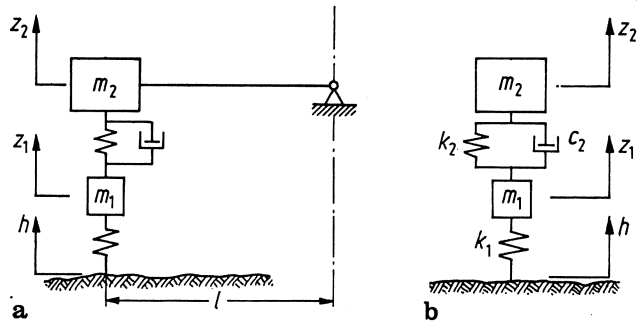


Bild 52: Ebenes mechanisches Modell eines Zweiachsers mit $m_k = 0$ (links) und ein entsprechendes eindimensionales Modell (rechts, aus [20]).

Im Spezialfall $m_k = 0$ sind die Bewegungen der Massen m_{2v} und m_{2h} über der vorderen und der hinteren Achse voneinander unabhängig. Regt man zum Beispiel die Vorderräder des Fahrzeuges an, bewegt sich die Masse m_{2v} , nicht aber m_{2h} . Die Koordinate für die Bewegung von m_{2i} wird dabei zweckmässig in den Schwerpunkt dieser Masse verlegt (Bild 52a). Während dieser Spezialfall für Personenwagen häufig näherungsweise zutrifft, ist die Koppelmasse von Lastwagen, vor allem auch abhängig von Masse und Anordnung der Nutzlast, meistens von Null verschieden.

Trotzdem soll nun auch noch das einfachste Modell, an dem immer noch vernünftige Überlegungen bezüglich der dynamischen Radlasten von Lastwagen angestellt werden können, erwähnt werden. Nimmt man den Abstand einer Achse i zum Schwerpunkt des Aufbaus als genügend gross an, bewegen sich die Massen m_{1i} und m_{2i} nur noch vertikal, und man hat ein Modell mit lediglich noch zwei Freiheitsgraden z_{1i} und z_{2i} (Bild 52b). Bei der Festlegung der Grösse der Massen m_1 und m_2 (der Index i für die Achse kann jetzt weggelassen werden) ist zu berücksichtigen, dass die Verhältnisse für ein Rad, d.h. für ein Viertel des Fahrzeuges, betrachtet werden. Die Kennlinien der Federn k_1 und k_2 seien linear, und sowohl die Reifen- als

auch die Aufbaudämpfung werden als geschwindigkeitsproportional angenommen. Zumindest die Annahme bezüglich der Aufbaudämpfung ist sicher weit entfernt von der Wirklichkeit. Es wird sich zeigen, inwiefern auch die Annahme, die Aufbaufeder sei linear, vertretbar ist.

Entkoppelt man den Zweimassenschwinger gemäss Bild 52b und vernachlässigt den Einfluss der Dämpfung, ergeben sich seine beiden Eigenkreisfrequenzen, die Aufbaueigenfrequenz ν_2 und die Achseigenfrequenz ν_1 (auch als Radeigenfrequenz bezeichnet) zu

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \text{ und } \nu_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$$

Letztlich interessieren wir uns für die dynamischen Radlasten F_z , die ein zweiachsiger Lastwagen während der Fahrt auf einer unebenen Oberfläche auf seine Unterlage ausübt. Der entsprechende Vorgang kann einfach schematisch wie folgt dargestellt werden:

$$h(t) \rightarrow \boxed{H(j\omega)} \rightarrow F_z(t)$$

Da die Fahrbahn nicht eben ist, wirkt während der Fahrt eine zeitabhängige Erregerfunktion $h(t)$ auf die Räder des Fahrzeuges ein. Das Fahrzeug verarbeitet diese Erregung entsprechend seiner komplexen, frequenzabhängigen Übertragungsfunktion $H(j\omega)$, und es werden dynamische Radlasten $F_z(t)$ erzeugt.

Grundsätzlich wäre es möglich, bei bekannten $H(j\omega)$ und $h(t)$ die Radlasten $F_z(t)$ zu berechnen. Einerseits handelt es sich bei der Erregerfunktion $h(t)$ jedoch im allgemeinen nicht um eine deterministische, sondern um eine stochastische Funktion der Zeit, d.h. sie ist nicht explizit bekannt, sondern nur ihre statistischen Kennwerte. Andererseits ist man in der Fahrzeugtechnik nicht am expliziten Verlauf der Radlast $F_z(t)$ interessiert, sondern ebenfalls nur an ihren, nach dem Abklingen des Einschwingvorganges gültigen, statistischen Kennwerten.

Dies hat dazu geführt, dass in der Theorie der Fahrzeugtechnik auf die Kenntnis der Phasenbeziehungen zwischen Anregung und Reaktion verzichtet wird. Die Übertragungsfunktion wird deshalb nicht, wie in der in der allgemeinen Strukturmechanik üblich, in der komplexen Form $H(j\omega)$, sondern in der reellen Form $V(\omega)$ verwendet und als (frequenzabhängige) Vergrösserungsfunktion bezeichnet. Diese Theorie liefert damit einen

recht übersichtlichen Zusammenhang zwischen Erregung und Reaktion, d.h. zwischen Fahrbahnunebenheiten h und Radlastschwankung F_z .

Formal lässt sich dieser in Bild 53 grafisch dargestellte Zusammenhang wie folgt ausdrücken:

$$\Phi_h(\omega) = \frac{1}{v} \Phi_h(\Omega) \quad (1)$$

$$\Phi_{F_z}(\omega) = V^2(\omega) \cdot \Phi_h(\omega) \quad (2)$$

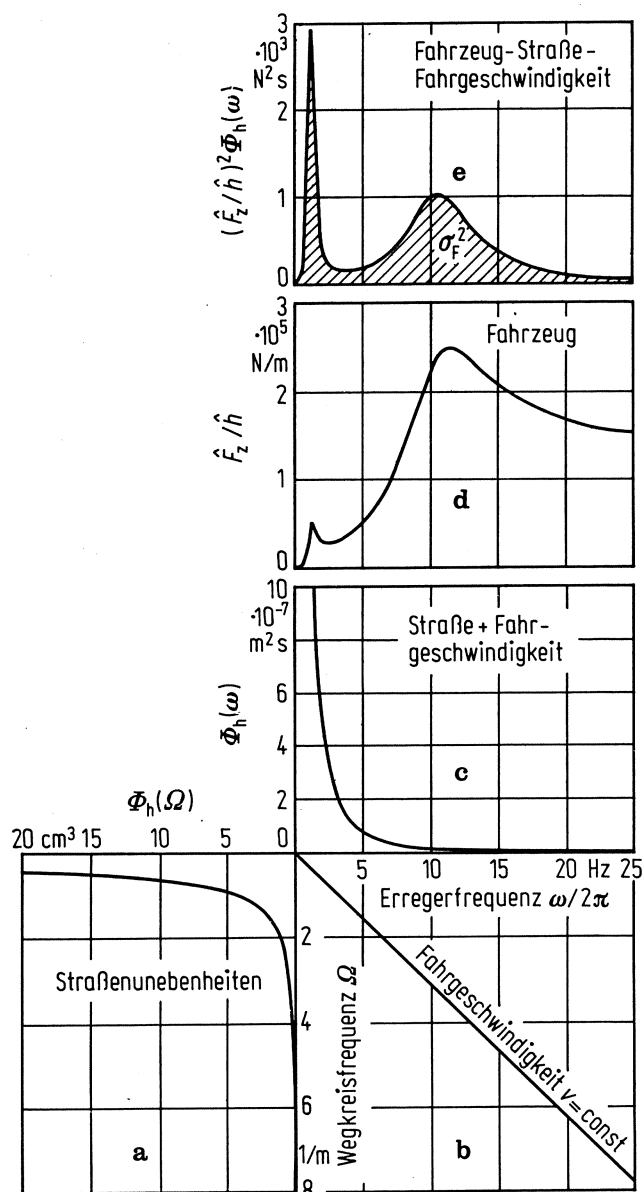


Bild 53: Ermittlung der Standardabweichung der dynamischen Radlast:
a) bis c): Zusammenhang zwischen den weg- und zeitfrequenzabhängigen spektralen Dichten der Unebenheit und der Fahrgeschwindigkeit;
d): Vergrösserungsfunktion der dynamischen Radlast;
e): spektrale Dichte der dynamischen Radlast (aus [20]).

Dabei bedeuten

$\Phi_h(\Omega)$	wegkreisfrequenzabhängige spektrale Dichte der wegabhängigen Unebenheiten $h(x)$
$\Phi_h(\omega)$	zeitkreisfrequenzabhängige spektrale Dichte der zeitabhängigen Unebenheiten $h(t)$
v	Fahrgeschwindigkeit
$V(\omega)$	reelle Vergrößerungsfunktion
$\Phi_{F_z}(\omega)$	spektrale Dichte der Radlastschwankungen $F_z(t)$

Hierzu sind einige Erläuterungen notwendig. Eine Unebenheit h ist zunächst einmal vom Weg x abhängig. Betrachtet man eine sinusförmige Unebenheit $h(x)$ mit einer Wellenlänge L , ergibt sich die Wegkreisfrequenz Ω zu $\Omega = 2\pi/L$. Vergeht beim gleichförmigen Fahren über diese Unebenheit eine Zeit T , ergibt sich eine Vertikalbewegung $h(t)$ mit einer Zeitkreisfrequenz $\omega = 2\pi/T$. Dieser Zusammenhang ist in Bild 54 dargestellt.

Die Teildiagramme a, b und c von Bild 53 bzw. die Gleichung (1) vermitteln die Tatsache, dass die wegabhängigen Unebenheiten $h(x)$ und die zeitabhängige Erregung infolge dieser Unebenheiten $h(t)$ durch die (konstante) Fahrgeschwindigkeit v miteinander verknüpft sind. Ebenso gilt natürlich

$$\omega = v \cdot \Omega = \frac{2\pi v}{L}$$

was anschaulich bedeutet, dass die Erregerkreisfrequenz ω für eine gewisse konstante Wellenlänge L der Unebenheiten mit steigender Fahrgeschwindigkeit linear zunimmt.

Sind Unebenheiten und Fahrgeschwindigkeit und damit die zeitabhängige Erregung bekannt (Bilder 53a, b und c), benötigt man noch die reelle Vergrößerungsfunktion des Fahrzeuges, um zu den gesuchten dynamischen Radlasten zu gelangen:

$$V(\omega) = \frac{\hat{F}_z(\omega)}{\hat{h}(\omega)}$$

mit $\hat{F}_z$ = Amplitude der Radlast

$\hat{h}$ = Amplitude der Erregung

Für einen linearen, viskos gedämpften Einmassenschwinger ist $V(\omega)$ verwandt, aber nicht identisch mit dem in der allgemeinen Dynamik für erzwungene Schwingungen verwendeten Amplifikation, Magnification oder Dynamic Load Factor. $V(\omega)$ ist dann ebenfalls nur von der Dämpfung und vom Verhältnis der

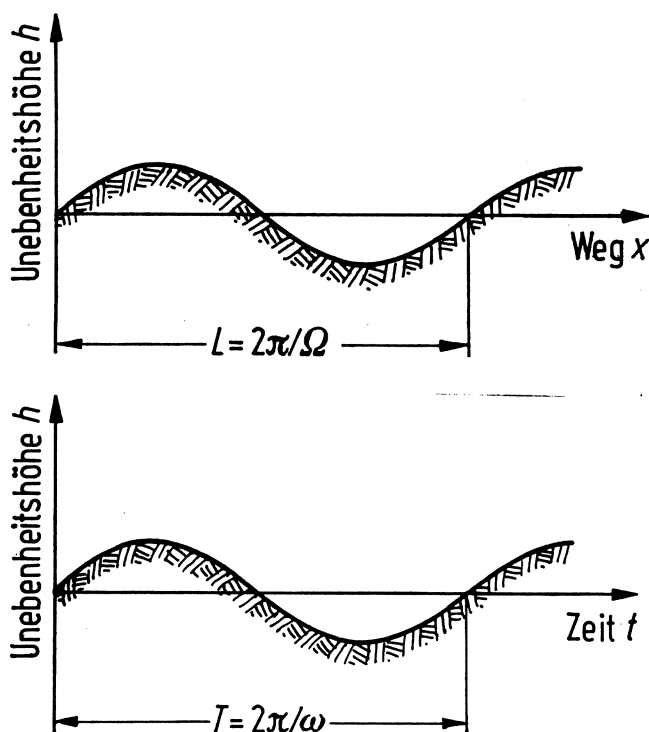


Bild 54: Sinusförmige Unebenheitsfunktion; wegabhängig (oben) und zeitabhängig (unten; aus [20]).

Erregerfrequenz zur Eigenfrequenz des Schwingers abhängig. Bild 53d zeigt die für ein reales Fahrzeug charakteristische Vergrößerungsfunktion. Die beiden Spitzen bei der Aufbaueigenfrequenz $f \sim 2$ Hz und bei der Achseigenfrequenz $f \sim 10 \dots 15$ Hz, wie sie auch aus dem Zweimassenschwinger-Modell nach Bild 52b hervorgehen, sind deutlich erkennbar.

Die Multiplikation der Erregung $\Phi_h(\omega)$ mit dem Quadrat der Vergrößerungsfunktion ergibt schliesslich das Spektrum der dynamischen Radlasten $\Phi_{F_z}(\omega)$ (Bild 53e, Gleichung (2)).

Im nächsten Abschnitt wird über Versuche zur experimentellen Bestimmung der Vergrößerungsfunktion von zweiachsigen Lastwagen berichtet. Mit diesen Versuchen wurden zwei Ziele verfolgt:

1. Feststellen des Einflusses von möglichst breiten Variationen der Fahrzeugparameter "Radstand" und "Reifendruck" auf die Vergrößerungsfunktion und damit Feststellen der tatsächlichen Streubreite der Aufbau- und Achseigenfrequenzen.
2. Feststellen der Auswirkungen der bei der Modellierung der Fahrzeuge eingeführten Vereinfachungen.

2.32 Experimentelle Bestimmung des Uebertragungsverhaltens mittels harmonischer Anregung

Das Ziel der hier beschriebenen Versuche war die Bestimmung der Vergrößerungsfunktionen aller zweiachsigen Versuchsfahrzeuge. Dazu war vorgesehen, jeweils alle vier oder mindestens zwei der Räder mit einer einfach harmonischen Verschiebung anzuregen und das Verhältnis zwischen den Amplituden von Radlastschwankung und Anregung, den Vergrößerungsfaktor V , zu bestimmen. Die Vergrößerungsfunktion $V(\omega)$ ergibt sich, indem die Frequenz $f = 2\pi\omega$ der Anregung stufenweise innerhalb des interessierenden Frequenzbandes variiert und für jeden Frequenzpunkt der Vergrößerungsfaktor V bestimmt wird.

Für die Festlegung der Randbedingungen, die bei der Realisierung der geplanten Versuche einzuhalten waren, wandten wir uns an die Fachleute des unter der Leitung von Prof. M. Mitschke stehenden Institutes für Fahrzeugtechnik (IfF) der Technischen Universität Braunschweig. Diese empfahlen uns, ein Frequenzband von 0 Hz bis 20 Hz und eine konstante Anregungsamplitude von ± 5 mm zu wählen. Bei Frequenzen über 20 Hz bewege sich die Fahrzeugachse nicht mehr und man prüfe lediglich noch die Reifensteifigkeit. Bei einer Amplitude von weniger als ± 1 mm werde die Aufbaufeder nicht aktiviert, während bei ± 5 mm mit ihrer vollen Mitwirkung gerechnet werden könne. Ausgehend von den für das Zwillingssrad einer Hinterachse gültigen Verhältnissen schätzte Dr. Braun vom IfF die zu erwartenden Kräfte wie folgt ab:

- statische Grundlast rund $F_{\text{stat}} = 60$ kN,
- Reifensteifigkeit rund $k_1 = 2$ kN/mm,
- Vergrößerungsfaktor maximal $V = 5 \cdot k_1 = 10$ kN/mm,
- dynamische Zusatzkräfte deshalb maximal rund $F_{\text{dyn}} = 50$ kN,
- grösste zu erwartende Kraft $F_{\text{tot}} = 110$ kN.

Bei einem Oeldruck von 210 bar ergibt sich damit eine erforderliche Kolbenfläche von $A = 52.4 \text{ cm}^2$ und, für eine maximale Frequenz von 20 Hz, eine notwendige Netto-Oelmenge von 126 l/min.

Damit war klar, dass für die Bestimmung des Uebertragungsverhaltens von voll beladenen Lastwagen eine servohydraulische Anlage von beträchtlicher Kapazität eingesetzt werden muss. Es ist dabei nicht ausreichend, wenn

Zylinder und eine Druckölversorgung zur Verfügung stehen, deren Leistungsfähigkeit den Anforderungen entsprechen. Hinzu kommt, dass der ganze Versuchsaufbau, d.h. insbesondere die räumliche Lage der Zylinder in der Versuchshalle und die Einrichtungen, die eine zweckmässige und vor allem gefahrlose Platzierung des "Prüflings" auf den Kolbenstangen erlauben, sehr spezifisch auf das Problem und seine Dimensionen abgestimmt sein müssen.

Mit anderen Worten: Nur eine Automobilfirma, die sich intensiv dem Bau und der Erprobung schwerer Nutzfahrzeuge widmet, verfügt allenfalls über die erforderlichen Einrichtungen. Dass die EMPA und die ETH in Zürich und Lausanne zwar auf dem Gebiet der servohydraulischen Prüfmaschinen über beachtliche Kapazitäten verfügen, leider aber keine solchen Firmen sind, musste recht bald zur Kenntnis genommen werden.

Einmal mehr half uns die Firma Saurer aus der Bedrängnis. Sie verfügte zwar selber auch nicht über die gesuchten Einrichtungen, liess dafür aber ihre Beziehungen zu verschiedenen grossen Automobilherstellern im benachbarten Ausland spielen. In der Folge stellte uns die Firma Magirus-Deutz, Ulm (BRD), ihre Anlage mietweise zum Selbstkostenpreis zur Verfügung. Man kam überein, dass die Bedienung der Servoanlage gemäss den EMPA-Wünschen durch Ingenieure von Magirus, dagegen aber die Erfassung und Aufzeichnung der Daten am Fahrzeug durch die EMPA erfolgen sollten.

Neben anderen Komponenten bestand die Anlage aus zwei hydrostatisch gelagerten, servohydraulischen 150-kN-Zylindern mit einer Kolbenfläche von 54 cm^2 und einem Hub von ± 125 mm sowie einer 280-bar-Druckölversorgung mit einer Kapazität von 340 l/min (Produkte der Firma Schenck AG, Darmstadt). Die Zylinder waren in einer Grube montiert, so dass das Versuchsfahrzeug auf normale Weise in die Prüfhalle und mit jeweils zwei Rädern auf an den Kolbenstangen angebrachte Platten fahren konnte (Bild 55). Infolge des bei Anlagen dieser Art üblichen Druckabfalles an den Servoventilen von rund 70 bar betrug die maximale Nennkraft der Zylinder im dynamischen Vollastbetrieb je etwas mehr als 110 kN.

Die Anlage wurde in Wegregelung gefahren, wobei als Istwert der Kolbenweg mittels eines in der Kolbenstange eingebauten induktiven Wegaufnehmers erfasst wurde. Den Soll-

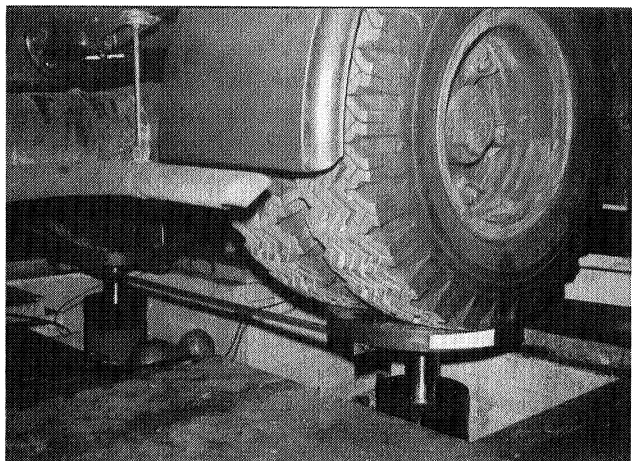
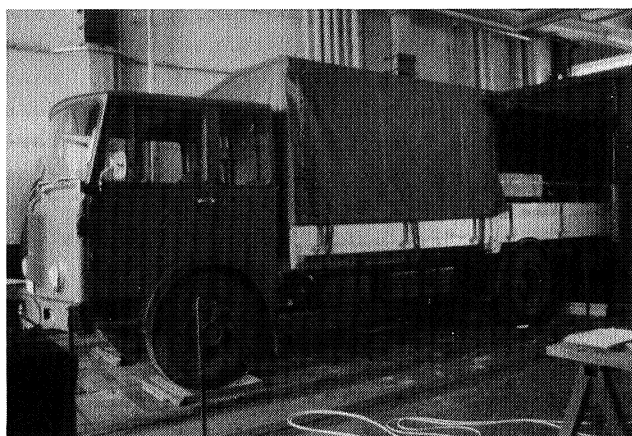


Bild 55: Das Fahrzeug Nr. 14D auf dem Prüfstand der Firma Magirus in Ulm (BRD, oben). Die Hinterachse dieses Fahrzeuges auf den beiden Hydropulszylindern (unten).

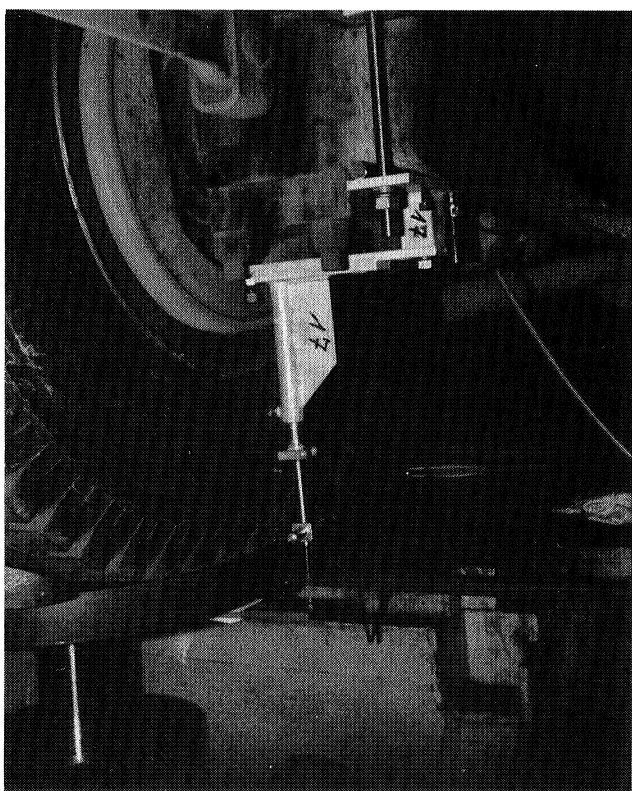


Bild 56: Messung der dynamischen Reifeneinfederung mit einem induktiven Wegaufnehmer.

wert erzeugte ein Funktionsgenerator, dessen Ausgang auf die Eingänge der voneinander unabhängigen Regelkreise der beiden Zylinder geschaltet wurde. Während die Phasengleichheit der Anregung durch die beiden Zylinder damit gewährleistet war, konnte die Gleichheit der Amplituden durch manuelle Anpassung entsprechend den auf einem Oszilloskop übereinander sichtbar gemachten Istwerten erreicht werden. Damit war es möglich, die zwei Räder einer Fahrzeugachse gleichzeitig und gleichartig anzuregen. Die andere Achse musste blockiert werden, damit das Fahrzeug nicht wegrollen konnte.

Die vertikale, dynamische Deformation der Reifen wurde mittels zweier zwischen Kolbenstange und Fahrzeugachse angebrachter induktiver Wegaufnehmer gemessen (Bild 56). Für die Aufzeichnung der Messwerte wurde von der EMPA neben einem Papierschreiber erstmals eine PCM-Anlage mit zugehöriger Magnetbandstation eingesetzt (s. Abschnitte 3.4 und 3.5, "Datenaufzeichnung" und "Auswertemethoden").

Ein Anfang Juni 1977 am Fahrzeug 14D durchgeführter Vorversuch gab Gelegenheit, die Eignung der Magirus-Anlage für die geplanten Versuche abzuklären und auch einige versuchs- und messtechnische Probleme zu lösen. In einem ersten Versuch gelang es nicht, bei einem Reifendruck von 7 bar eine Amplitude von ± 5 mm über das ganze Frequenzband durchzuziehen (Bild 57a). Das Durchfahren der Aufbau-eigenfrequenz $f_2 = 2.6 \dots 3.2$ Hz bot bei Vergrößerungsfaktoren von $V = (0.9 \dots 1.1) \cdot 2.6$ kN/mm noch keine Probleme. Beim Anfahren der Achseigenfrequenz bei $f_1 = 10.7$ Hz wurde einerseits die Leistungsgrenze der Anlage erreicht, und andererseits begannen die Räder, sich von ihrer Unterlage, den auf den Kolbenstangen montierten Platten, abzuheben. Die Erkenntnis, dass hydrostatisch gelagerte Kolbenstangen sich sehr leicht um ihre Achse drehen lassen, wenn sie den Kraftschluss verlieren, musste mit dem Verlust zweier induktiver Wegaufnehmer bezahlt werden (die Tauchanker wurden zerstört). Dass dieser erste Versuch misslang, war vor allem auf die Unterschätzung der Reifensteifigkeit zurückzuführen, die, wie sich später zeigte, $k_1 = 2.6$ kN/mm (Bild 48) betrug. Dazu kam der Umstand, dass man sich im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit der Servoanlage und auch im Grenzbereich des Kraftschlusses zwischen Reifen und Kolbenstange bewegte.

In der Folge zeigte sich, dass mit einer statischen Grundlast von $F_{\text{stat}} = 52$ kN pro

Zwillingsrad und Reifendrücken von 5.5 bar, 7.0 bar und 8.5 bar eine Amplitude von ± 4 mm über das ganze Frequenzband von 0 Hz bis 20 Hz eingehalten werden konnte. Der maximale Vergrößerungsfaktor mit $V = 4.2 \cdot 3.0$ kN/mm trat bei einem Druck von 8.5 bar auf (Bild 57b). Bild 57c zeigt den Einfluss einer Erhöhung der Hinterachslast von 103.6 kN auf 117.5 kN, die durch Verschieben des Ballastes auf der Fahrzeugbrücke erzeugt wurde.

Im August 1977 fand die Untersuchung der Versuchsfahrzeuge 10R, 11R, 12R und 13R in Ulm statt. Das Fahrzeug 13R musste zweimal geprüft werden. Dazwischen wurden, wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt, im Saurer-Werk in Arbon die extrem harten, hinteren Blattfedern durch serienmässige Exemplare ersetzt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Bildern 58 bis 62 dargestellt. Ergänzend zu diesen grafischen Darstellungen zeigen die Bilder 63 und 64 die Spitzenwerte der Vergrößerungsfunktionen, d.h. die entsprechenden Frequenzen und die zugehörigen Vergrößerungsfaktoren in tabellarischer Form.

Zunächst ist festzustellen, dass es entgegen den Erwartungen nicht gelang, bei allen Versuchen eine Anregungsamplitude von ± 4 mm einzuhalten. Während bei den Vorderachsen diesbezüglich keine Probleme auftraten, musste für die Hinterachsen des Fahrzeuges 12R und des hart gefederten Fahrzeuges 13R die Amplitude auf ± 3 mm reduziert werden (Bilder 58 und 59). Bei dieser Gelegenheit wurde festgestellt, dass die Vergrößerungsfunktionen nicht unabhängig von der Grösse der Anregungsamplitude sind. Beim letzten untersuchten Fahrzeug 13R fanden deshalb bei einem Reifendruck von 8 bar Versuche mit Amplituden von 3 mm, 3.5 mm, 4 mm und 4.5 mm statt (Bild 61b).

Aus den Ulmer Versuchen geht hervor, dass die Uebertragungsfunktion eines Lastwagens mittels einfach harmonischer Anregung konstanter Amplitude nicht zuverlässig bestimmt werden kann. Vielmehr muss das Anregungssignal aus dem Frequenzspektrum der effektiven Anregung gewonnen werden. Dieses ergibt sich aus dem effektiven Unebenheitspektrum und einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit. Das bedeutet natürlich auch, dass die Uebertragungsfunktion infolge der Nichtlinearität der Blattfedern sowohl von der Ebenheit des Belages als auch von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist.

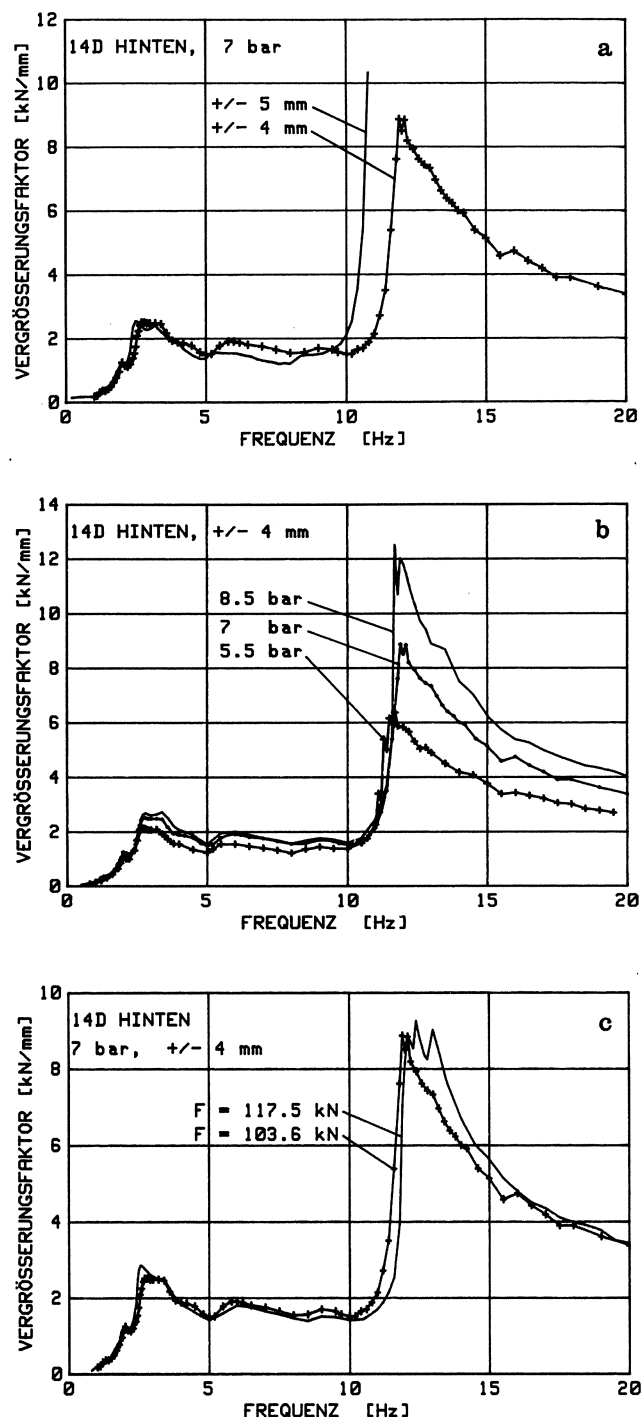


Bild 57: Vergrößerungsfunktionen für die Hinterachse des Fahrzeuges Nr. 14D.

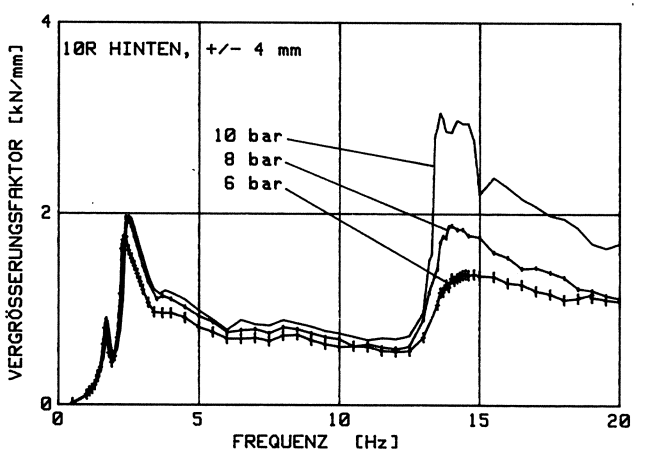
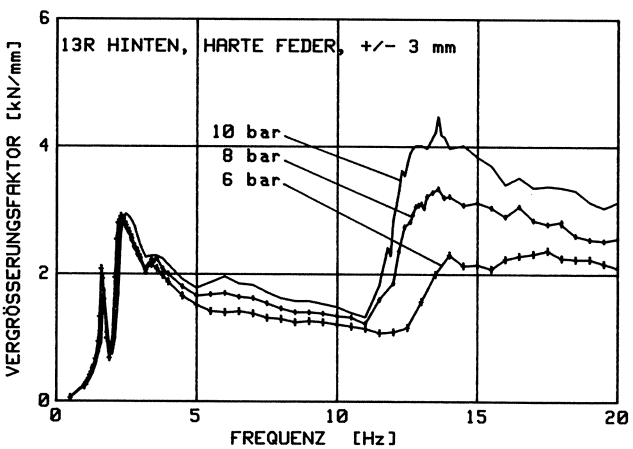
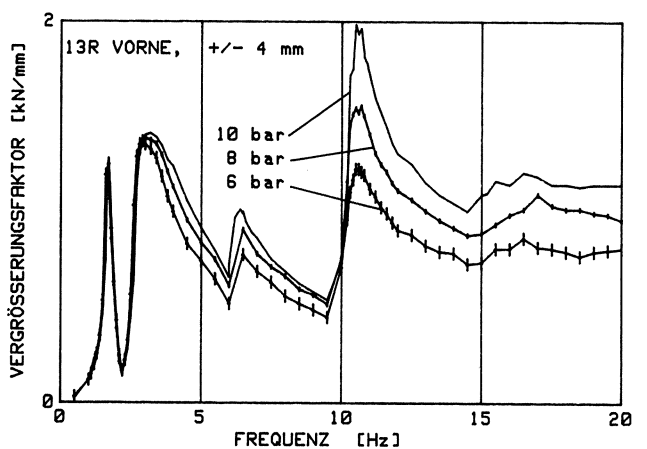
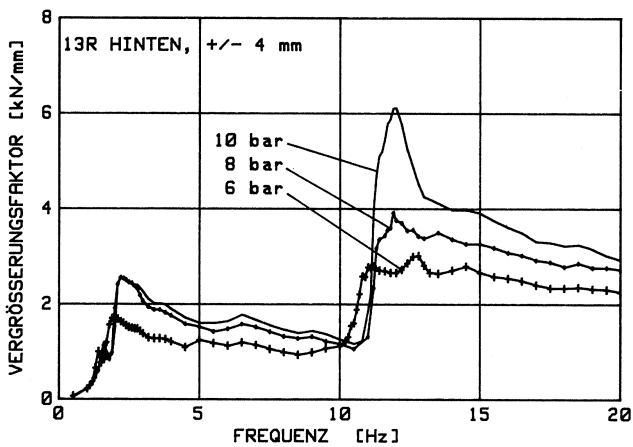
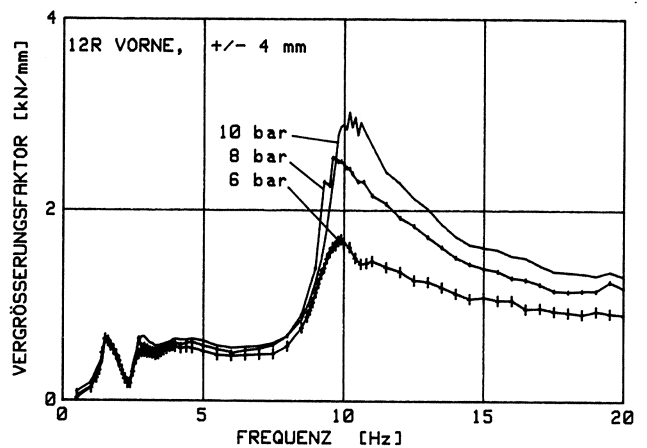
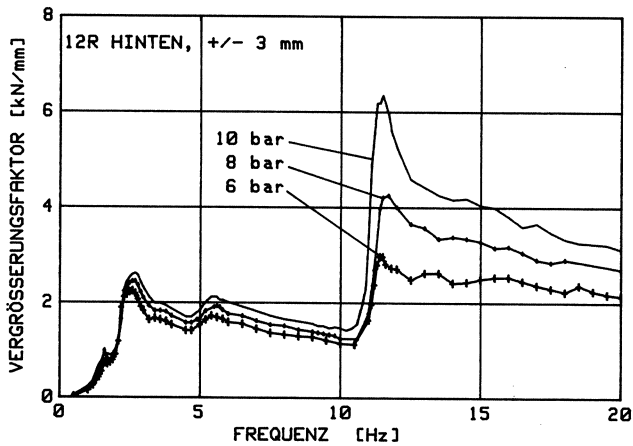
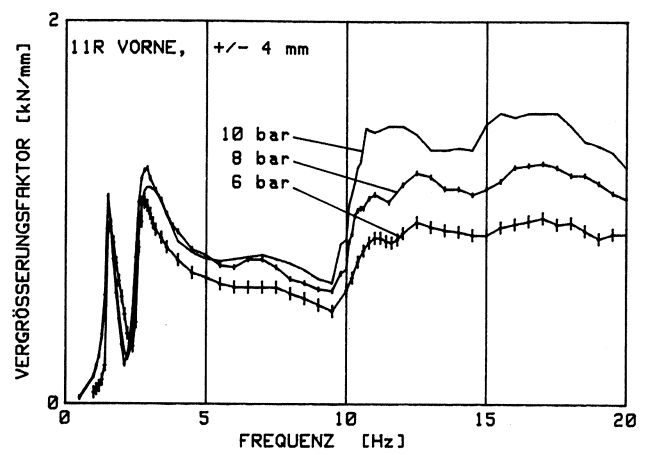
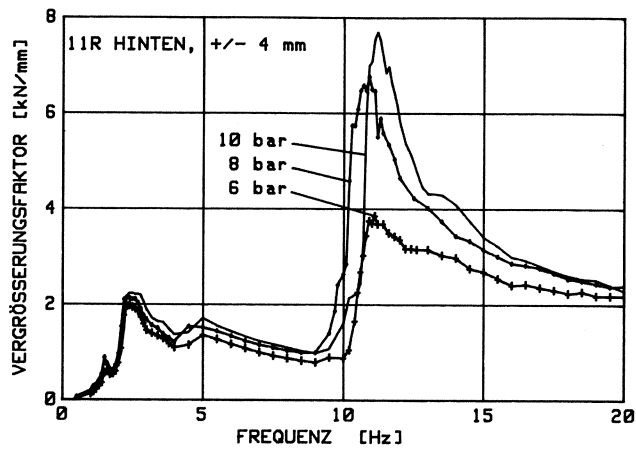


Bild 58: Vergrößerungsfunktionen für die Hinterachsen der Fahrzeuge Nr. 11R, 12R und 13R (normale und harte Blattfeder).

Bild 59: Vergrößerungsfunktionen für die einfach bereiften Achsen der Fahrzeuge Nr. 11R, 12R, 13R und 10R.

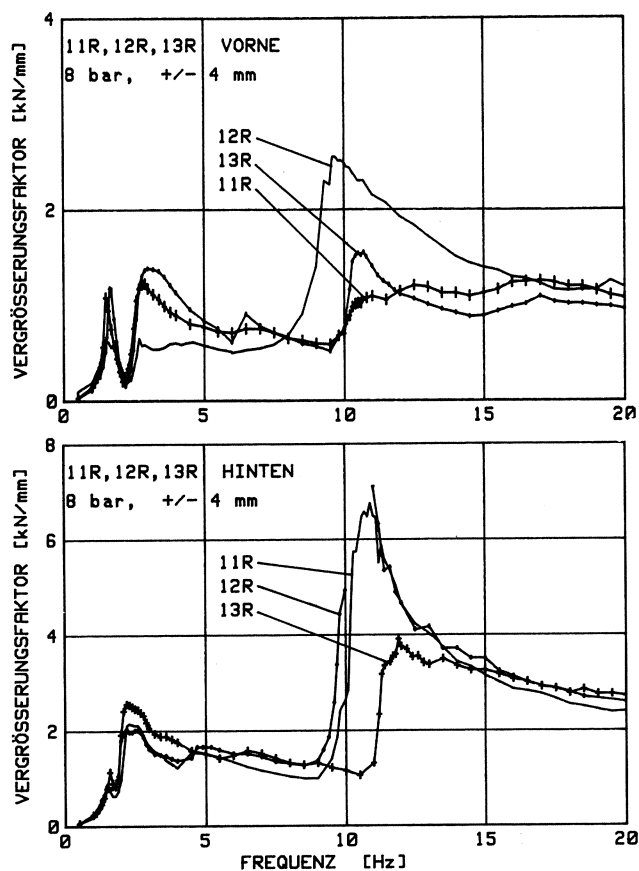


Bild 60: Vergleiche der Vergrößerungsfunktionen für die Fahrzeuge Nr. 11R, 12R und 13R und eine Anregungsamplitude von ± 4 mm.

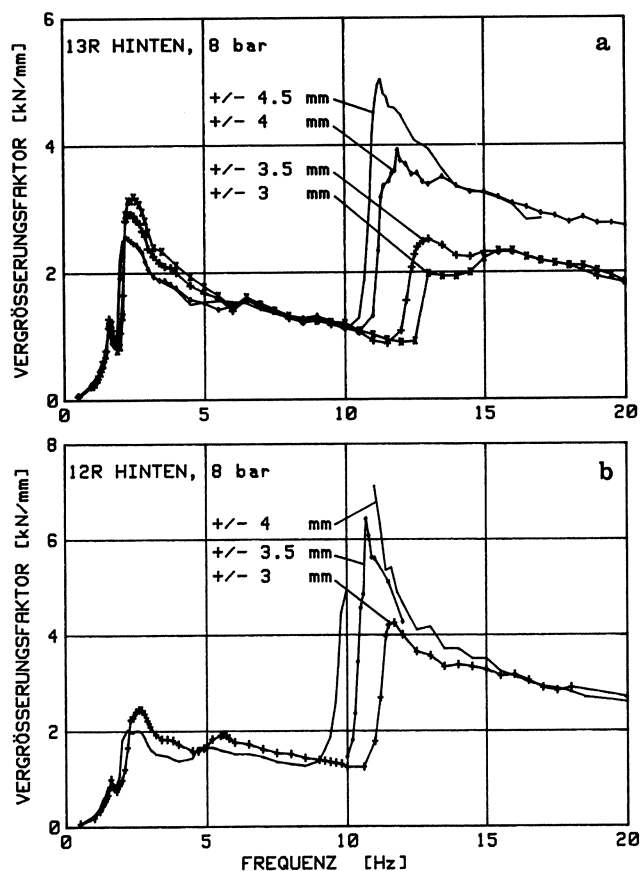


Bild 61: Einfluss der Größe der Anregungsamplitude auf die Vergrößerungsfunktion.

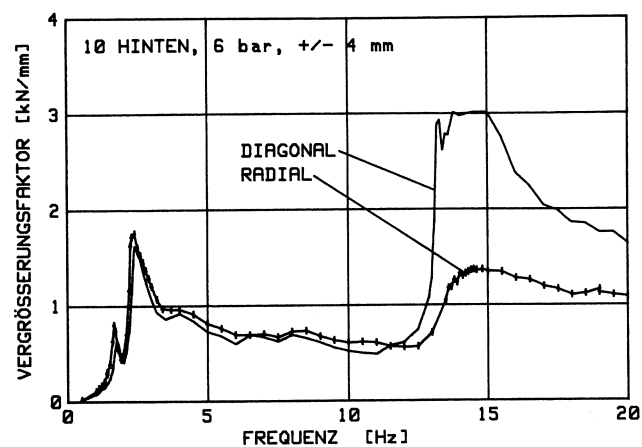


Bild 62: Einfluss des Reifentyps (radial oder diagonal) auf die Vergrößerungsfunktion für die Hinterachse des Anhängers Nr. 10.

Achse	Reifen- druck (bar)	Erreg. Amplit. (mm)	Frequenz (Hz) / Vergr. Faktor (kN/mm) im Bereich der Aufbaueigenfrequenz im Bereich der Achseigenfrequenz		
10D V2	6	4	*)		
			1.80/0.65	2.42/1.78	4.00/0.97
			13.8 / 3.19	15.0 / 3.19	
10R V2	6	4	1.70/0.75	2.40/1.78	4.00/0.97
			14.8 / 1.39	19.0 / 1.18	
			1.70/0.90	2.40/1.96	3.70/1.14
	8	4	14.0 / 1.88		
			1.70/0.84	2.50/1.98	3.80/1.20
			13.6 / 3.06	14.2 / 2.98	
11R V	6	4	1.50/0.98	2.80/1.0	
			12.5 / 0.95	17.0 / 0.98	
			1.50/1.08	2.90/1.23	
	8	4	12.5 / 1.21	17.0 / 1.26	
			1.50/1.03	2.95/1.13	
			11.75/1.45	15.5-17.0/1.52	
12R V	6	4	1.50/0.65	2.85/0.51	
				3.90/0.58	
			9.9 / 1.69	11.0 / 1.47	
	8	4	1.50/0.65	2.70/0.66	
			9.65/2.55	10.1 / 2.44	
			1.60/0.68	2.85/0.68	
13R V	6	4	10.2 / 3.03	19.5 / 1.36	
			1.70/1.25	2.90/1.37	6.50/0.78
			10.55/1.23	16.5 / 0.87	
	8	4	1.65/1.18	3.00/1.39	6.50/0.91
			10.7 / 1.55	17.0 / 1.09	
			1.70/1.28	3.20/1.42	6.50/0.99
	10	4	10.5 / 1.99	16.5 / 1.21	

*) Kolonne mit den Spitzenwerten, entsprechend der Aufbau- und der Achseigenfrequenz

Bild 63: Spitzenwerte der Vergrößerungsfunktionen und zugehörige Frequenzen für einfach bereifte Achsen.

Achse	Reifen- druck (bar)	Erreg.- Amplit. (mm)	Frequenz (Hz) / Vergr. Faktor (kN/mm) im Bereich der Aufbaueigenfrequenz im Bereich der Achseigenfrequenz		
11R H	6	4	1.60/0.60	2.40/1.98	5.00/1.36
		3.5	10.8 / 4.35	12.5 / 3.41	
	8	4	1.50/0.89	2.30/2.15	4.50/1.54
		3.5	10.9 / 6.76	2.45/2.24	5.00/1.71
12R H	6	3	1.60/0.72	2.60/2.24	5.40/1.72
		3.5	11.45/2.97	2.20/2.03	2.55/2.01
	8	4	1.50/0.85	2.20/2.03	2.55/2.01
		3.5	10.7 / 6.43	2.65/2.45	5.50/1.91
13R H	6	4	1.40/1.01	2.00/1.72	5.00/1.24
		3.5	11.2 / 2.80	12.8 / 3.02	14.5 / 2.80
	8	4.5	1.60/1.16	2.20/2.56	11.3 / 5.04
		3	1.60/1.14	2.20/2.56	6.5 / 1.58
13R H harte Federn	6	4	1.60/1.28	2.35/2.92	6.5 / 1.58
		3	13.0 / 2.52	2.50/3.20	6.5 / 1.62
	8	3	1.70/1.20	2.50/3.20	6.5 / 1.62
		3	13.0 / 1.98	15.75/2.34	16.5 / 3.06
14D H	5.5	4	1.60/1.21	2.30/2.56	6.5 / 1.78
		3.5	11.95/6.12	2.70/3.20/2.13	5.75/1.55
	7	5	2.00/1.06	2.70/3.20/2.13	5.75/1.55
		4	2.00/1.28	2.50/2.57	3.20/2.46
14D H	5.5	4	2.00/1.26	2.65-3.40/2.51	5.90/1.91
		4	2.05/1.26	11.9 / 8.87	16.0 / 4.74
	7	4	2.00/1.26	2.80-3.40/2.70	6.0 / 2.01
		4	11.7 / 12.52	2.58/2.85	3.40/2.51
14D H	7	4	1.80/0.89	2.58/2.85	3.40/2.51
		4	12.4 / 9.27	6.0 / 0.69	

*) Kolonne mit den Spitzenwerten, entsprechend der Aufbau- und der Achseigenfrequenz

Bild 64: Spitzenwerte der Vergrößerungsfunktionen und zugehörige Frequenzen für doppelt bereifte Achsen.

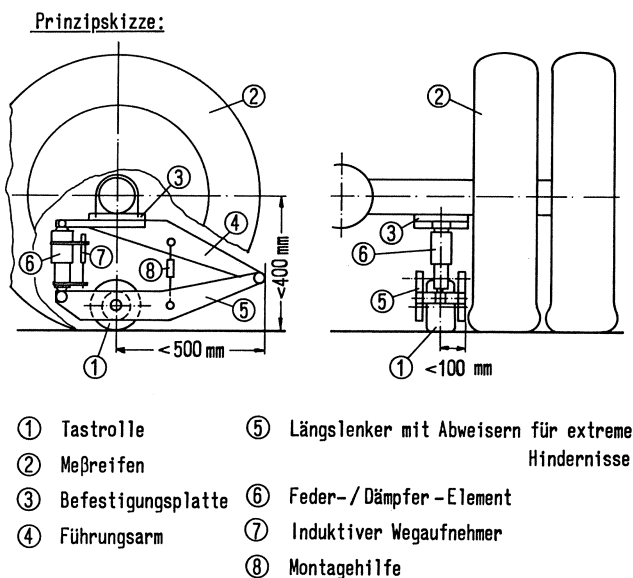


Bild 65: Mechanisch-elektrische Vorrichtung für die Messung dynamischer Radlasten (IFF, TU Braunschweig).

2.4 Messung der dynamischen Radlasten schwerer Fahrzeuge

Die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Radlasten eines Fahrzeuges während der Fahrt ist nicht einfach. Grundsätzlich kann entweder an der Strasse oder am Fahrzeug gemessen werden. Der Einbau von Wägeelementen in die Fahrbahn ist ein durchaus zuverlässiges Verfahren, das aber nur für relativ kurze Messstrecken eingesetzt werden kann [21]. Da auch, oder vor allem, Messungen auf Brücken vorgesehen waren, musste eine Messung am Fahrzeug gewählt werden. Aus der Literatur sind eine ganze Reihe von praktisch erprobten Messverfahren bekannt [22], [23], [24]. Diese können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Verwendung des Reifens als Messfeder, wobei verschiedene mehr oder weniger direkt lastabhängige Deformationen wie zum Beispiel die vertikale Einfederung ([25], [26], [27], [28]) oder die seitliche Ausbeulung der Seitenwand [29] abgegriffen werden können.
- Messung der Schwankungen des Reifendruckes [23].
- Ueberwachung der Bewegungen der Achse und eventuell auch des Aufbaus mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern und/oder Dehnungsmessstreifen [22], [30], [31].
- Einbau einer Messfelge [22], [32] oder einer Messnabe [23], [33].

Aufgrund einer Abwägung aller Vor- und Nachteile dieser Verfahren, auf die hier nicht im Detail eingegangen werden soll, und unter Berücksichtigung der für die Deibüel-Brücke gültigen Randbedingungen wurde der Entschluss gefasst, ein neues Gerät zu entwickeln, das den Reifen als Messfeder benützt. Als zuverlässigste Grösse sollte dabei die vertikale Deformation des Reifens bzw. die Distanz zwischen Fahrzeugachse und Fahrbahnoberfläche gemessen werden [24].

Zur Diskussion standen schliesslich zwei Systeme, ein mechanisch-elektrisches, vorgeschlagen vom Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig (Bild 65), und ein optoelektronisches, vorgeschlagen von der Firma Jenzer AG, Geroldswil, heute in Dietikon (Bild 66). Der ausschlaggebende Vorteil, der zur Wahl des opto-elektronischen Systems führte, bestand darin, dass hier die Messung berührungslos und ohne mechanische Eingriffe in die Aufhängung des Fahrzeugchassis erfolgte [19]. Beim Braunschweiger System bestand die Gefahr der Erregung von Eigen-

schwingungen der mechanischen Abtastvorrichtung, die dem effektiven Verlauf der Reifen-deformation überlagert worden wären. Zudem hätte es aus montage-technischen Gründen an Vorderrädern nicht eingesetzt werden können.

Das opto-elektronische System besteht aus einem Infrarot-Sender, einer Empfangskamera und einer Elektronik.

Der Sender, eine GaAs-Diode, erzeugt einen Strahl infraroten Lichtes mit einer Wellenlänge von 940 nm, der auf der Fahrbahnoberfläche reflektiert wird und dort einen Lichtfleck erzeugt. Die Grösse dieses Lichtfleckes ergibt sich aus der Distanz Sender-Fahrbahnoberfläche und der Wahl der im Sender eingebauten Optik.

Die Kamera, wie der Sender auf einem an der Fahrzeugachse fixierten Support montiert, beobachtet die Lage des Lichtfleckes. Dazu ist sie mit einem zweidimensional lichtempfindlichen Fotodetektor und einer Optik ausgerüstet. Die Optik ist so gewählt, dass bei einer mittleren Entfernung zum Lichtfleck dieser auf den Fotodetektor fokussiert wird. Der Fotodetektor erzeugt Ströme, die ein Mass für die Lage des Bildpunktes auf seiner lichtempfindlichen Fläche sind (Bild 67).

Die Elektronik versorgt einerseits den Sender mit Energie und pulst ihn mit einer Frequenz von 2 kHz, andererseits wandelt sie die vom Detektor erzeugten Ströme in Spannungen im Bereich ± 5 Volt um. Diese Spannungssignale, je eines für die x- und die y-Koordinate des Lichtfleckes, können dann ohne weiteres mit üblichen Mitteln aufgezeichnet werden.

Da es sich bei diesem Messsystem um eine neue Anwendung an sich zwar schon bewährter Komponenten handelte, ist es nicht verwunderlich, dass bis zu seinem einwandfreien Funktionieren einige Optimierungsschritte notwendig waren.

Die erste Ausführung wurde im Herbst 1977 an einem gerade verfügbaren Armee-Lastwagen montiert und ersten Versuchen unterzogen. Aus Bild 68 geht hervor, dass Sender und Kamera in einer Vertikalebene parallel zur Fahrtrichtung angeordnet waren. Die mittlere Distanz Sender-Fahrbahnoberfläche betrug rund 500 mm, der Lichtfleck wies einen mittleren Durchmesser von etwa 30 mm auf. Es zeigte sich, dass unter diesen Bedingungen die Empfindlichkeit des Systems auf Umwelteinflüsse zu gross war.

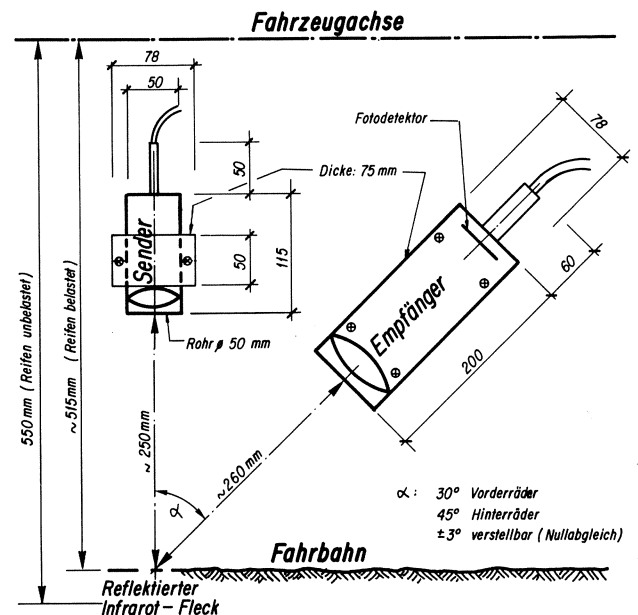


Bild 66: Opto-elektronische Vorrichtung für die Messung dynamischer Radlasten (Jenzer AG, Dietikon).

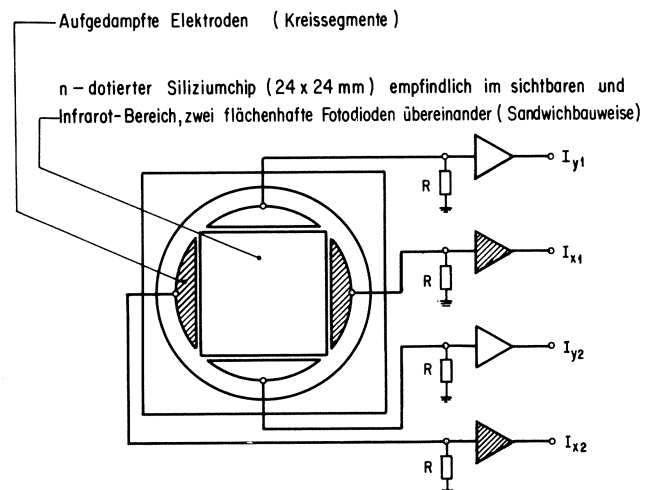


Bild 67: Schematische Darstellung des in der Optokamera eingebauten Fotodetektors.

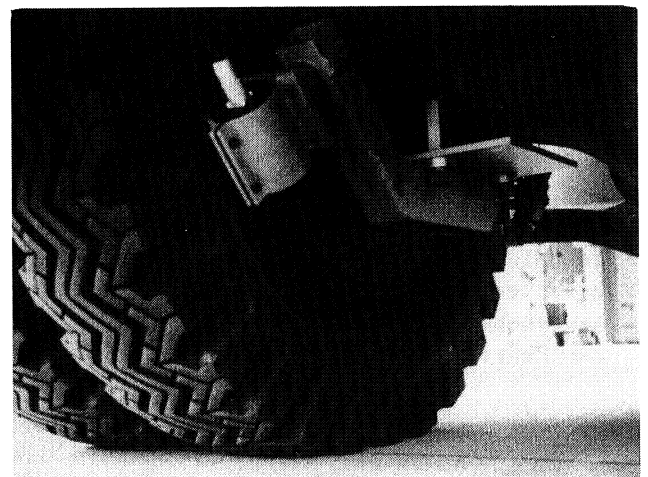


Bild 68: Ursprüngliche Ausführung des opto-elektronischen Messsystems, hier an der Hinterachse des Fahrzeuges Nr. 14D montiert.

Mit einer Wellenlänge von 940 nm liegt das verwendete Infrarotlicht im Bereich des unsichtbaren Sonnenlichtes. Wird das System bei sonnigem Wetter eingesetzt, darf die Intensität des Lichtfleckes auf der Fahrbahnoberfläche einen gewissen Wert nicht unterschreiten, damit der Detektor ihn noch vom Sonnenlicht unterscheiden kann. Beim ersten System war diese Bedingung offensichtlich nicht erfüllt. Deshalb wurde nach den Versuchen im Herbst 1977 eine Reihe von Massnahmen getroffen, um die Lichtverhältnisse zu verbessern:

- Einbau von Sendedioden mit doppelter Leistung (50 mW statt 25 mW).
- Einbau von Infrarotfiltern vor dem Fotodetektor, die nur Licht mit Wellenlängen im interessierenden Bereich passieren lassen.
- Einbau von Schlitzblenden, die das Blickfeld des Detektors auf den Arbeitsbereich des auftreffenden Lichtfleckes beschränken (im vorliegenden Fall interessierte nur die eindimensionale Verschiebung des Fleckes).
- Reduktion der freien Leitungslänge zwischen Elektronik und Sender von maximal 25 m auf 1.5 m. Kurz vor dem Sender wurde ein Driver zwischengeschaltet, der die Flankensteilheit der Impulse regeneriert, mit denen der Sender angesteuert wird.

Die Hoffnung, dass die Anlage damit zufriedenstellend funktionierte, zerschlug sich leider nach den ersten Versuchen an der Deibüel-Brücke. Wie in der Einleitung erwähnt, mussten die Versuchsreihe V1 unterbrochen und die Messanlage radikal umgebaut werden:

- Verkürzung der Distanz Sender-Fahrbahnoberfläche von 500 mm auf 300 mm.
- Verkleinerung des Durchmessers des reflektierten Lichtfleckes von 30 mm auf 10 mm.
- Reduktion des Winkels zwischen den optischen Achsen von Sendern und Kameras von 90° auf 45° bei den Hinterrädern und von 90° auf 30° bei den Vorderrädern.
- Im Hinblick auf die Fahrten über das Brett erwies es sich als zweckmässig, die Messebene senkrecht und nicht parallel zur Fahrriichtung anzuordnen.

Diese Massnahmen bedingten den Bau neuer Supports für die Montage von Sendern und

Kameras am Fahrzeug. Optik und Gehäuse der Sender und der Empfänger mussten ebenfalls ersetzt werden. Während der Neubau der Supports an der EMPA erfolgen konnte, führten die übrigen Massnahmen zu beträchtlichen Mehrkosten. Die komplette vierkanalige Anlage kostete schliesslich rund Fr. 75'000.- und konnte von der EMPA erst nach Genehmigung des zweiten an das EDI gerichteten Kreditgesuches im Jahr 1980 beschafft werden [9]. Für die Versuche an der Deibüel-Brücke wurde sie von der Firma Jenzer AG kostenlos zur Verfügung gestellt.

Die Bilder 69a und 69b zeigen die ursprüngliche und die endgültig umgebaute Anlage an einem Vorderrad, Bild 70 die letztere, wie sie an einer Hinterachse montiert ist. Durch die getroffenen Massnahmen konnte die Unabhängigkeit der Anlage von den Witterungsverhältnissen entscheidend verbessert werden. Dies gilt zumindest für ihre Empfindlichkeit gegenüber Sonneneinstrahlung; denn bei nasser Fahrbahn oder gar im Regen sollte die Anlage auch heute nicht eingesetzt werden:

- Die Reflexionsebene des Lichtstrahles wird durch den Wasserfilm auf der Fahrbahnoberfläche verfälscht.
- Bei raschen Fahrten entsteht unter dem Fahrzeug ein derart intensiver Wassersprühnebel, dass die optische Verbindung Sender/Empfänger unterbrochen wird.
- Es gelang bisher nicht, die optischen Linsen von Sendern und Kameras vollständig gegen das Gehäuse abzudichten. Wenn Wasser in das Gehäuse eindringt, ist damit zu rechnen, dass sich die innerste Linse beschlägt und das System ausfällt.

Die Messanlage wurde in der Folge bei den Versuchen mit allen vier zweiachsigen Lastwagen und mit dem vierachsigen Lastenzug eingesetzt. Die Bestimmung der dynamischen Radlasten aus den mit Hilfe der Anlage gemessenen Spannungssignalen wird im Abschnitt 3.2, "Die Instrumentierung der Fahrzeuge", eingehend erläutert.

Will man die Anlage an Fahrzeugen mit Doppelachsen einsetzen, treten Platzprobleme bei der Montage der Supports auf, die noch nicht gelöst sind. Aus finanziellen Gründen konnten diese Probleme bisher nicht im Detail studiert werden.

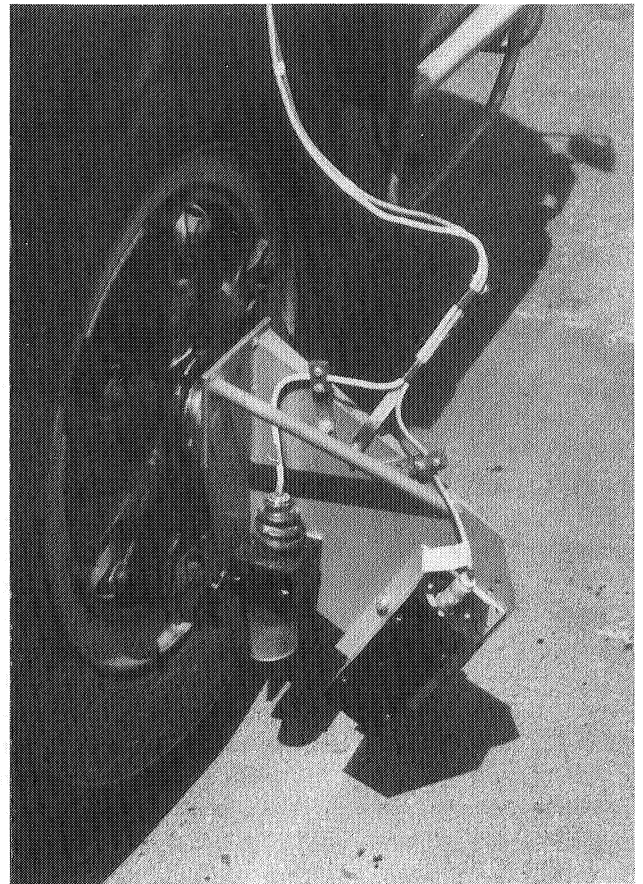
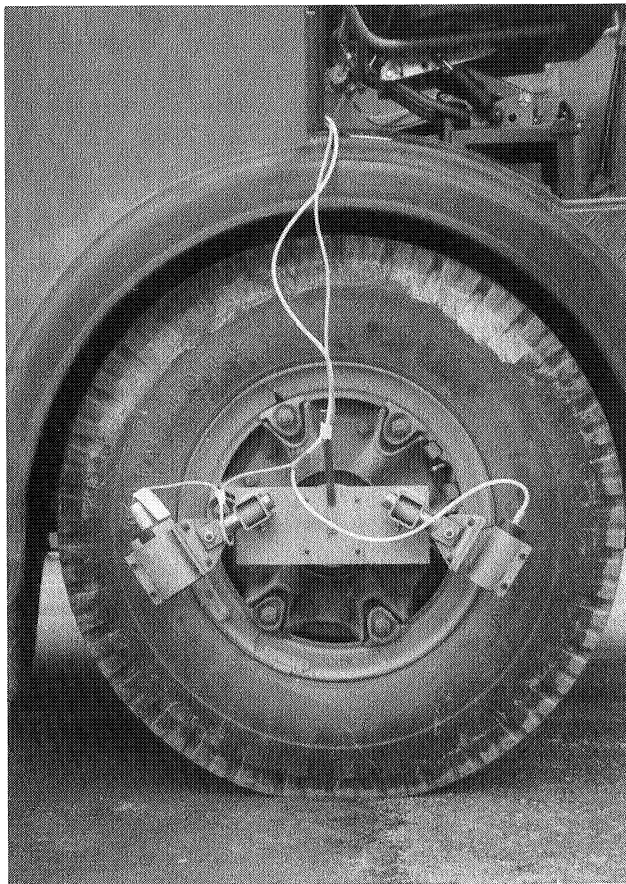


Bild 69: Gegenüberstellung der ursprünglichen (links) und der definitiven (rechts) Ausführungen des opto-elektronischen Messsystems, wie es an den Vorderachsen eingesetzt wurde.

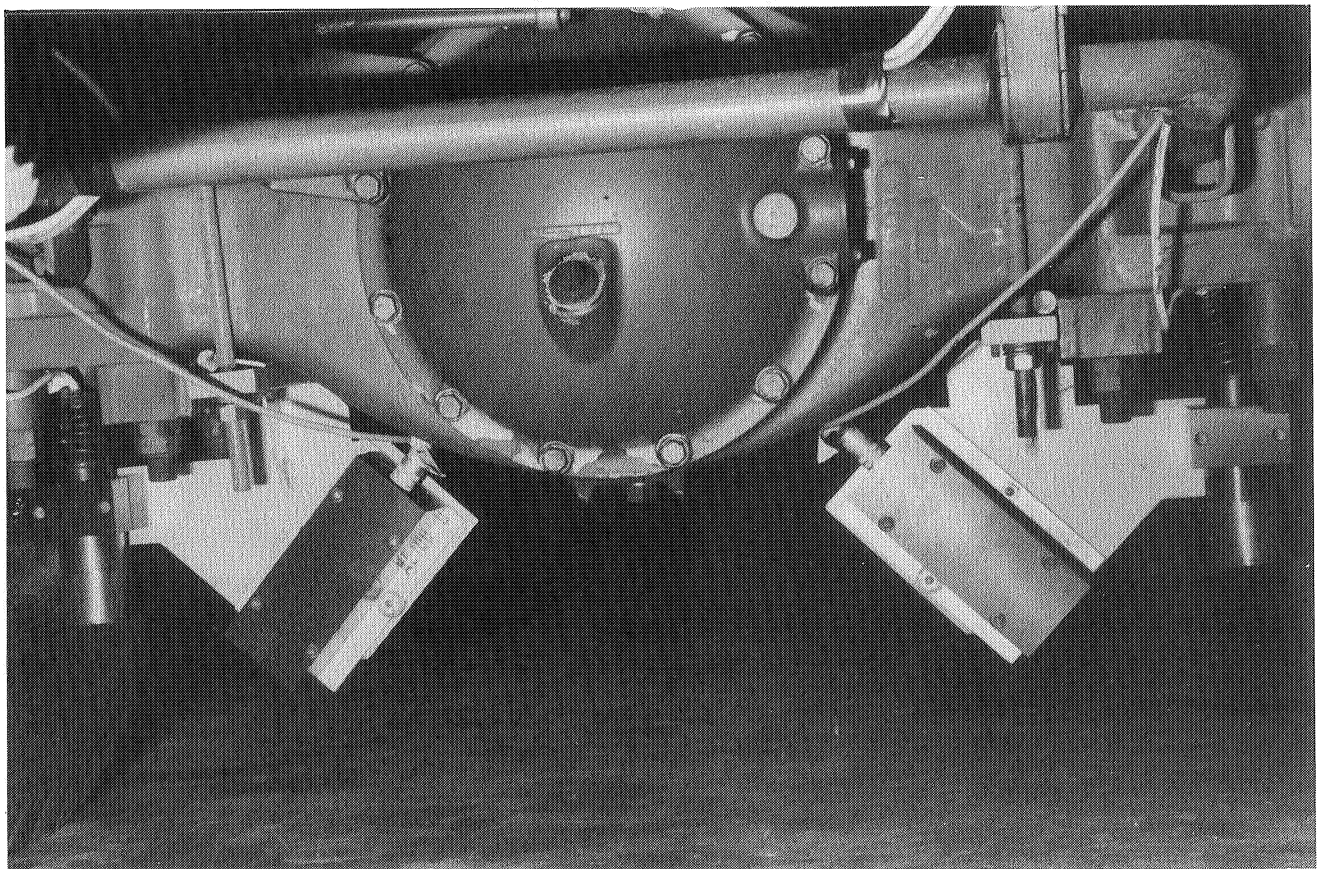


Bild 70: Definitive Ausführung des opto-elektronischen Messsystems, hier an einer Hinterachse montiert.

2.5 Die Versuchsbrücke

Die Brücken Deibüel sind zwei parallele Hangbrücken im Zuge der Talstrasse T4, eines Zubringers zur Nationalstrasse N4a, zwischen Cham und Sihlbrugg im Kanton Zug (Bild 71). Die untersuchte Bergspurbrücke (Fahr- richtung Sihlbrugg-Cham) weist im Gegensatz zur fünffeldrigen Talspurbrücke drei Felder auf, liegt rund 2 m höher als diese und ist seitlich um rund 3 m versetzt.

Bild 72 zeigt Grundriss und Längsschnitt der Brücke, die Querschnittsausbildung des einzelligen Kastens im Feld- und im Stützenbereich und die Querschnittswerte Trägheitsmoment I , Fläche A und Masse pro Laufmeter m (ohne Belag) für einige Querschnitte. Die Brücke ist schwimmend gelagert, und je eine der beiden Stützen ist in den Ueberbau eingespannt bzw. mit diesem durch ein Betongelenk verbunden. Als statisches System ist deshalb, insbesondere für dynamische Berechnungen, ein Rahmen anzunehmen. Bezogen auf die Durchbiegung in der Mitte des mittleren Feldes, beträgt die Federkonstante der Brücke $k = 158 \text{ kN/mm}$; damit gehört sie zu den Brücken mit einer durchschnittlichen Biegesteifigkeit [6], [7].

Die Brücke wurde in Ortsbeton erstellt, der Ueberbau ist mit Kabeln längs vorgespannt. Die Längsachse der Brücke ist gerade. Das Trasse der T4 weist in Richtung Sihlbrugg-Cham ein konstantes Längsgefälle von 2.36% sowie in Querrichtung ein Dachprofil mit 3% bzw. 2.4% Gefälle auf.

Während der im Mai 1977 durchgeführten Versuchsreihe E1 zur Bestimmung der Eigenschwingungen der Brücke war mit Ausnahme einer 4 m breiten und 0.08 m dicken Bitumen-Transportpiste kein Belag auf der Fahrbahnplatte vorhanden. Die Leitplanken waren bereits montiert (s. Abschnitt 2.62, "Experimentelle Bestimmung der Eigenschwingungen mittels harmonischer Anregung"). Während der zwischen März und August 1978 durchgeführten Versuchsreihen V1 bis V4, eingeschlossen die zu E1 analoge Versuchsreihe E2, war auf einer Breite von 7.2 m ein durchschnittlich 0.10 m dicker Betonbelag eingebracht. Die restliche Breite der Fahrbahnplatte war mit Betonwürfeln belastet, so dass die Massenverteilung über den Querschnitt konstant war.

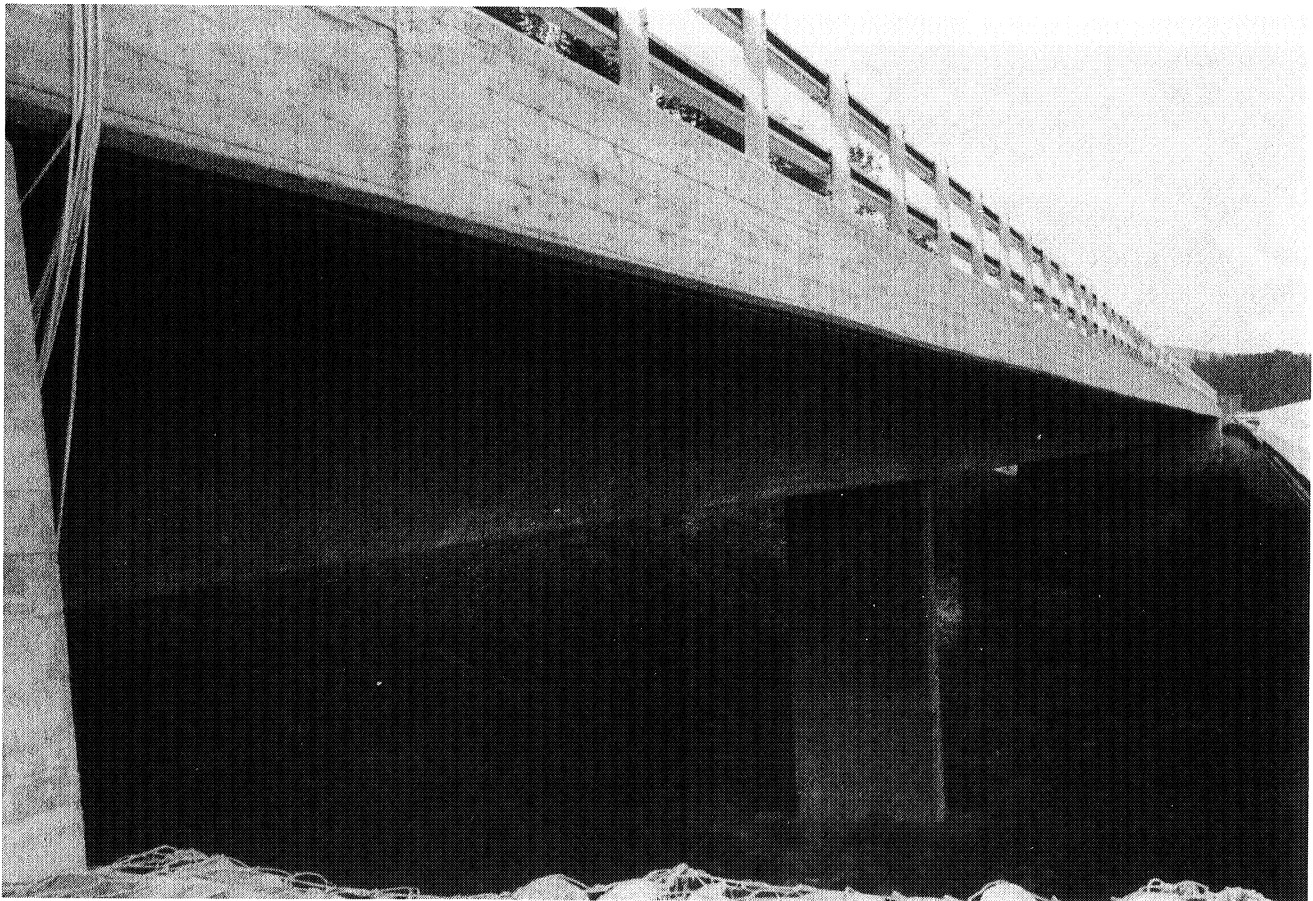
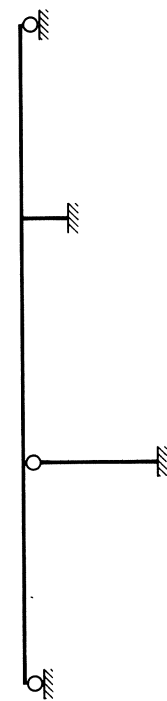
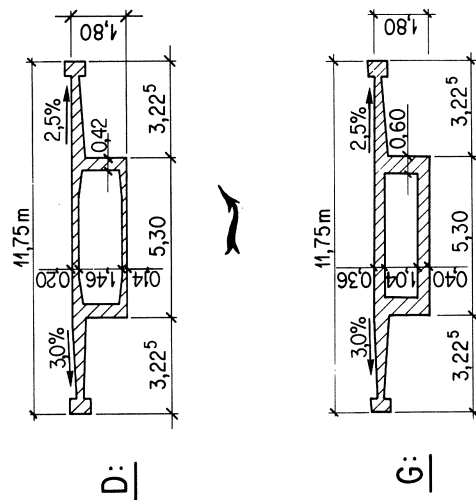
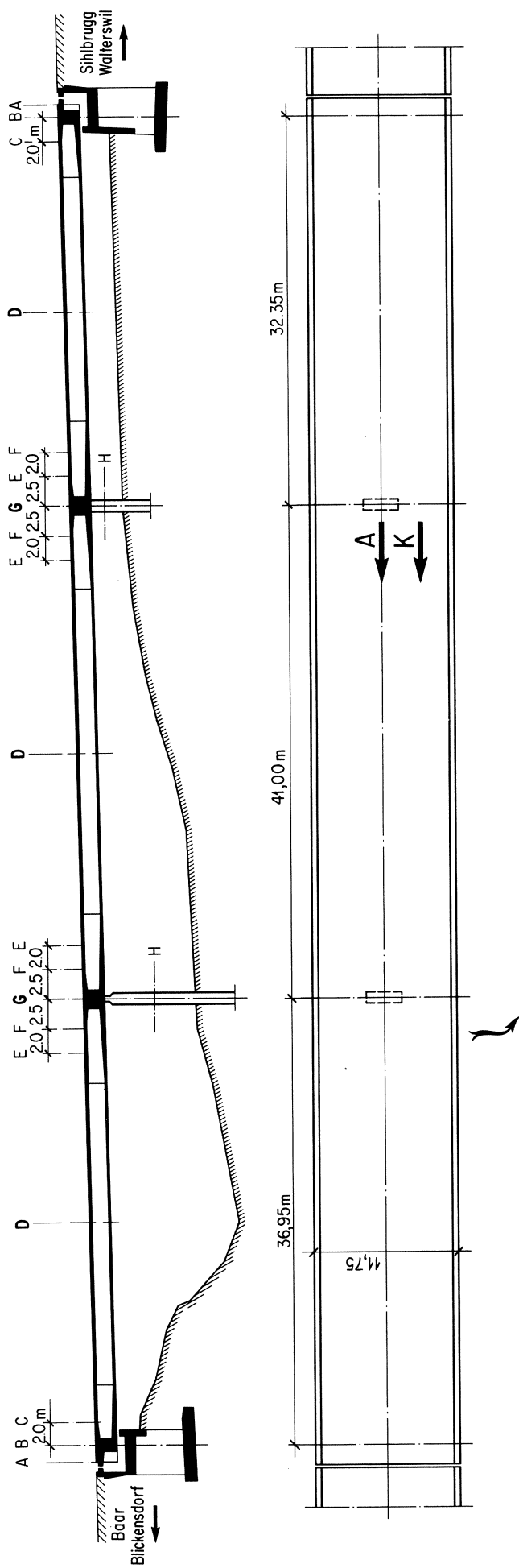


Bild 71: Die Bergspurbrücke Deibüel bei Baar/ZG von der Unterwasserseite her; Blick gegen die Fahr- richtung.



Belag: 4.0m * 0.06m: m = 0.60 t/m'
7.2m * 0.10m: m = 1.80 t/m'

	A	B	C	D	E	F	G	H
I [m ⁴]	2.42	3.23	2.93	2.17	2.64	2.97	3.18	0.182
A [m ²]	6.09	8.12	7.04	5.69	6.30	6.90	7.71	2.70
m [t/m']	15.2	20.3	17.6	14.2	15.7	17.2	19.3	0.675

Bild 72: Geometrie und statisches System der Bergpurbrücke Deibüel. Zusätzlich sind die Querschnittswerte Trägheitsmoment I, Fläche A und Massenbelegung m (ohne Belag) angegeben.

2.6 Das dynamische Uebertragungsverhalten der Deibüel-Brücke

2.61 Analytische Bestimmung der Eigenschwingungen

Um einen Eindruck vom zu erwartenden Schwingungsverhalten der Bergspurbrücke Deibüel zu erhalten, wurden ihre Eigenfrequenzen und -formen mit Hilfe eines Computers berechnet. SMIS-2 war damals das einzige der an der ETH-Zürich installierten Programme, das für solche Berechnungen eingesetzt werden konnte. Als sein wichtigster Nachteil erwies sich die Tatsache, dass die ermittelten Eigenformen nicht grafisch, sondern in Form endloser Tabellen ausgegeben werden. Die für die Berechnung erforderlichen Angaben über die Tragstruktur (statisches System, Querschnittswerte, Massenverteilung) wurden vom Projektverfasser, Ingenieurbüro Stucki + Hofacker, Zürich, zur Verfügung gestellt (Bild 72). Aus den statischen Versuchen an der Brücke hatte sich ergeben, dass der Elastizitätsmodul des Betons für ruhende Lasten rund $E = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ beträgt [7]. Dieser Wert wurde auch für die dynamischen Berechnungen übernommen.

Die topologischen Modelle der Brücke, die für die Berechnungen im Längs- und im Quersinn benützt wurden, sind in Bild 73 dargestellt. Das Modell in Längsrichtung wies 44 Balkenelemente und 45 Knoten bzw. 135 Freiheitsgrade auf, jenes in Querrichtung 26 Elemente und 26 Knoten oder 78 Freiheitsgrade. Beide Modelle waren eben, was zur Folge hatte, dass zum Beispiel über Torsions-Eigenschwingungen keine Informationen zu erwarten waren.

In Längsrichtung ergab die Berechnung zwischen 0 Hz und 20 Hz neun verschiedene Eigenschwingungen, deren Frequenzen und Formen für die Brücke ohne Belag in Bild 74 dargestellt sind. Neben den vertikalen modalen Amplituden sind ebenfalls die horizontalen Amplituden in Brückenlängsrichtung angegeben. Diese gelten exakt für den Punkt mit der jeweils grössten vertikalen Amplitude, variieren aber über die Brückenlänge im allgemeinen nicht stark. Als Vergleich sind in Bild 76 die für die Brücke mit den verschiedenen aktuellen Belagszuständen errechneten Eigenfrequenzen angegeben. Der Belag wurde dabei lediglich als zusätzliche tote Masse in die Rechnung eingeführt. Bild 76 enthält auch Angaben über den Einfluss des E-Moduls auf die Frequenzen.

Die Berechnung in Querrichtung ist nicht so einfach wie diejenige im Längssinn. Indem die Untersuchung an einem Brückenabschnitt von beispielsweise 1 m Länge durchgeführt wird, vernachlässigt man den Einfluss benachbarter Brückenabschnitte. Mit anderen Worten: Das gewählte Querschnittsmodell liefert nur für jenen Schwingungszustand zutreffende Resultate, bei dem die unbelastete Brücke über ihre ganze Länge phasengleiche Querbiegeschwingungen ausführt. Angesichts der tatsächlich möglichen Anregungsmechanismen, die doch meist als mehr oder weniger punktförmig zu bezeichnen sind, müssen gewisse Zweifel an der praktischen Brauchbarkeit der so ermittelten Eigenfrequenzen und -formen angemeldet werden. Da es jedoch nur darum ging, Anhaltspunkte zu erhalten, wurde darauf verzichtet, eine aufwendige Analyse anhand eines dreidimensionalen Modelles durchzuführen.

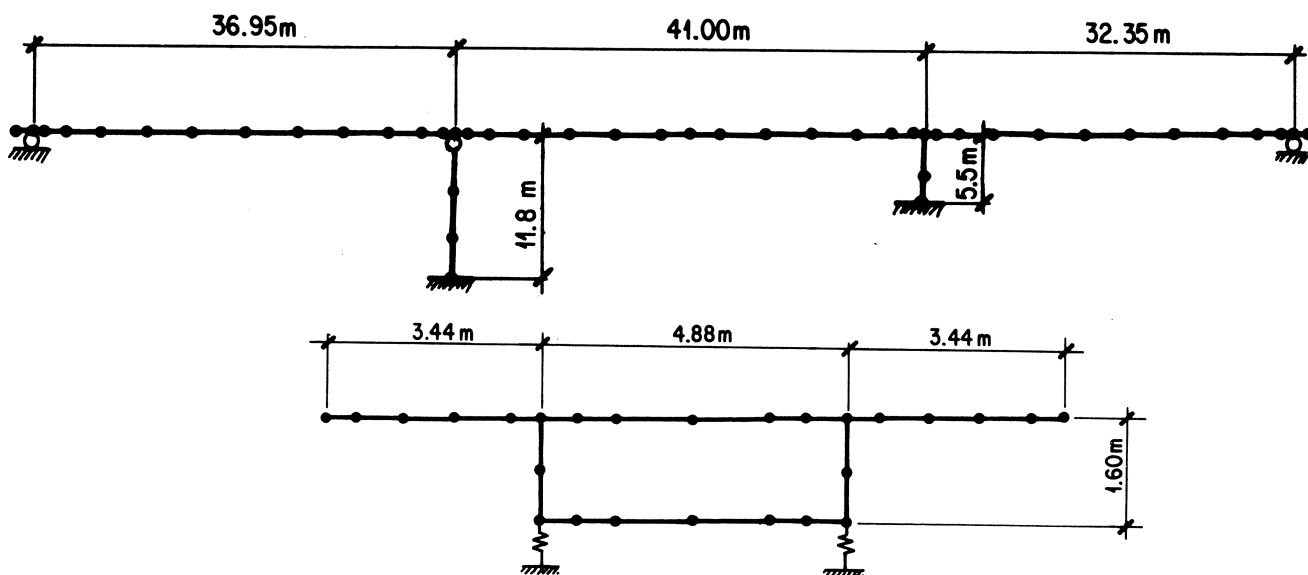


Bild 73: Topologie der für die Berechnung der Eigenschwingungen der Brücke verwendeten Modelle.

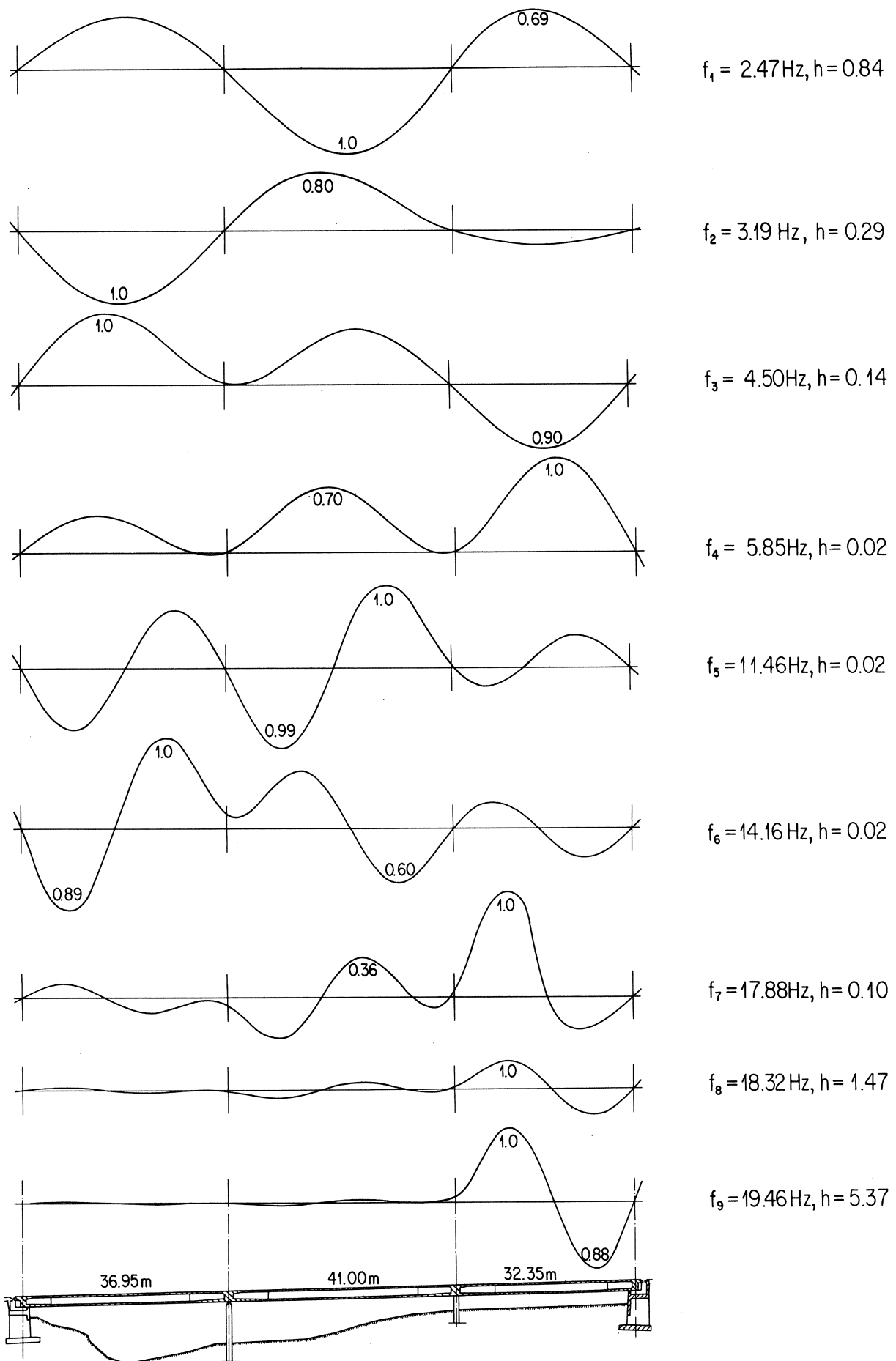
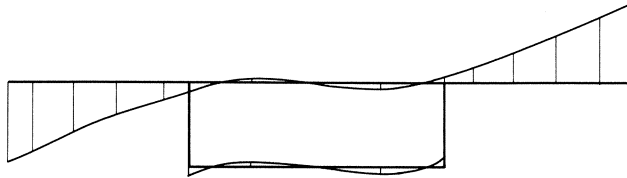


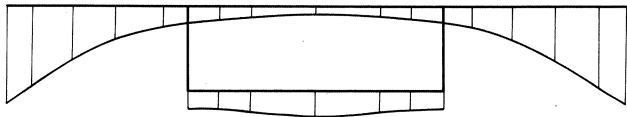
Bild 74: Frequenzen und Formen der ersten neun berechneten Längsbiege-Eigenschwingungen der Brücke. Die wichtigsten vertikalen und die horizontale modale Amplitude h sind angegeben.

Querschnitt Typ D
(mit Belag 0.1 m auf ganzer Fahrbahn)

Kastenstege elastisch gelagert: $k = 158 \text{ kN/mm}$

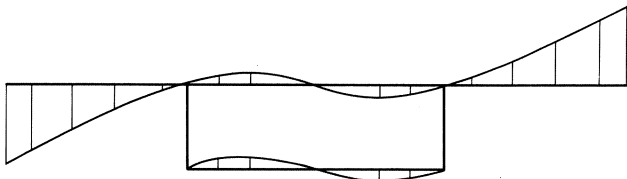


$f_1 = 8.06 \text{ Hz}$

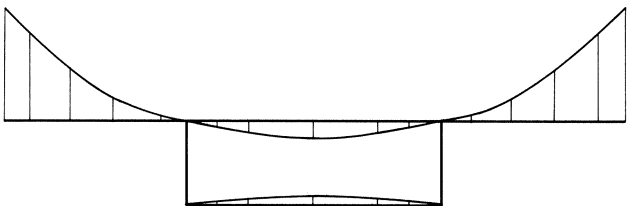


$f_2 = 14.82 \text{ Hz}$

Kastenstege starr gelagert



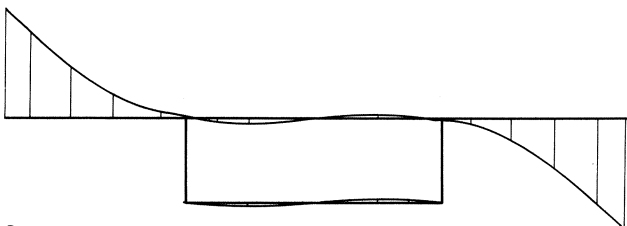
$f_1 = 9.34 \text{ Hz}$



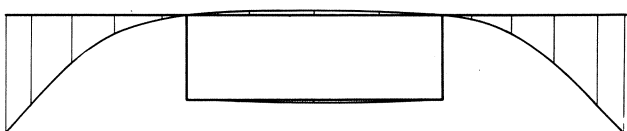
$f_2 = 16.81 \text{ Hz}$

Querschnitt Typ G
(mit Belag 0.1 m auf ganzer Fahrbahn)

Kastenstege starr gelagert



$f_1 = 16.44 \text{ Hz}$



$f_2 = 19.30 \text{ Hz}$

Bild 75: Frequenzen und Formen der berechneten Querbiege-Eigenschwingungen.

Bei der Berechnung eines Brückenabschnittes in Querrichtung war neben der Variabilität der Querschnittswerte auch jener der Auflagerbedingungen eine gewisse Aufmerksamkeit zu schenken. Da die Nachgiebigkeit der Kastenstege in vertikaler Richtung über die Brückenlänge variabel ist, sind die Auflagerbedingungen des Modelles gemäss Bild 73 nicht eindeutig definiert. Es mussten demnach mindestens zwei extreme Fälle untersucht werden: Vertikal unverschiebliche Kastenstege und vertikal elastisch gelagerte Kastenstege, wobei die Federsteifigkeit im zweiten Fall gleich dem aus den statischen Versuchen bekannten Wert für die Steifigkeit des Ueberbaus zu $k = 158 \text{ kN/mm}$ gewählt wurde.

Bild 75 gibt die Eigenfrequenzen und -formen für einen Feldquerschnitt Typ D (s. Bild 72) und die beiden extremen Auflagerbedingungen wieder. Der Einfluss der Lagersteifigkeit auf die Ergebnisse ist zwar beachtlich, nicht aber dramatisch. Der Querschnitt Typ G wurde, da im Stützenbereich gültig, nur mit starrer Lagerung untersucht (Bild 75). Da der Kasten hier sehr steif ausgebildet ist, ergaben sich doch wesentlich höhere Eigenfrequenzen als für Typ D.

Die numerischen Ergebnisse für alle untersuchten Längs- und Quermodelle sind in Bild 76 zusammengestellt. Es soll hier noch kurz der Frage nach dem Aufwand, der für die Bestimmung der Grundfrequenz einer Brücke notwendig ist, nachgegangen werden. Um vorerst beim Computer als Hilfsmittel zu bleiben: In einer früheren Berechnungsphase war für die Brücke in Längsrichtung ein Modell mit 18 anstelle von 135 Freiheitsgraden benützt worden. Die Rechenkosten mit dem Programm SMIS-2 betrugen rund Fr. 10.- anstelle von Fr. 500.-, und der Vergleich der Resultate ergibt folgendes Bild:

135 Freiheitsgrade	18 Freiheitsgrade
$f_1 = 2.47 \text{ Hz}$	$f_1 = 2.57 \text{ Hz}$
$f_2 = 3.19 \text{ Hz}$	$f_2 = 3.57 \text{ Hz}$
$f_3 = 4.50 \text{ Hz}$	$f_3 = 5.42 \text{ Hz}$
$f_4 = 5.85 \text{ Hz}$	$f_4 = 8.76 \text{ Hz}$
$f_5 = 11.46 \text{ Hz}$	$f_5 = 15.76 \text{ Hz}$
$f_6 = 14.16 \text{ Hz}$	$f_6 = 19.87 \text{ Hz}$
$f_7 = 17.88 \text{ Hz}$	$f_7 = 28.40 \text{ Hz}$
$f_8 = 18.32 \text{ Hz}$	$f_8 = 44.37 \text{ Hz}$
$f_9 = 19.46 \text{ Hz}$	$f_9 = 45.31 \text{ Hz}$

Während die Grundfrequenz f_1 für beide Modelle praktisch identisch ist, werden die Abweichungen mit zunehmender Ordnungszahl der Eigenfrequenz immer grösser. Interes-

siert man sich demnach nur für die Grundfrequenz, lohnt sich der Aufwand für ein detailliertes Modell nicht. Benötigt man dagegen auch Angaben über höhere Eigenfrequenzen, muss das Modell aufwendiger gestaltet werden. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass die Qualität der berechneten Eigenformen in einem engen Zusammenhang mit der Anzahl gewählter Freiheitsgrade steht. Die Berechnung liefert Informationen über die Eigenformen nur für die Knotenpunkte des Systems, im oben gewählten Beispiel mit 18

Freiheitsgraden oder 6 Knoten also nur für die 4 Auflagerpunkte und die beiden Kreuzungspunkte Stütze/Ueberbau. Damit erhält man natürlich kein Bild von den Eigenformen.

In [6] wird ein Verfahren erläutert, das die Abschätzung der Grundfrequenz von Durchlaufträgern mit Hilfe einer einfachen Handrechnung gestattet. Nimmt man die Querschnittswerte Typ D als über die ganze Feldlänge gültig an, erhält man für die Grundfrequenz einen Wert $f_1 = 2.46 \text{ Hz}$.

Längsbiegeschwingungen

	Fall A	Fall B	Fall C	Fall D
f_1	2.47	2.42	2.33	2.52 Hz
f_2	3.19	3.13	3.01	3.27 Hz
f_3	4.50	4.41	4.24	4.61 Hz
f_4	5.85	5.73	5.51	5.98 Hz
f_5	11.46	11.23	10.81	11.73 Hz
f_6	14.16	13.87	13.35	14.49 Hz
f_7	17.88	17.52	16.87	18.30 Hz
f_8	18.32	18.03	17.44	18.83 Hz
f_9	19.46	19.39	19.31	20.25 Hz

Fall A: Brücke ohne Belag $E = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
 Fall B: Brücke mit HMT-Belag $4.0 \cdot 0.08 \text{ m}$, $E = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
 Fall C: Brücke mit Betonbelag $8.25 \cdot 0.1 \text{ m}$, $E = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
 Fall D: Brücke mit HMT-Belag $4.0 \cdot 0.08 \text{ m}$, $E = 4.8 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Querbiegeschwingungen

	Fall E	Fall F	Fall G	Fall H	Fall I	Fall K
f_1	10.10	8.72	9.34	8.06	17.35	16.44 Hz
f_2	17.72	15.72	16.81	14.82	20.22	19.30 Hz
f_3	25.99	24.24	24.18	22.35	43.29	39.89 Hz

Fall E: Querschnitt Typ D, ohne Belag, starr gelagert
 Fall F: Querschnitt Typ D, ohne Belag, elastisch gelagert
 Fall G: Querschnitt Typ D, mit Betonbelag 0.1 m , starr gelagert
 Fall H: Querschnitt Typ D, mit Betonbelag 0.1 m , elastisch gelagert
 Fall I: Querschnitt Typ G ohne Belag, starr gelagert
 Fall K: Querschnitt Typ G, mit Betonbelag 0.1 m , starr gelagert
 Fälle E - K: $E = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Bild 76: Zusammenstellung der berechneten Eigenfrequenzen der Brücke für verschiedene Randbedingungen.

2.62 Experimentelle Bestimmung der Eigenschwingungen mittels harmonischer Anregung

a) Die Anregungsmethode

Für die Ermittlung der effektiven Eigenwerte der Bergspurbrücke Deibüel wurde ein servohydraulischer Schwingungserreger eingesetzt, der unabhängig von externen Strom- und Wasseranschlüssen ist und im wesentlichen aus den folgenden Teilen besteht:

- Ein hydrostatisch gelagerter Servozylinder Typ POKK/N, hergestellt von der Firma Schenck AG, Darmstadt, Nennkraft 10 kN bei einem Oeldruck nach dem Servoventil von 210 bar, Hub der Kolbenstange ± 50 mm. Der Zylinder ist vertikal auf einem Betonfundament mit einer Masse von rund 1.5 t montiert, auf seiner Kolbenstange wurden Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von 500 kg befestigt (Bild 77). Dieser Zylinder weist eine besonders stabile Kolbenstange auf und ist damit unempfindlich gegen Querkräfte, wie sie im Betrieb als Schwingungserreger nicht zu vermeiden sind.
- Ein zweistufiges Servoventil, hergestellt von der Firma Moog, Nenndurchfluss 16 l/min.
- Ein Drucköl-Aggregat mit einer Leistung von 19 l/min und einem maximalen Druck von 250 bar. Um die ganze Anlage feldtauglich zu machen, wurde die Öelkühlung von Wasser- auf Luftkühlung umgebaut.
- Ein 220-Volt-Strom-Dieselaggregat mit einer Leistung von 45 kVA.
- Elektronische Geräte: Funktionsgenerator, Messverstärker für den in der Kolbenstange angeordneten induktiven Wegaufnehmer, Regelkreis für die Regelung des Kolbenweges, Kathodenstrahloszilloskop für die Ueberwachung von Ist- und Sollwert-Signalen (Bild 78).

Die Anlage erlaubt es, eine dynamische Kraft $F_{\text{dyn}} = F_0 \cdot \sin \omega t$ in vertikaler Richtung auf die Unterlage des Schwingers aufzubringen. Im Frequenzbereich $2.3 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$ wird die maximal erreichbare Kraftamplitude durch die Kraftkapazität des Zylinders zu $F_0 = 5 \text{ kN}$ begrenzt. Bei einer Beschleunigung der Schwingermasse von 1 g addieren sich im unteren Umkehrpunkt der Bewegung die statische und die dynamische Wirkung der Masse zu $F_{\text{tot}} = 10 \text{ kN}$. Im praktischen Einsatz zeigte sich, dass die Kraftamplitude im Frequenzbereich $2.3 \text{ Hz} < f < 20 \text{ Hz}$ zu $F_0 = 4.93 \text{ kN}$ konstant gehalten werden konnte. Die zu einer bestimmten Erreger-

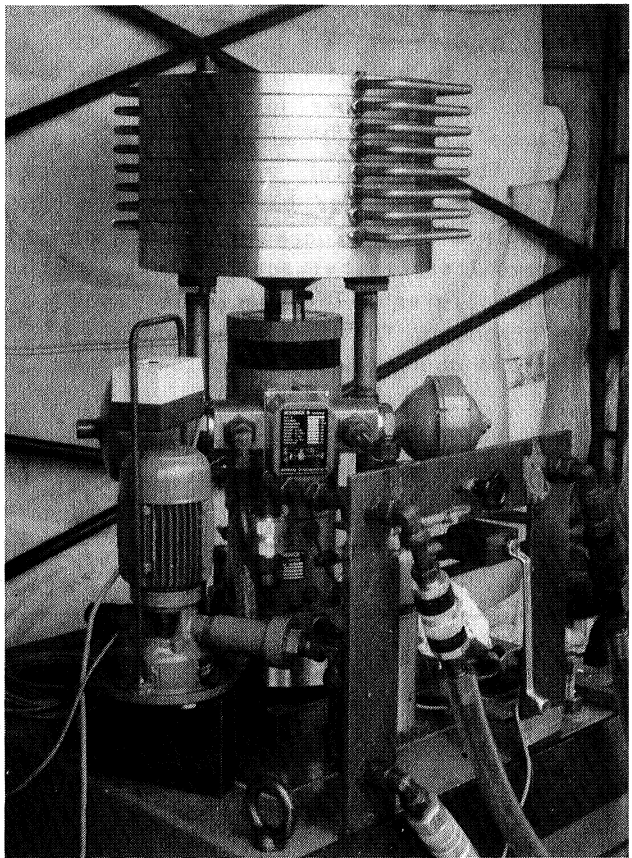


Bild 77: Detailaufnahme des servohydraulischen Schwingungserregers (hier in Transportstellung mit abgestützter Zusatzmasse).

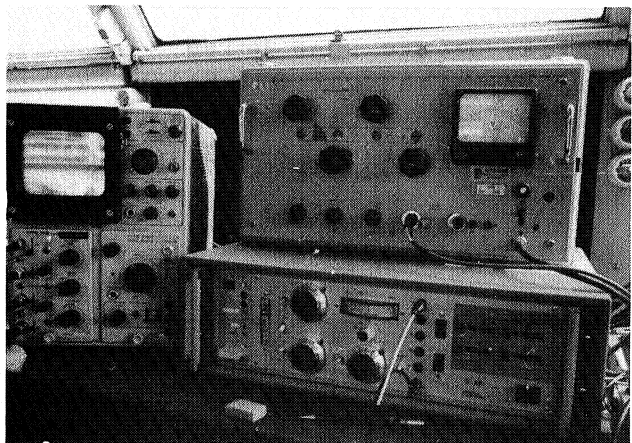


Bild 78: Funktionsgenerator, Regelverstärker (rechts) und Kathodenstrahloszilloskop (links). Sie wurden für die Erzeugung des Sollwertes bzw. für die Ueberwachung von Ist- und Sollwert eingesetzt.

frequenz und einer Beschleunigung von 1 g gehörende Kolbenamplitude kann berechnet und am Sollwertgenerator eingestellt werden. Für Frequenzen $f < 2.3 \text{ Hz}$ nimmt die maximal erreichbare Kraftamplitude bei voll ausgenütztem Kolbenhub quadratisch mit sinkender Frequenz ab.

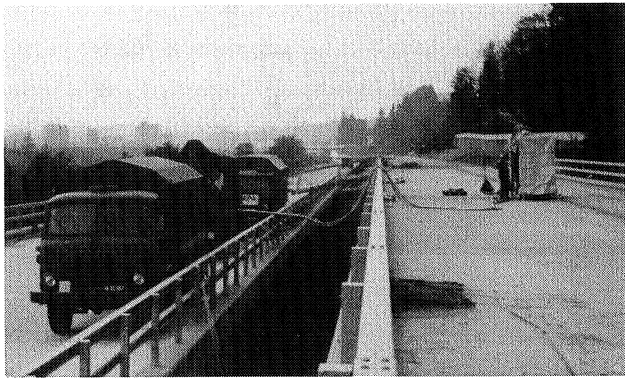


Bild 79: Die Infrastruktur auf der Talspur-, der Schwingungserreger auf der Bergspurbrücke (rechts).

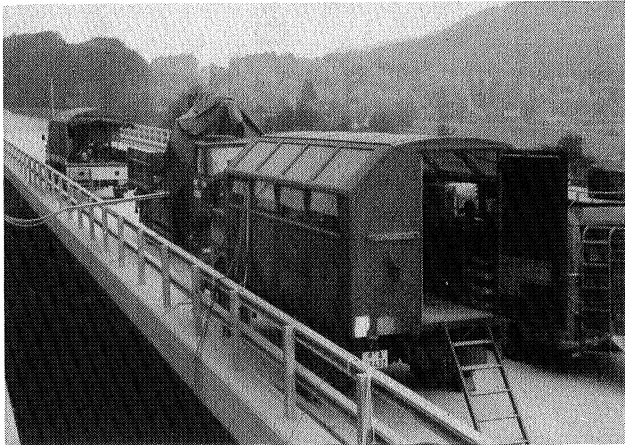


Bild 80: Drei schwere Fahrzeuge werden für den Transport der Infrastruktur benötigt (von links): Die Lastwagen mit dem Dieselaggregat für die Stromerzeugung und dem Druckölaggregat sowie der Messwagen.

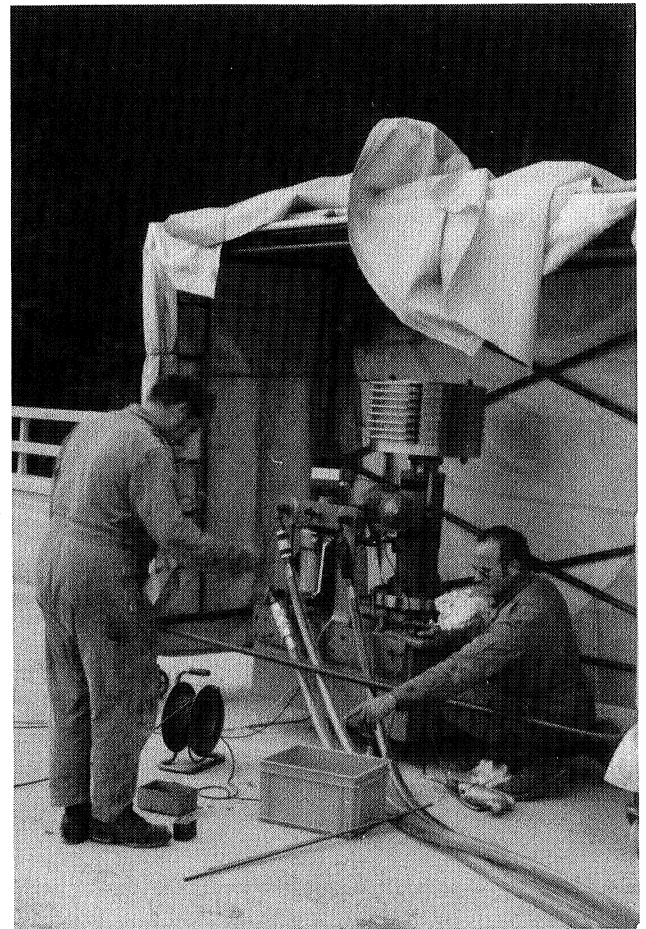


Bild 81: Einrichten des Schwingungserregers auf der Brücke.

d) Die Versuchsreihe E1

Das Uebertragungsverhalten der Bergspurbrücke Deibüel wurde erstmals im Mai 1977 experimentell untersucht. In dieser mit E1 bezeichneten Versuchsreihe wurde der Schwinger in sechs verschiedenen Punkten auf die Brückenfahrbahn gestellt. Sowohl die Lage dieser Punkte als auch die Anordnung der Messinstrumente an der Brücke waren auf die Ergebnisse der vorgenannten theoretischen Berechnungen abgestimmt worden. Die gesamte für den Betrieb des Schwingers und die Erfassung der Messdaten notwendige Infrastruktur: Strom- und Druckölaggregat, Messzentrale sowie zugehörige Fahrzeuge, wurden auf der Talspurbrücke aufgestellt und durch Leitungen mit dem auf der Brücke stehenden Schwinger verbunden (Bilder 79 bis 81). Dadurch konnte verhindert werden, dass das dynamische Verhalten des Versuchsobjektes durch zusätzliche Massen oder durch systemfremde Schwingungen beeinflusst wurde.

Bild 82 zeigt die Instrumentierung der Brücke. Insgesamt wurden 18 Messstellen zur Erfassung der Durchbiegung der Brücke und 13 Messstellen zur Erfassung der Dehnung von Bewehrungsstählen eingerichtet. Auf technische Details wird im Abschnitt 3.3, "Die Instrumentierung der Brücke", eingegangen. Von diesen Messstellen wurden jeweils maximal 16 beobachtet, was der damals verfügbaren Kapazität der Aufzeichnungsvorrichtungen entsprach (s. Abschnitte 3.4 und 3.5, "Datenaufzeichnung" und "Auswertemethoden"). Die Versuchsreihe E1 umfasste sechs Versuche, die entsprechend der jeweils gültigen Schwingerstellung mit S1, S3, S4, S10, S11 und S12 bezeichnet werden. Die Stellungen des Schwingers auf der Brücke und die Liste der jeweils registrierten Messsignale sind in Bild 83 angegeben.

Bei den Versuchen S1, S3 und S4 war der Schwinger über der Brückenlängsachse in den Messschnitten 1, 3 und 4 aufgestellt. Die

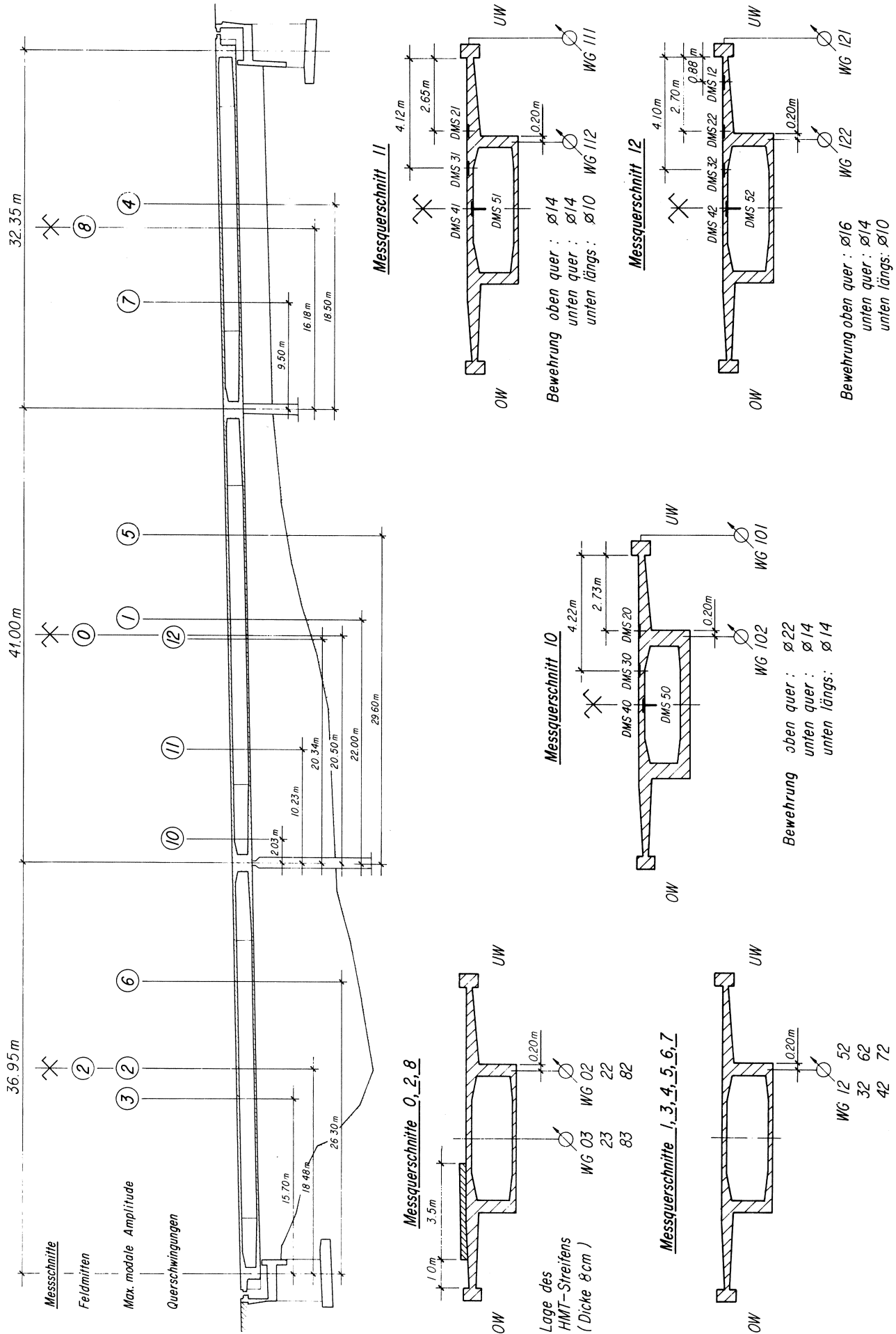


Bild 82: Anordnung der Messschnitte und Messinstrumente (Versuchsreihe E1).

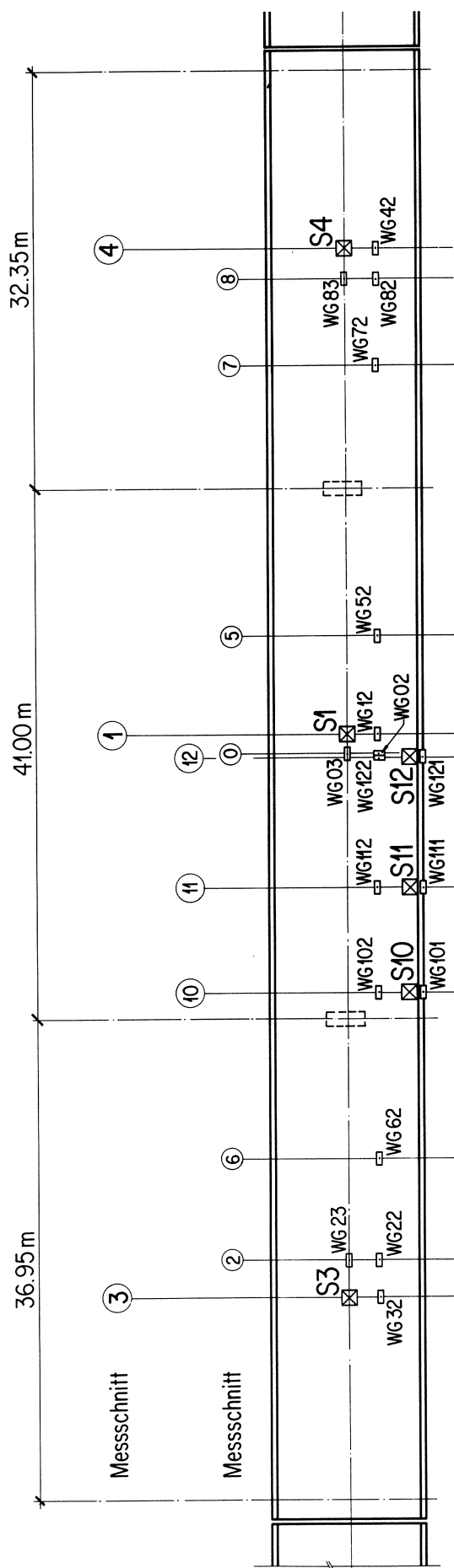


Bild 83a: Anordnung der Schwingerstellungen

Schnitte entsprechen den Orten der theoretisch ermittelten maximalen modalen Amplitude für die ersten vier Längsbiegeschwingungen (in der Folge abgekürzt auch als L-Schwingungen bezeichnet). Mittels eines leichten Stahleinbaus im Kasteninnern wurde verhindert, dass über die Fahrbahnplatte Querbiegeschwindigkeiten (Q-Schwingungen) angeregt werden konnten. Da sich aus der Position des Schwingers ergab, dass ebenfalls nicht mit der Anregung von Torsionsschwingungen (T-Schwingungen) zu rechnen war, wurde die Instrumentierung bezüglich Durchbiegungen auf die Messlinie 2 längs der Brücke, den unterwasserseitigen Kastensteg konzentriert. In drei Punkten beobachtete man die Durchbiegung auf der Messlinie 3, d.h. in der Mitte der Druckplatte des Kastens.

Für die Versuche S10, S11 und S12 mit exzentrischer Anordnung des Schwingers auf der Brücke wurden im jeweiligen Messschnitt 10, 11 oder 12 neben der Durchbiegung im Anregungspunkt, d.h. auf der Messlinie 1 am unterwasserseitigen Konsolkopf, die Dehnungsmessstellen beobachtet. Die vorgenannten Durchbiegungen auf den Linien 2 und 3 wurden soweit als möglich ebenfalls bestückt.

Die Durchführung der Versuche erfolgte derart, dass am Funktionsgenerator die gewünschte Frequenz der Sinusschwingung und am Sollwertsteller die zugehörige Amplitude eingestellt wurden. Nach Abklingen des Einschwingvorganges, der zwischen 5 Sekunden und fast einer Minute in Anspruch nahm, wurden die Brückenreaktionen während rund 10 bis 20 Sekunden aufgezeichnet. Anschliessend wurde die nächste Frequenz eingestellt und der ganze Vorgang wiederholt. Die Auflösung des Funktionsgenerators betrug $\Delta f = 0.01 \text{ Hz}$

PCM-Kanal	S1, S3, S4	S10	S11	S12
1	WG 23	WG 101	WG 111	WG 121
2	WG 32	WG 32	WG 32	WG 32
3	WG 22	WG 22	WG 22	WG 22
4	WG 62	WG 62	WG 62	WG 62
5	WG 03	WG 102	WG 112	WG 122
6	WG 02	WG 02	WG 02	WG 03
7	WG 12	WG 12	WG 12	WG 12
8	WG 52	WG 52	WG 52	WG 52
9	WG 83	-----	-----	DMS 12
10	WG 72	WG 72	WG 72	WG 72
11	WG 82	WG 82	WG 82	WG 82
12	WG 42	WG 42	WG 42	WG 42
13	DMS 50	DMS 50	DMS 51	DMS 52
14	DMS 51	DMS 40	DMS 41	DMS 42
15	DMS 52	DMS 30	DMS 31	DMS 32
16	DMS 22	DMS 20	DMS 21	DMS 22

Bild 83b: Instrumentierung, wie sie für die Versuchsreihe E1 verwendet wurde.

für $0 \text{ Hz} < f < 9.99 \text{ Hz}$ und $\Delta f = 0.1 \text{ Hz}$ für $10 \text{ Hz} < f < 20 \text{ Hz}$. Der Verlauf der Brückendurchbiegung im Einwirkungspunkt des Schwingers wurde mit Hilfe eines Kathodenstrahloszilloskopes kontinuierlich überwacht. Die Abstände der einzelnen gemessenen Frequenzpunkte konnten so den Erfordernissen angepasst werden. Aus Zeitgründen konnte der Frequenzbereich nur in einer Richtung durchfahren werden: Grundsätzlich wurde bei 0.2 Hz begonnen und bei 20 Hz aufgehört.

Da die entsprechenden gerätetechnischen und analytischen Methoden zum Zeitpunkt der Versuche, 1977, noch nicht verfügbar waren, stand die Durchführung einer eigentlichen Modalanalyse der Struktur damals nicht zur Diskussion. Die servohydraulische Anlage erlaubte es, die auf die Brücke ausgeübte Kraftamplitude in einem weiten Frequenzbereich konstant zu halten, so dass darauf verzichtet wurde, diese Kraft zu messen und aufzuzeichnen. Es war deshalb nicht möglich, mit Hilfe der auf Magnetband aufgezeichneten Signale nachträglich eine Modalanalyse durchzuführen. Dies wäre angesichts der relativ geringen Instrumentierungsdichte auch nicht sinnvoll gewesen. (Das Thema "Optimale Anordnung von Messpunkten" wird noch Gelegenheit zu Diskussionen bieten.)

Aehnlich wie bei der Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Versuchsfahrzeuge wurde auch hier darauf verzichtet, die Phasenbeziehung zwischen Anregung und Strukturantwort zu bestimmen. Die Resultate liefern deshalb nur Angaben bezüglich der Magnitude der Systemantwort in Funktion der Anregungsfrequenz. Da es sich als schwierig erwies, die Werte der verschiedenen Brückenreaktionen auf die statische Einwirkung einer Masse von 493 kg experimentell zu bestimmen, werden die Resultate statt in der an sich erwünschten Form der Vergrößerungsfunktion (= Verhältnis Spitzenwert der dynamischen Amplitude/statische Reaktion) als Spitzenwert der Schwingbreite oder Doppelamplitude angegeben. Der Einfachheit halber wird aber in diesem Abschnitt trotzdem der Begriff "Amplitude" benutzt.

In den Bildern 84 und 85 ist die Übertragungsfunktion in Form des Verlaufes der Durchbiegungsamplituden im Anregungspunkt über der Anregungsfrequenz für alle sechs Schwingerpositionen grafisch dargestellt. Der Verlauf der Amplitude der Stahldehnung im Einspannquerschnitt des Kragarmes für die drei exzentrischen Anregungspunkte S10, S11 und S12 ist im Bild 86 wiedergegeben.

Für Frequenzen $f < 2.3 \text{ Hz}$ wurden die gemessenen Amplituden entsprechend dem Abfall der einwirkenden Kraftamplitude mit einem Korrekturfaktor multipliziert.

c) Die Versuchsreihe E2

Vor der detaillierten Diskussion der Ergebnisse der Versuchsreihe E1 wird nachfolgend die weitgehend analoge Versuchsreihe E2 beschrieben. Diese im Juli 1978, zwischen den Hauptversuchsreihen V4 und V3, durchgeführte Reihe E2 wurde als notwendig erachtet, weil der strukturelle Zustand der Deibüel-Brücke zwischen E1 und den Hauptversuchen durch Einbringen des Versuchsbelages verändert worden war. Grundsätzlich wurde bei E2 genau gleich vorgegangen wie bei E1. Es ist jedoch auf einige Änderungen bei den Randbedingungen hinzuweisen.

Aus Zeitgründen wurde bei E2 die Anzahl der Schwingerstellungen von sechs auf vier reduziert (S1, S10, S11, S12). Während bei E1 maximal 16 Messstellen beobachtet werden konnten, war dies bei E2 für 24 Stellen möglich. Bei E1 war die Anordnung der Messpunkte auf die Erfassung der Formen von Längs- und Querbiege-Eigenschwingungen ausgerichtet. Dagegen wurde bei E2 die Instrumentierung benutzt, wie sie für die Hauptversuche Verwendung fand. Sie ist im Bild 136, Abschnitt 3.3, "Die Instrumentierung der Brücke", dargestellt. Bild 87 zeigt die Listen der bei E2 eingesetzten Instrumente.

Der Verlauf der Durchbiegungsamplituden im jeweiligen Anregungspunkt über der Frequenz ist für alle vier Schwingerstellungen in den Bildern 88 und 89a grafisch dargestellt. Bild 89b zeigt analoge Übertragungsfunktionen für einige weitere Messpunkte.

Die weitere Auswertung der Versuchsreihen E1 und E2 erfolgte derart, dass für alle in den Übertragungsfunktionen erkennbaren markanten Spitzen die gemessenen Zeitsignale untersucht wurden. Dabei wurde zunächst festgestellt, ob die Brückenreaktion ein einfach harmonisches Bild biete. Falls dies zutraf, erfolgte anschliessend die Bestimmung der gegenseitigen Amplituden- und Phasenbeziehungen der Signale und die grafische Darstellung der daraus ermittelten Eigenformen. Wenn möglich, wurde aus diesen Formen der Schwingungstyp bestimmt. Mit zunehmender Frequenz und damit mit zunehmender Komplexität der Formen und abnehmender Intensität der Brückenreaktionen bereitete dies immer grössere Schwierigkeiten.

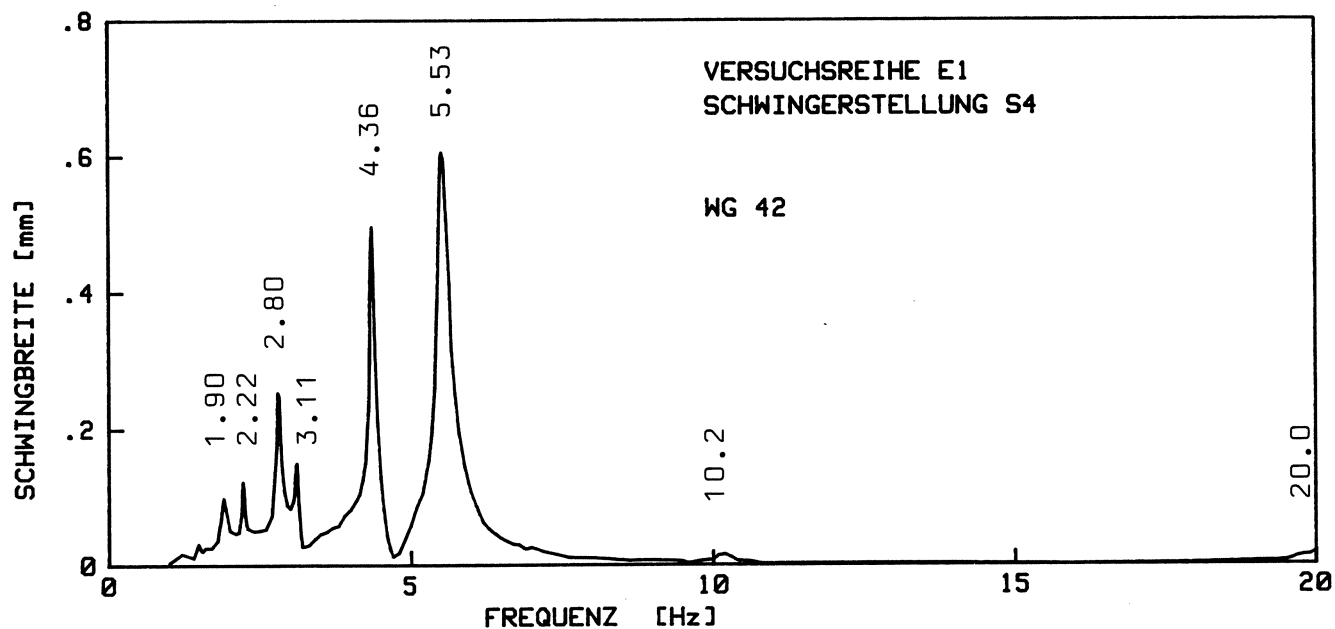
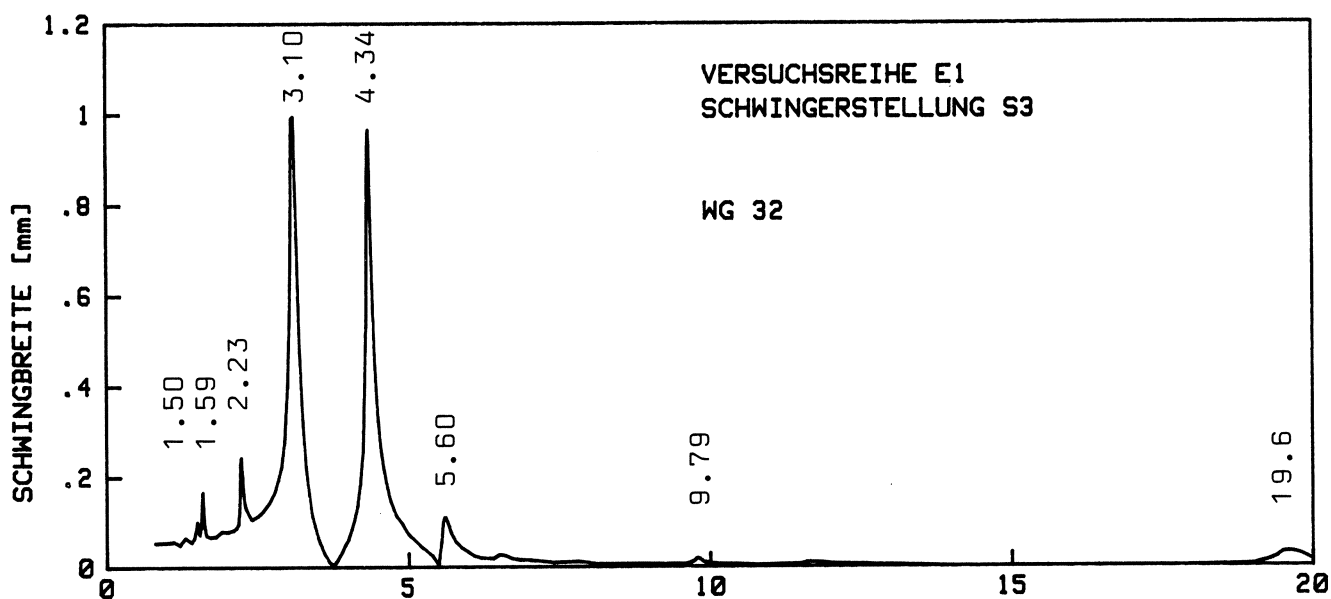
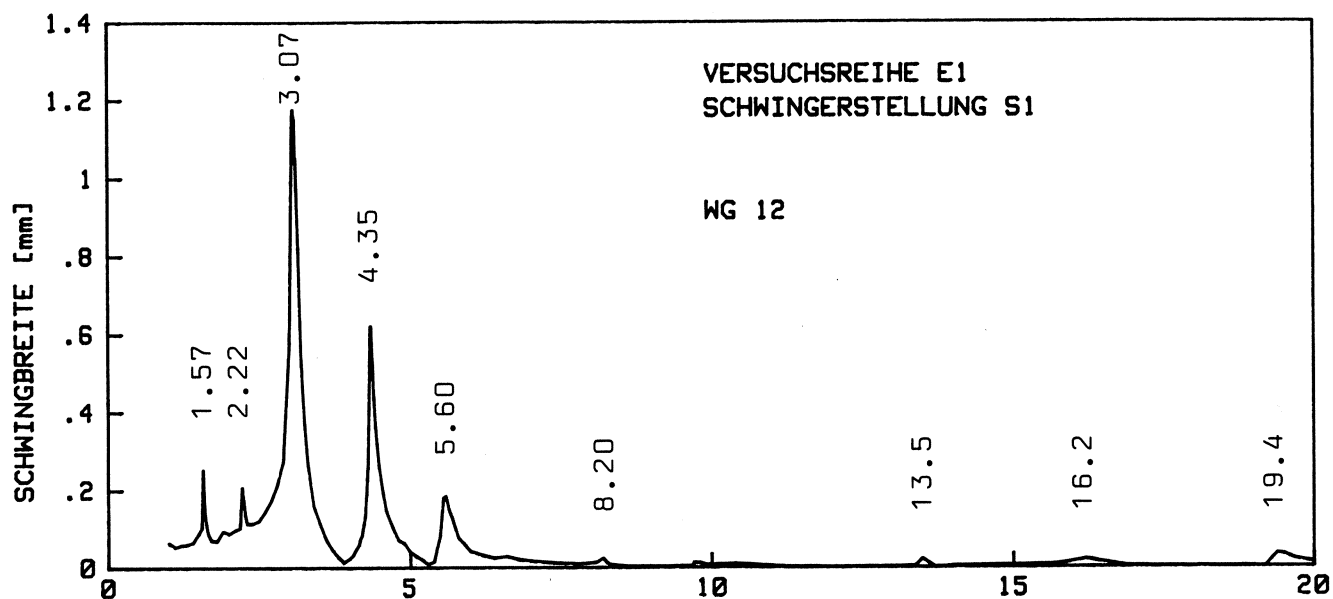


Bild 84: Uebertragungsfunktionen der Brücke für die Versuchsreihe E1 und die Schwingerstellungen S1, S3 und S4 (Durchbiegungen).

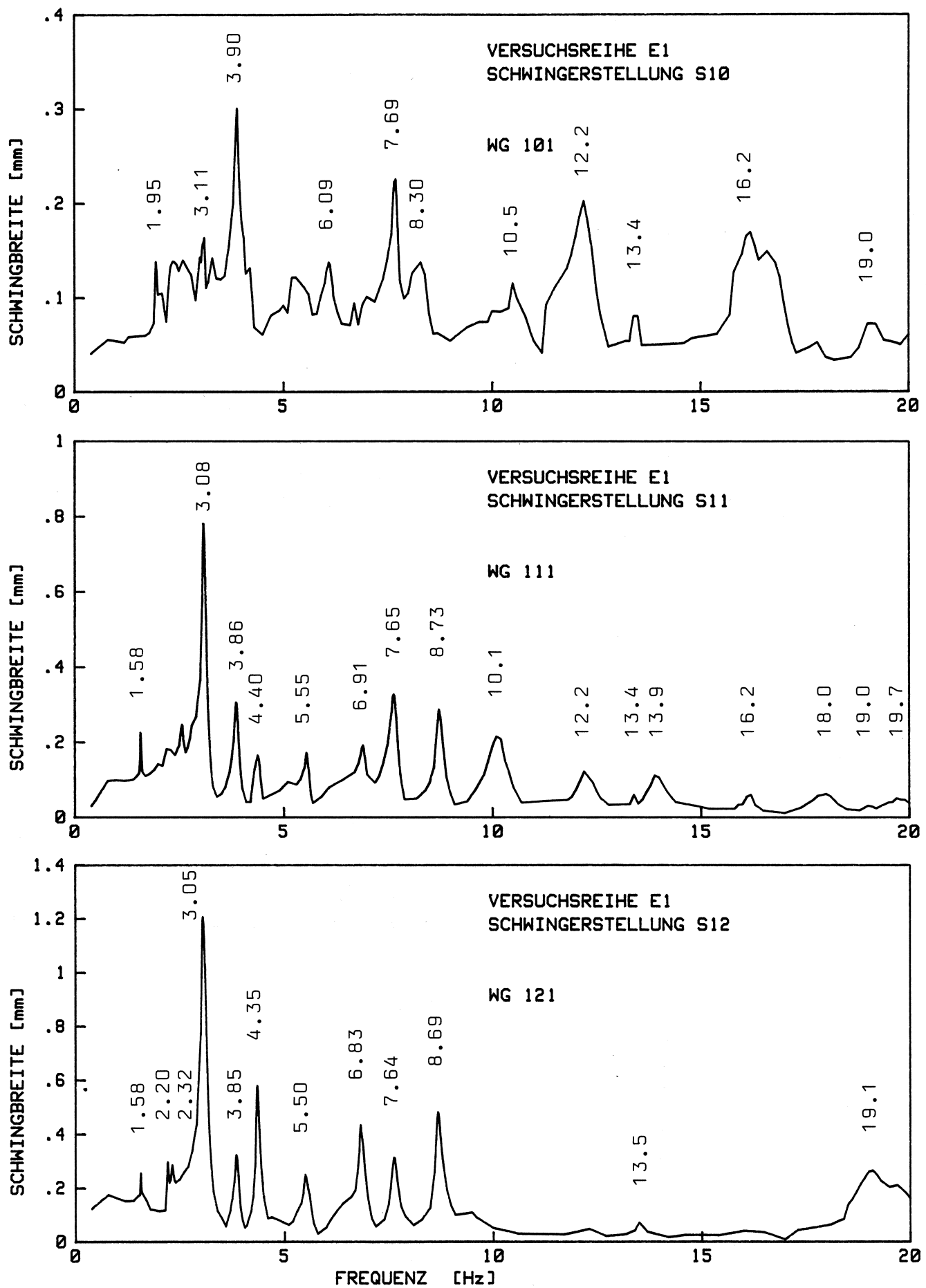


Bild 85: Uebertragungsfunktionen der Brücke für die Versuchsreihe E1 und die Schwingerstellungen S10, S11 und S12 (Durchbiegungen).

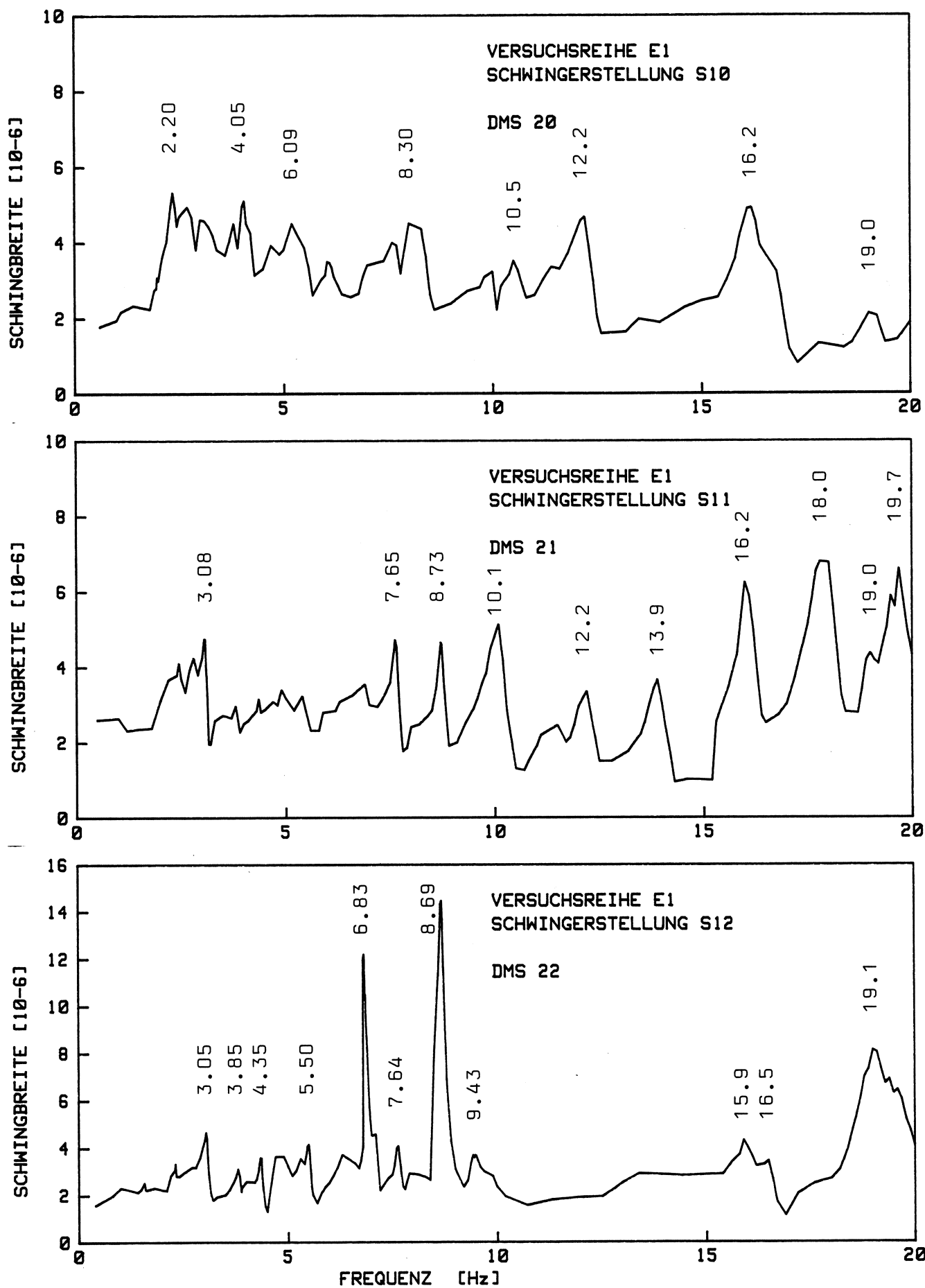


Bild 86: Uebertragungsfunktionen der Brücke für die Versuchsreihe E1 und die Schwingerstellungen S10, S11 und S12 (Dehnungen).

PCM-Kanal	S 1	S10	S11	S12
1	WG 82	WG 82	WG 82	WG 82
2	WG 84	WG 84	WG 84	WG 84
3	WG 01	WG 01	WG 01	WG 01
4	WG 02	WG 02	WG 02	WG 02
5	WG 04	WG 04	WG 04	WG 04
6	WG 05	WG 105	WG 115	WG 05
7	WG 22	WG 22	WG 22	WG 22
8	WG 24	WG 24	WG 24	WG 24
9	WG 112	WG 112	WG 112	WG 112
10	WG 52	WG 52	WG 52	WG 52
11	WG 62	WG 62	WG 62	WG 62
12	DMS 52	DMS 52	DMS 52	DMS 52
13	DMS 50	DMS 50	DMS 50	DMS 50
14	DMS 41	DMS 40	DMS 41	DMS 32
15	DMS 51	DMS 30	DMS 51	DMS 42
16	WG 72	WG 72	WG 72	WG 72
17	DMS 31	DMS 31	DMS 31	DMS 31
18	WG 111	WG 111	WG 111	WG 111
19	WG 101	WG 101	WG 101	WG 101
20	WG 102	WG 102	WG 102	WG 102
21	DMS 22	DMS 22	DMS 22	DMS 22
22	DMS 21	DMS 21	DMS 21	DMS 21
23	DMS 20	DMS 20	DMS 20	DMS 20
24	Verschiebung des Servozylinders (Kolbenweg)			

Bild 87: Instrumentierung, wie sie für die Versuchsreihe E2 verwendet wurde.

d) Allgemeines zu den Resultaten

Die Resultate sind für E1 in Bild 90 und für E2 in Bild 91 zusammengestellt. Im Rahmen einiger allgemeiner Bemerkungen ist zunächst festzustellen, dass nicht jede relative Spitze in den Uebertragungsfunktionen einer Eigenschwingung entspricht. Falls die Brücke in einem bestimmten Frequenzbereich keine Eigenschwingung aufweist, die Anregungsfrequenz aber gerade gleich der Hälfte oder auch einem Drittel oder Viertel einer höheren Eigenfrequenz ist, nimmt die Brückenreaktion überdurchschnittlich stark zu. Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn die so angeregte Eigenschwingung im Anregungspunkt eine deutlich von Null verschiedene modale Amplitude aufweist (was natürlich auch für die direkte Anregung einer Eigenschwingung notwendig ist). Solche "parasitären Spitzen" in der Uebertragungsfunktion

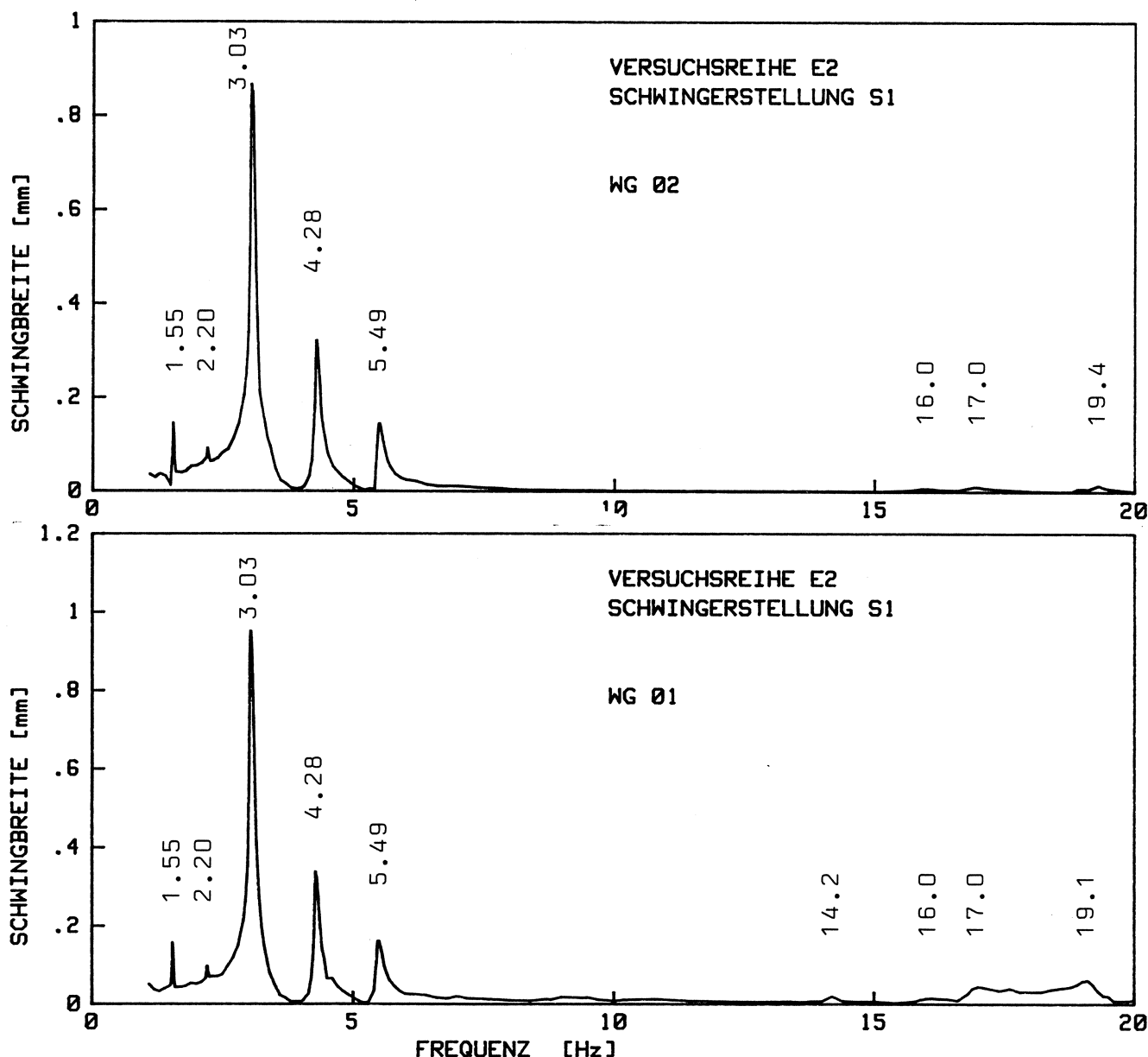


Bild 88: Uebertragungsfunktionen der Brücke für die Versuchsreihe E2 und die Schwingerstellung S1.

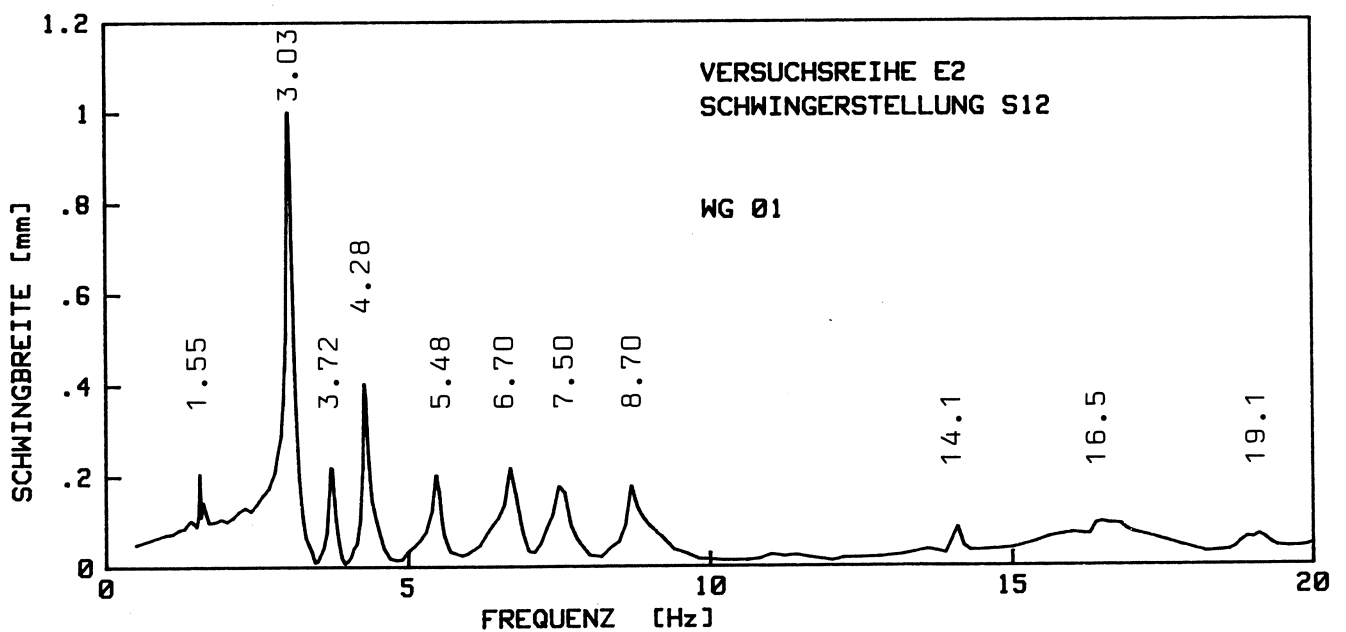
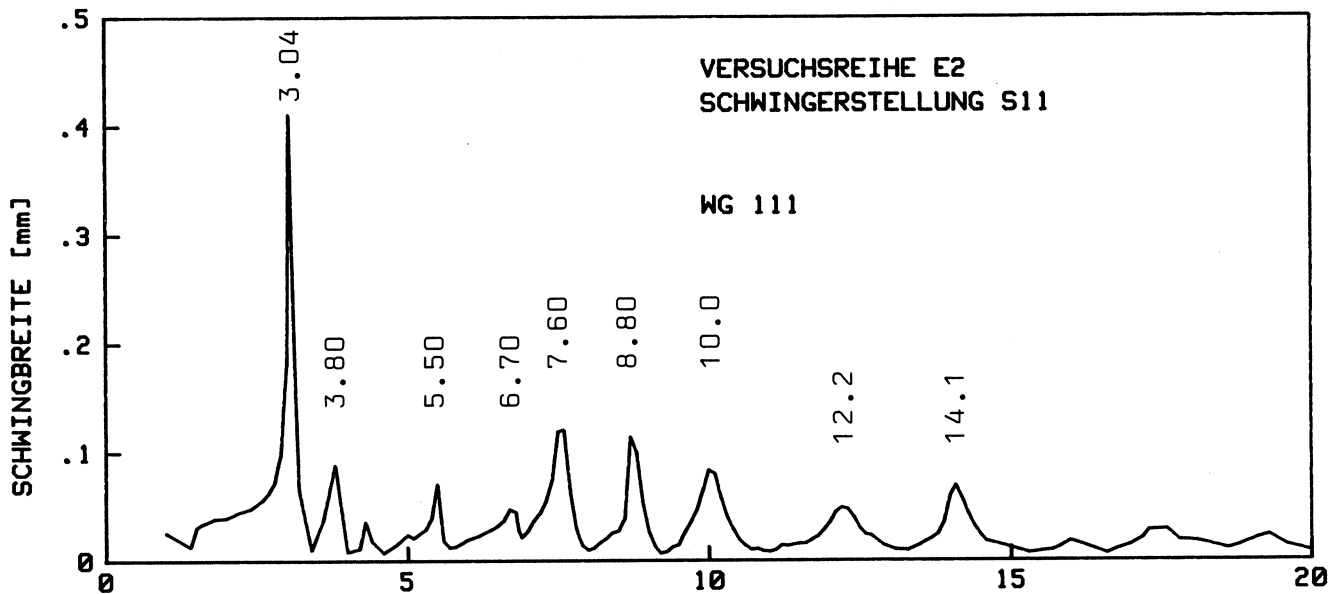
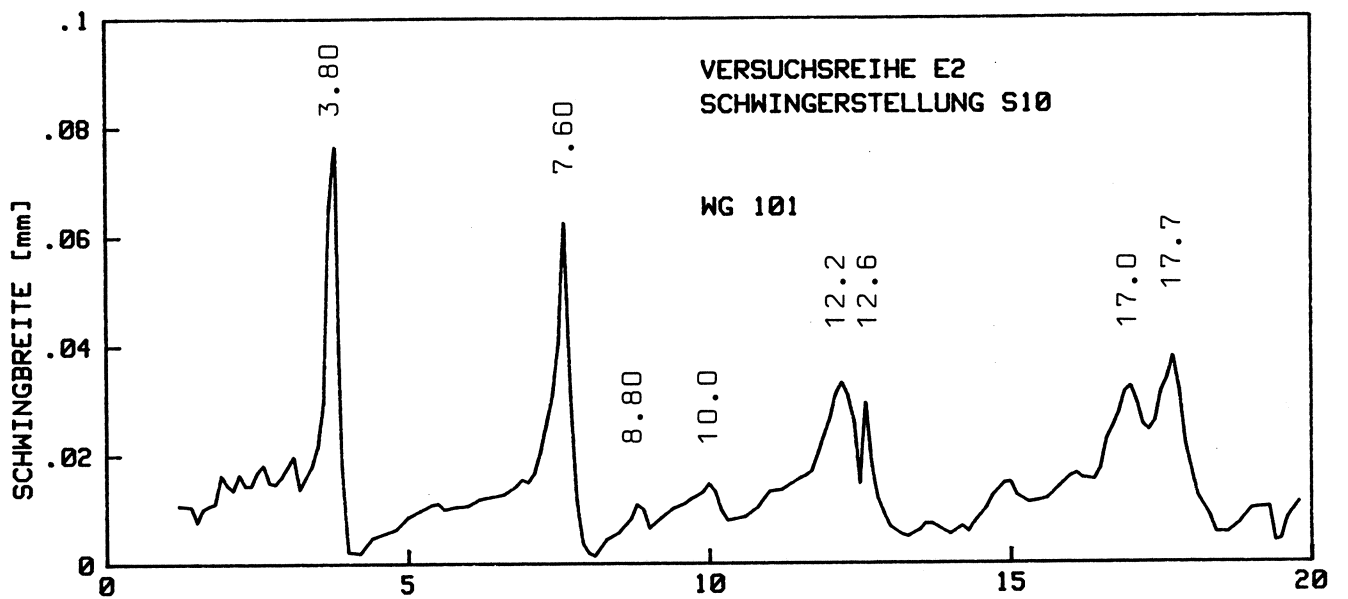


Bild 89a: Übertragungsfunktionen der Brücke für die Versuchsreihe E2 und die Schwingerstellungen S10, S11 und S12.

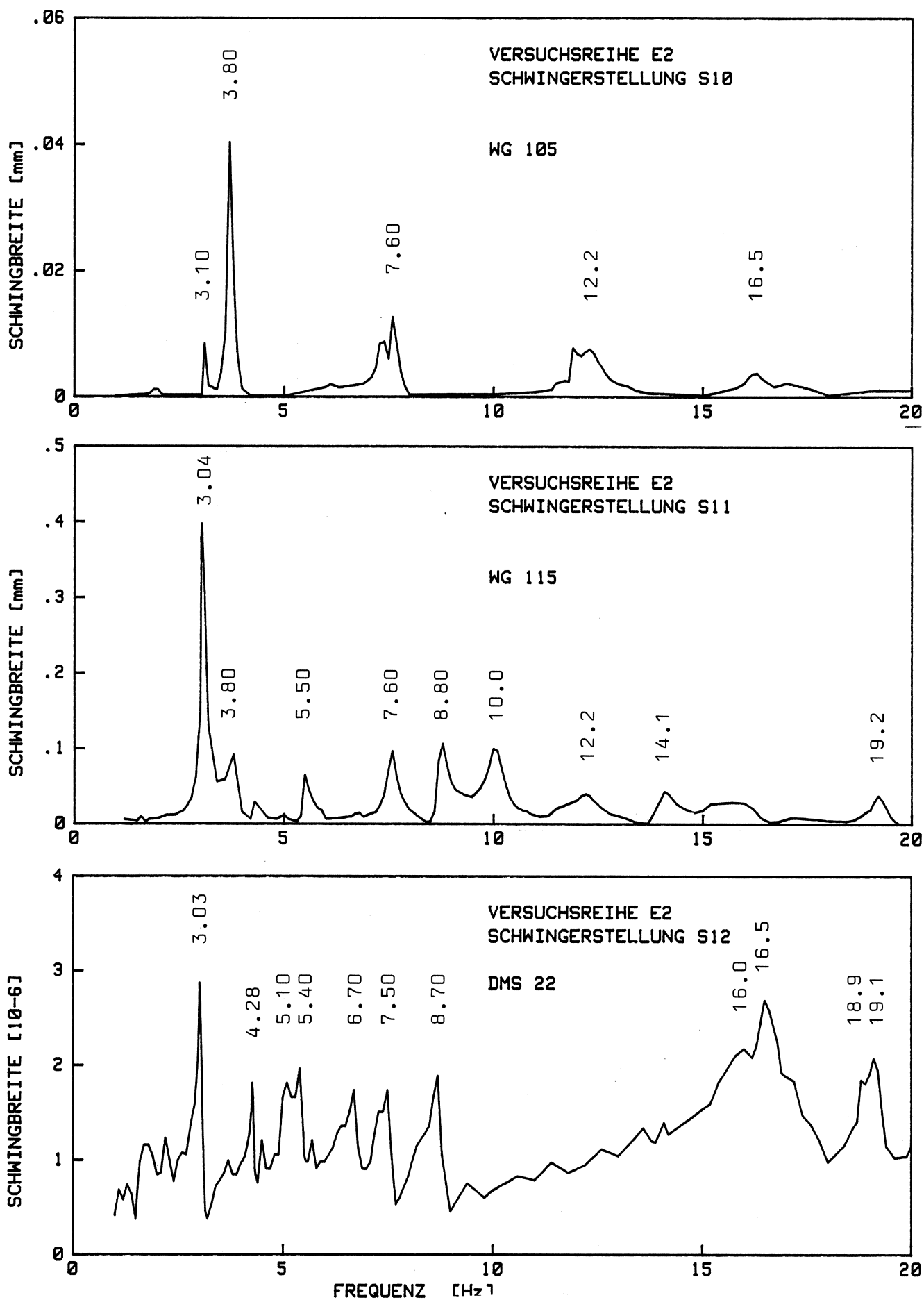


Bild 89b: Uebertragungsfunktionen der Brücke für die Versuchsreihe E2 und die Schwingerstellungen S10, S11 und S12.

treten nur dann auf, wenn die Methode der harmonischen Anregung benutzt wird und die Analyse der Resultate auf den Zeitbereich beschränkt bleibt. Analysiert man das Strukturverhalten nach einer geeigneten Anregung (oder ihr freies Ausschlagen) im Frequenzbereich, treten solche Spitzen im Spektrum nicht in Erscheinung, da die Anteile der verschiedenen Eigenschwingungen an der Gesamtamplitude bei der Frequenzanalyse zerlegt werden. Dass bei Einwirkung periodischer Kräfte auf Strukturen die Anregung von Subharmonischen durchaus ihre praktische Bedeutung hat, geht aus entsprechenden Berichten hervor [63], [64].

Anders als die oben geschilderte, erwies sich eine ähnliche Erscheinung bei der vorliegenden Untersuchung als störend. Es traf glücklicherweise nicht allzu oft zu, dass Eigenschwingungen der Brücke in einem harmonischen Frequenzverhältnis zueinander stehen, und dass sie gleichzeitig im Anregungspunkt eine wesentliche modale Amplitude aufweisen. In diesem Fall sind die Signale des Grundtones von jenen des ersten und eventuell auch höherer Obertöne überlagert und damit nicht mehr rein harmonisch. Es ist dann ohne Frequenzanalyse nicht möglich, die Eigenform des Grundtones exakt zu bestimmen. Die bei der Analyse im Zeitbereich entstehenden Amplitudenfehler mussten hier jedoch in Kauf genommen werden, denn die verfügbare Länge der Zeitsignale von 10 bis 20 Sekunden reicht für die Durchführung einer exakten Frequenzanalyse nicht aus.

Die Sicherheit, mit der eine Schwingungsform und damit der Schwingungstyp identifiziert werden können, ist eng mit der gewählten Instrumentierung und der Lage des Anregungspunktes verknüpft. In der Versuchsreihe E1 war der überwiegende Teil der Wegaufnehmer auf eine einzige Längslinie, die Messlinie 2, konzentriert (Bild 83). Diese Anordnung spiegelt das Bestreben wider, die theoretisch bestimmten Längsbiegeschwingungen möglichst gut erfassen zu können. Dieses Ziel wurde erreicht. Allerdings ist die Sicherheit, mit der L- und T-Schwingungen auseinandergehalten werden können, mit einer solchen Instrumentierung sehr beschränkt. Die optimale Anordnung von Messpunkten berücksichtigt im Rahmen der möglichen Anzahl Punkte auch bei zentrischer Belastung sowohl das Längs- als auch das Querverhalten der Struktur. Dass dabei nicht nur vertikale, sondern auch horizontale Bewegungskomponenten beobachtet werden sollten, wird sich noch zeigen.

Abgesehen von dieser letzten Bemerkung kann die für die Versuchsreihe E2 benutzte Instrumentierung als zweckmässig bezeichnet werden. Sie erlaubte zumindest eine klare Trennung in L- und T-Schwingungen. Es ist offenbar dem Einfluss des zusätzlich eingebrachten Betonbelages zuzuschreiben, dass die Dehnungsmessstreifen bei E2 noch weniger Signal lieferten als bei E1. Ausser für DMS 22 wurde deshalb bei diesen Instrumenten auf die Ermittlung von Uebertragungsfunktionen verzichtet. Ihre Signale wurden, sofern überhaupt möglich, nur für die Identifikation von Schwingungsformen verwendet. In einer nächsten Untersuchung würde der Verfasser für die Bestimmung des Uebertragungsverhaltens einer Brücke auf den Einsatz von Instrumenten zur Dehnungsmessung verzichten und alle Kanäle für Durchbiegungs- oder Beschleunigungsmessungen verwenden.

Die Wahl der Anregungspunkte ist vom Bestreben gekennzeichnet, mindestens die tiefsten Eigenschwingungen der Brücke sicher identifizieren zu können. Es war nicht von vornherein klar, dass die vom Schwinger erzeugte Energie genügen würde, um die Brücke zu zuverlässig messbaren Reaktionen anzuregen. Die Versuche zeigten, dass dies der Fall ist. Rückblickend lässt sich feststellen, dass sich das Risiko, den Schwinger zentrisch in einem Schnitt zwischen Stütze und Feldmitte aufzustellen, wahrscheinlich gelohnt hätte. Für alle Eigenschwingungen, deren Form pro Brückenfeld eine Halbwelle aufweist, wären zwar die Messsignale kleiner geworden. Dafür wären bessere Informationen über höhere L-Schwingungen, deren Form pro Brückenfeld zwei Halbwellen aufweist, angefallen. Ob sich der Aufwand noch gelohnt hätte, der dann auch hinsichtlich der Instrumentierung hätte getrieben werden müssen, ist allerdings fraglich. Die Erfahrung zeigt, dass Schwingungen mit so komplexen Formen von rollendem Schwerverkehr ohnehin nicht in wesentlichem Mass angeregt werden können. Dagegen wird es der Vergleich der Resultate der Reihe E1 für die Schwingungen L2, L3 und L4 und die diesbezüglich theoretisch gleichwertigen Schwingerstellungen S1, S3 und S4 erlauben, einige Ueberlegungen betreffend die Linearität des dynamischen Verhaltens einer Strassenbrücke anzustellen.

Die Numerierung der Längsbiegeschwingungen in den Bildern 90 und 91 beginnt mit L2, weil, wie sich zeigen wird, die tiefste L-Schwingung L1 mit dem gewählten Verfahren nicht angeregt werden konnte. Auf die Gründe für diese Tatsache wird im nächsten Ab-

schnitt 2.63, "Vergleich Theorie/Experiment", eingegangen.

In den Bildern 90 und 91 sind pro Schwingung zum Teil mehrere Frequenzwerte angegeben. Die Frage nach dem zuverlässigsten Wert wurde wie folgt beantwortet:

- Für L-Schwingungen werden Resultate aus zentrischen jenen aus exzentrischen S-Stellungen vorgezogen. Die letzteren sind nur der Vollständigkeit halber und in Klammern angeführt. Innerhalb der zentrischen wird jene S-Stellung bevorzugt, die dem Punkt der jeweils grössten modalen Amplitude entspricht: L2/S1, L3/S3, L4/S4. Zu Vergleichszwecken sind jedoch alle ermittelten Frequenzwerte angegeben.
- Für T- und Q-Schwingungen sind Resultate nur aus exzentrischen S-Stellungen zu erwarten. Da es hier keine grundsätzlichen Präferenzen gibt, sind immer alle ermittelten Frequenzwerte angegeben.

Die Genauigkeit der Frequenzangaben beträgt für $f < 10$ Hz im allgemeinen $\Delta f = 0.01$ Hz, für $f > 10$ Hz $\Delta f = 0.1$ Hz.

Frequenz (Hz)	Versuch Si	Schwingungstyp	s.Anhang
1.50	3	1/3 von L3 = 4.34 Hz	A1.2
1.57	1	1/2 von L2 = 3.07 Hz	A1.1
1.59	3		
(1.58)	11		
1.90	4	1/3 von L4 = 5.53 Hz	
1.95	10	1/2 von T1 = 3.85 Hz	
2.23	3	1/2 von L3 = 4.34 Hz	
2.22	1, 4		
(2.20)	12		
2.32	12	1/3 von T2 = 6.83 Hz	
2.80	4	1/2 von L4 = 5.53 Hz	
3.07	1	L2 ***	A1.4/5
3.10	3		
3.11	4, (10)		
(3.05)	12		
(3.08)	11		
3.85	12	T1 ***	A1.6/7
3.86	11	(Spektrum s. A1.8)	
3.90	10		
4.05	10	1/4 von QA = 16.2 Hz	A1.3
4.34	3	L3 ***	A1.9/10
4.35	1, 12		
4.36	4		
(4.40)	11		
5.53	4	L4 ***	A1.12
5.60	1, 3		A1.11
(5.50)	12		
(5.55)	11		
6.09	10	1/2 von T5 = 12.2 Hz	A1.13
		(Spektrum s. A1.14)	
6.83	12	T2 ***	A1.15/16
6.91	11		A1.17/18
7.64	12	T3 ***	A1.19/20
7.65	11		A1.21/22
7.69	10		A1.23/24
8.20	1	1/2 von L6 = 16.5 Hz	
8.30	10	1/2 von QA = 16.6 Hz	
		(Nebengipfel)	
8.69	12	T4 ***	A1.25/26
8.73	11		A1.27/28
9.43	12	1/2 von QC = 19.1 Hz	
9.79	3	1/2 von Lx = 19.6 Hz	
10.1	11	L5 ***	A1.29/30
10.2	4	L5 plus 1/2 von Qx = 20.4 Hz	
10.5	10	1/2 von Qx = 21.0 Hz	
12.2	11	T5 ***	A1.31/32
	10		A1.33/34
13.4	11, 10	1/2 von Qx = 26.8 bis 27.0 Hz	
13.5	1, 12		
13.9	11	T6 ***	A1.35/36
15.9	12	ähnlich wie L6	A1.37/38
16.2	1	ähnlich wie L6	A1.39/40
		(Spektrum s. A1.41)	
16.2	10, 11	QA *)	A1.42/43
16.5	12	L6 **	A1.44/45
18.0	11	QB *)	A1.46/47
19.1	12	QC *)	A1.48/49
19.6	12		A1.50/51
19.4	1	Lx *)	
19.6	3		
20.0	4		
19.7	11	QD *)	A1.52/53

Frequenz (Hz)	Versuch Si	Schwingungstyp	s.Anhang
1.55	1, (12)	1/2 von L2 = 3.03 Hz	
2.20	1, (12)	1/2 von L3 = 4.28 Hz	A1.54/55
3.03	1, (12)	L2 ***	
(3.04)	11		
(3.10)	10		
3.72	12	T1 ***	A1.56/57
3.80	11		A1.58/59
3.80	10		A1.60/61
4.28	1, (12)	L3 ***	
5.10	12	L4 + Harmonische	
5.40	12	L4 + Harmonische	A1.62
		(Spektrum s. A1.63)	
5.49	1	L4 ***	A1.64/65
(5.48)	12		
(5.50)	11		
6.70	12	T2 ***	A1.66/67
	11		A1.68/69
7.50	12	T3 ***	A1.70/71
7.60	11		A1.72/73
	10		A1.74/75
8.70	12	T4 ***	A1.76/77
8.80	11		A1.78/79
10.0	11, 10	L5 ***	A1.80/81
12.2	11	T5 ***	A1.82/83
	10		A1.84/85
12.6	10	Q1 **	A1.86/87
14.1	11	T6 ***	A1.88/89
14.1	12	1/2 von Qx = 28.20 Hz	A1.90
14.2	1	1/2 von Qx = 28.40 Hz	
16.0	1	Q2A *)	A1.91/92
	12		A1.93/94
16.5	12	Q3 *)	A1.95/96
17.0	1	Q2B *)	A1.97/98
	10		A1.99/100
17.7	10	ähnlich wie Q3	A1.101/102
18.8	12	Q4 *)	A1.103/104
19.1	1, 12	Q5 ***	A1.105/106
19.2	11	Q6 *)	A1.107/108
19.4	1	wie Q5	

Kennzeichnung der Schwingungstypen:

***) konsistent mit den Resultaten der Versuche E2

***) nur bei den Versuchen E1 festgestellt;

Identifikation sicher

*) Identifikation unsicher

Kennzeichnung der Schwingungstypen:

***) konsistent mit den Resultaten der Versuche E1

***) nur bei den Versuchen E2 festgestellt;

Identifikation sicher

*) Identifikation unsicher

Bild 90: Zusammenstellung der Resultate der Versuchsreihe E1.

Bild 91: Zusammenstellung der Resultate der Versuchsreihe E2.

e) Resultate der Reihe E1

Die Auswertung der Versuchsreihe E1 erlaubte die sichere Identifikation von vier L- und vier T-Eigenschwingungen der Brücke Deibüel mit Frequenzen zwischen 3.07 Hz und 10.1 Hz. Weitere Eigenschwingungen wurden im Frequenzband zwischen 10.1 Hz und 20 Hz festgestellt. In diesem Bereich gelang es lediglich mit Hilfe eines Vergleiches mit der theoretisch ermittelten Eigenform, eine weitere L-Schwingung zu identifizieren. Im übrigen traten gewisse Unsicherheiten auf, die eine Bestimmung des Schwingungstypes nicht zulassen:

- Die Schwingungsformen sind so kompliziert, dass sie mit der vorhandenen Instrumentierung nicht kontinuierlich über die gesamte Struktur erfasst werden können.
- Die Durchbiegungssignale sind teilweise sehr schwach.
- Zwischen den auf der Messlinie 2 erfassten Signalen treten Phasenverschiebungen auf, die wesentlich von 0 oder 180 Grad verschieden sind. Dies deutet darauf hin, dass die zugehörigen Schwingungen nicht reeller, sondern komplexer Natur sind. Sie können mit den hier zur Verfügung stehenden Mitteln nicht behandelt werden.

Der Vergleich mit den Ergebnissen der Versuchsreihe E2 erlaubte es jedoch, zwei weitere Eigenschwingungen zu identifizieren. Dies war möglich, weil die Probleme bei E1 lediglich die zu knappe Instrumentierung betrafen (T5, T6).

Die Resultate für die Versuchsreihe E1 sind zahlenmässig im Bild 90 zusammengestellt und im Anhang 1 (A1.1 bis A1.53) grafisch dargestellt. Der Anhang enthält von jeder relevanten Schwingung einen Ausschnitt aus den registrierten Zeitsignalen und die räumlich gezeichnete modale Form. Ebenfalls im Anhang 1 sind die Frequenzspektren dargestellt, die von einigen nicht einfach harmonischen Zeitsignalen berechnet worden sind.

Das Thema "Anregung von Subharmonischen" wird anhand einiger Zeitsignale illustriert (A1.1 bis A1.4, A1.13). Als ausgewähltes Beispiel zeigt ferner das Spektrum, das aus den bei Anregung mit $f = 6.09$ Hz gemessenen Zeitsignalen berechnet worden ist, dass der Anteil der Grundharmonischen (hier $f = 12.2$ Hz) am Gesamtsignal grösser ist als jener der Subharmonischen (A1.14).

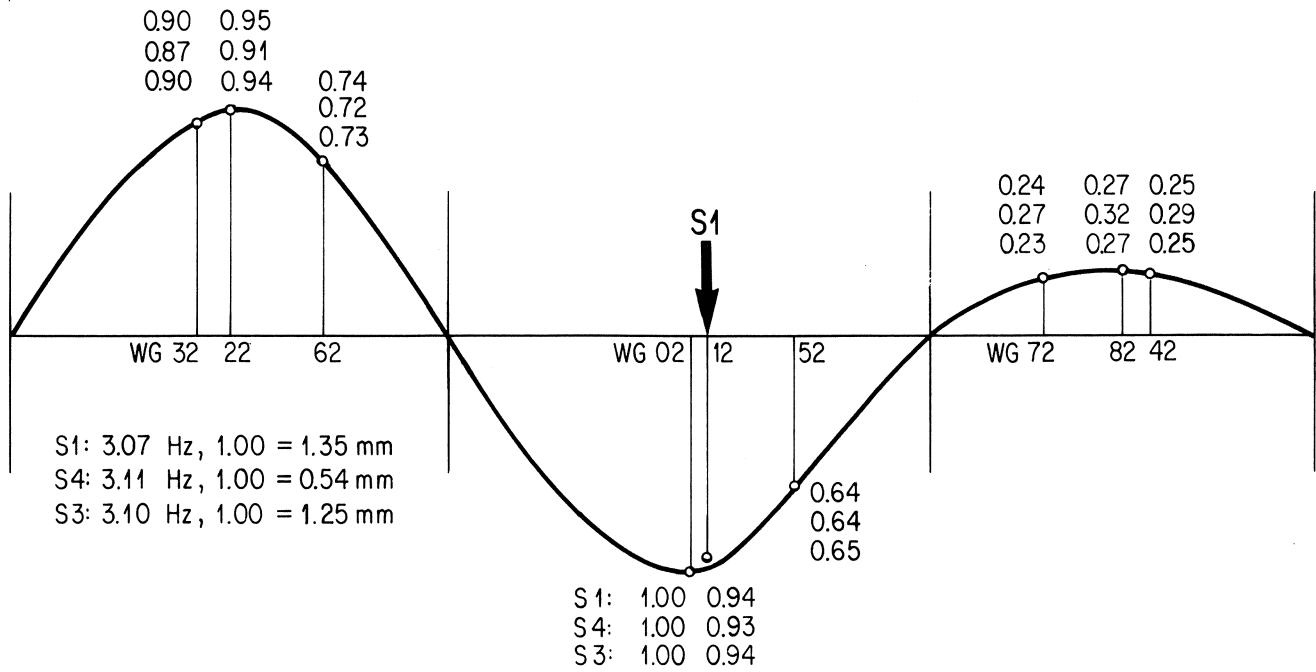
Als Grundschiwingung der Brücke wurde L2 mit $f = 3.07$ Hz ermittelt. Je nach Anregungspunkt variiert die Frequenz der maximalen Brückenreaktion zwischen $f = 3.05$ Hz und $f = 3.11$ Hz. Die Schwingungen L3 und L4 mit einer Frequenz von $f = 4.34$ Hz bzw. $f = 5.53$ Hz verhalten sich ähnlich. In Bild 92 sind die Angaben zusammengestellt, die einen Vergleich der Resultate für die Schwingungen L2, L3 und L4 und die zentrischen Schwingstellungen S1, S3 und S4 erlauben. Sowohl hinsichtlich Frequenz als auch in bezug auf die Form ist für alle drei Schwingungen eine gewisse Abhängigkeit vom Anregungspunkt festzustellen. Der tiefste Frequenzwert ergibt sich bei Anregung im Feld mit der grössten modalen Amplitude. Die Streuung der Schwingungsformen scheint keiner Gesetzmässigkeit zu folgen. Bild 92 gibt ebenfalls die bei den Versuchen erreichten maximalen Schwingbreiten an. Ein Vergleich zeigt, dass die dynamische Wirkung des Schwingers durchaus in der gleichen Grössenordnung liegt wie die eines schweren Lastwagens.

Die Formen der Schwingungen L2 bis L6, bezogen auf die Messlinie 2, sind in Bild 93 dargestellt. Eine erste der oben angesprochenen Unsicherheiten zeigt sich beim Vergleich der Formen für L5 und L6. Während für L5 pro Schwingungshalbwelle mindestens ein Messpunkt vorhanden ist, trifft dies für L6 nicht mehr zu. Die Anzahl der Halbwellen ist zwar für L6 nicht grösser als für L5, sie liegen aber bezüglich der Messpunkte ungünstiger. Ohne Kenntnis der theoretischen Ergebnisse wäre es nicht möglich, L6 als solche zu identifizieren. Aus Bild 90 und den entsprechenden Darstellungen im Anhang kann entnommen werden, dass es gesamthaft drei Frequenzen gibt, bei denen mit L6 verwandte Schwingungen beobachtet wurden: $f = 15.9$ Hz (S12), $f = 16.2$ Hz (S1) und $f = 16.5$ Hz (S12). Da die Form der Schwingung mit $f = 16.5$ Hz am besten der theoretisch ermittelten Form entspricht und ausserdem für diese Schwingung die im Anregungspunkt erzeugte Wirkung am grössten ist, wurde diese Schwingung L6 zugeordnet. Zur Schwingung mit $f = 16.2$ Hz ist zu bemerken, dass hier offenbar die Bodenplatte des Brückenkastens eine lokale Resonanz aufweist. Die Zeitsignale für die Messstelle WG 03 in der Mitte der Bodenplatte zeigen deutliche Einflüsse von Oberschwingungen (A1.39). Verglichen mit der Messstelle WG 02 am Steg, weist WG 03 eine fast 70% höhere modale Amplitude auf. Aus dem in A1.41 gezeigten Frequenzspektrum geht hervor, dass diese Amplitude von WG 03 durch Ueberlagerung der Bewegung mit $f = 16.2$ Hz

Versuch: E1; S1, S4, S3

Frequenz: 3.07 Hz

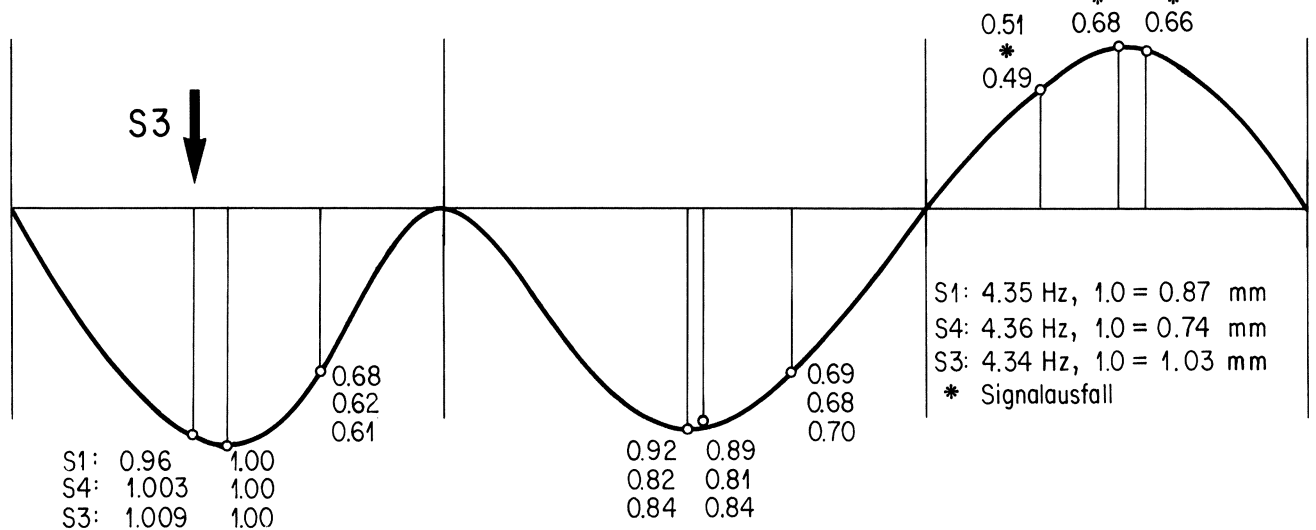
L2



Versuch: E1, S1, S4, S3

Frequenz: 4.34 Hz

L3



Versuch: E1; S1, S4, S3

Frequenz: 5.53 Hz

L4

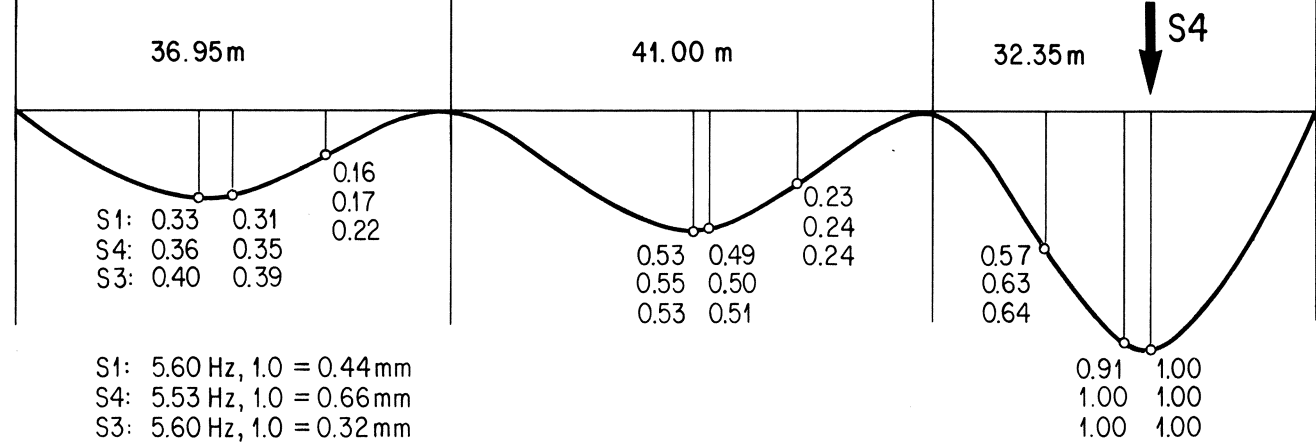


Bild 92: Versuchsreihe E1: Einfluss der Schwingerstellung (mit einem Pfeil markiert) auf Frequenz, Form und maximale erzeugte Amplitude der Eigenschwingungen L2, L3 und L4.

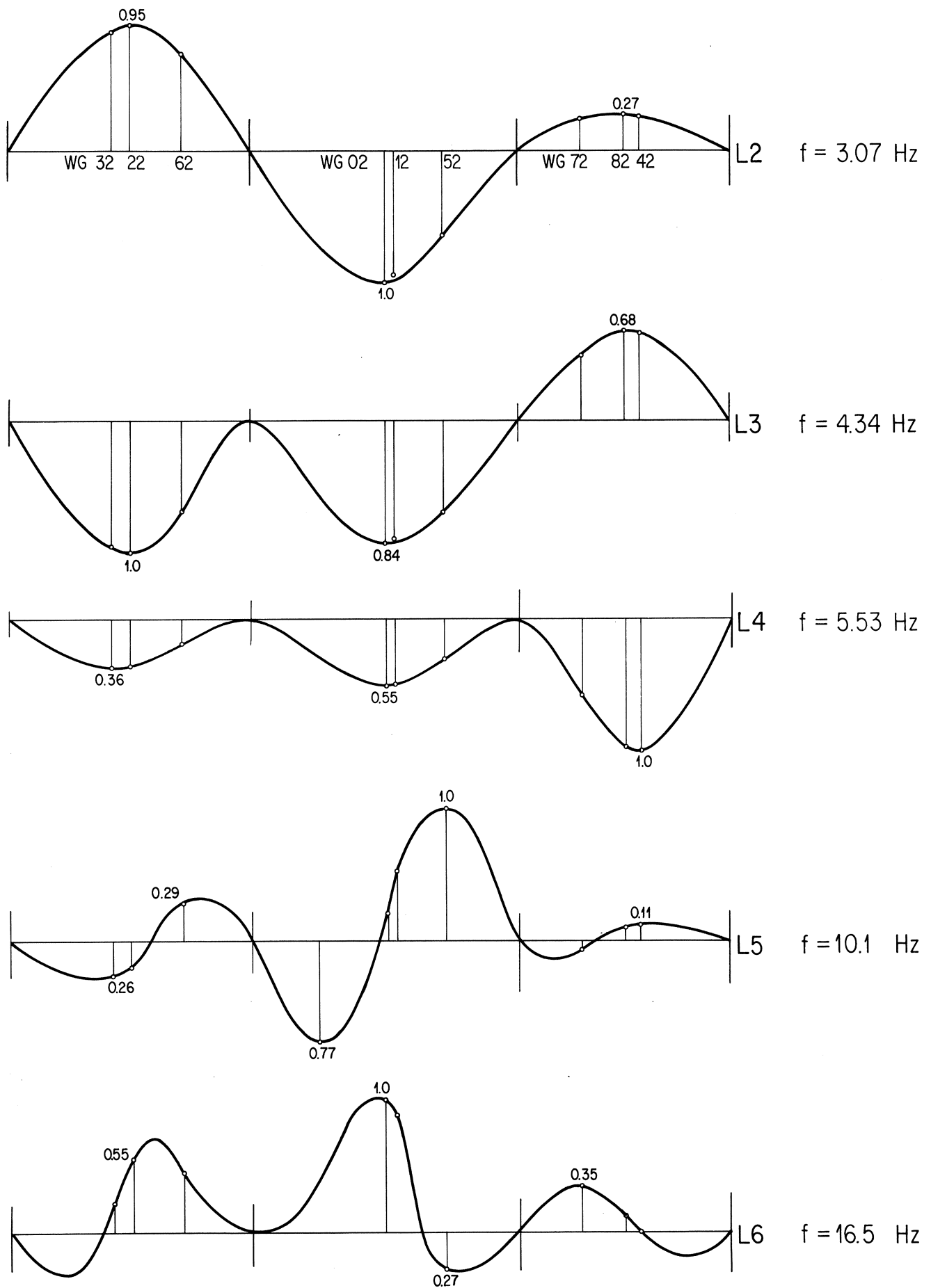


Bild 93: Schematische Darstellung der bei der Versuchsreihe E1 ermittelten Längsbiege-Eigenschwingungen L2 bis L6.

mit den Obertönen $f = 48.6$ Hz und $f = 32.4$ Hz zustandekommt. Beide Oberschwingungen sind in abgeschwächter Form auch im Spektrum für WG 02 erkennbar.

Die Form der in Bild 90 mit Lx bezeichneten L-Schwingungen mit $f = 19.4$ bis 20.0 Hz liess sich nicht bestimmen.

Die erste Torsionsschwingung T1 liegt frequenzmässig zwischen L2 und L3. Dies ist aber keineswegs allgemein gültig. Aus ihrer Form (A1.7) geht hervor, dass nicht nur die Torsionssteifigkeit des Brückenquerschnittes, sondern wahrscheinlich vor allem die Steifigkeit der Stützen gegen Verschiebung und Verdrehung ihrer Köpfe in Brückenquerrichtung eine wesentliche Rolle spielen. Beispielsweise liegt bei der im Kanton Tessin gelegenen zweispurigen Autobahnbrücke Viadotto della Piota Negra mit maximalen Spannweiten von 63.5 m und Pfeilerhöhen in der Grössenordnung von 30 m die Frequenz von T1 mit $f = 0.80$ Hz deutlich tiefer als diejenige von L1, $f = 1.97$ Hz. Ähnliche Zahlen gelten auch für den Viadotto di Saresc.

Die für T1 der Brücke Deibüel gemessenen Zeitsignale zeigen deutliche Spuren von Oberschwingungen. Es handelt sich hierbei um den einzigen Fall der oben bereits ange-tönten Erscheinung, dass zwei Eigenschwingungen in einem harmonischen Frequenzverhältnis zueinander stehen und beide im Anregungspunkt eine wesentlich von Null verschiedene modale Amplitude aufweisen. Das Frequenzspektrum für WG 121 und WG 122 bei Anregung mit der Frequenz von T1, $f = 3.85$ Hz, zeigt, dass die störenden Einflüsse vor allem der Schwingung T3, $f = 7.64$ Hz, zuzuschreiben sind (A1.8). Die für T1 bestimmte Form ist deshalb zwar nicht exakt, qualitativ aber sicher richtig.

Während T1 eine einzige Halbwelle über die ganze Brückenlänge aufweist, sind es für T2 und T3 deren zwei (A1.16 und A1.18) und für T4 deren drei. Bei T4 bewegen sich die Stützenköpfe nicht mehr, so dass diese Schwingung mit $f = 8.69$ Hz die minimale eigentliche Verdrehungssteifigkeit des Ueberbaus wiedergibt (A1.20). T5 weist vier oder fünf Halbwellen auf. Wegen der vorgenannten Unsicherheiten, die hier vor allem die Randfelder betreffen, lässt sich diese Zahl nicht genau bestimmen. Sicher ist dagegen, dass T5 im Messschnitt 12, d.h. ungefähr in Brückenmitte, einen Knoten aufweist.

Für alle bisher erwähnten T-Schwingungen gilt, dass die Form und, mit Ausnahme von T5, auch die Frequenz vom Anregungspunkt abhängig sind. Während auf Fragen der Eigenform hier nicht im Detail eingegangen werden kann, zeigt sich, dass die Frequenz zunimmt, wenn der Anregungspunkt von der Feldmitte gegen die Stütze wandert (S12, S11, S10). Wo in Bild 90 Angaben für S10 fehlen, liegt dieser Schnitt in einem Schwingungsknoten.

Auf die Problematik der Identifikation von Q-Schwingungen wird bei der nun folgenden Diskussion der Resultate der Reihe E2 eingegangen.

f) Resultate der Reihe E2

Die Resultate für die Versuchsreihe E2 sind zahlenmässig im Bild 91 zusammengestellt und im Anhang 1 (A1.54 bis A1.108) analog zu den Resultaten der Reihe E1 grafisch dargestellt. Da sich die Ergebnisse der beiden Reihen sehr ähnlich sind, sollen hier vor allem die vorhandenen Unterschiede diskutiert werden. Dazu gibt zunächst Bild 94 einen Ueberblick über die Kennwerte jener Eigenschwingungen, die in E1 und in E2 konsistent in Erscheinung getreten sind. Es handelt sich um vier L- und sechs T-Schwingungen.

Für die Schwingungen L2 bis L5 liegt die Frequenz für E2 etwas tiefer als für E1. Die Abnahme beträgt zwischen 1.0% und 1.6% und streut nur sehr schwach. Die Massewirkung des zwischen den Versuchsreihen E1 und E2 zusätzlich eingebrachten Belages war demnach etwas grösser als seine aussteifende Wirkung. Zwischen den Konstruktionsbeton und den Betonbelag war eine Kunststoffolie gelegt worden. Die im Anregungspunkt erzeugte Schwingbreite nahm für E2 wesentlich stärker ab als die Frequenz. Für die "Grundschwingung" L2 sank sie auf 75% des bei E1 erreichten Wertes. Die Extremwerte sind 28% für L5 und 81% für L4. Die Schwingung L6 trat bei den Versuchen E2 nicht mehr in Erscheinung.

Die für die T-Schwingungen ermittelten Zahlen bewegen sich in bezug auf die Abnahme der erzeugten Amplitude in ähnlicher Grössenordnung. Die Veränderung der Frequenz ist nicht mehr so einheitlich wie für die L-Schwingungen. Für Schwingungen mit tieferen Frequenzen (T1, T2, T3) ist eine ähnliche Abnahme wie für die L-Schwingungen festzustellen, für T4, T5 und T6 blieb dagegen die Frequenz konstant oder nahm sogar leicht zu.

Die bei E2 eingesetzte, gegenüber E1 vor allem in Brückenquerrichtung doch etwas komfortablere Instrumentierung lässt neben dem zahlenmässigen Vergleich auch eine eingehendere Diskussion der festgestellten Schwingungsformen zu. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei der L-Schwingung einer ideal balkenartigen Struktur die modale Amplitude und die Phase über den Brückenquerschnitt konstant sind. Bei einer T-Schwingung variiert die Amplitude linear über den Querschnitt, weist in der Mitte einen Nulldurchgang auf, und die beiden Querschnittshälften bewegen sich gegenphasig. Schwingungen, deren Form grundsätzlich von diesen beiden Varianten verschieden ist, werden als Q-Schwingungen bezeichnet.

Der Vergleich der auf die Messlinie 2 bezogenen Formen von L2 bis L4 ist in Bild 95 dargestellt. Gezeichnet sind dabei die für E1 ermittelten Formen, während die Zahlenwerte der modalen Amplituden für beide Versuchsreihen eingetragen sind. Die Übereinstimmung ist für L2 und L4 ausserordentlich gut. Für L3 sank die maximale modale Amplitude im Mittelfeld der Brücke von 0.92 auf 0.77, was einer doch beträchtlichen Abnahme auf 84% des für E1 bestimmten Wertes entspricht. In den beiden Randfeldern sind dabei die Abweichungen gering. Für L5 ist die Übereinstimmung für die eine Brückenhälfte gut, während in der anderen Hälfte Abweichungen in der für L3 angegebenen Grössenordnung zu verzeichnen sind. Die Gründe für diese unterschiedlichen Ergebnisse herauszuarbeiten, müsste Gegenstand einer speziellen Untersuchung sein.

Anhand der im Anhang gezeigten räumlichen Darstellungen ihrer Formen (A1.55, 61, 65, 81, 45) kann für L2 bis L6 untersucht werden, inwiefern diese die vorgenannten Anforderungen an die Form einer L-Schwingung erfüllen. Das wesentlichste Merkmal, die Gleichphasigkeit der Bewegung über den Querschnitt, zeigen alle L-Schwingungen. Betreffend die Konstanz der Amplitude zeigt sich, dass für die bei zentrischen S-Stellungen angeregten Schwingungen L2, L3 und L4 die modale Amplitude an den Konsolköpfen 10% bis 15% grösser ist als diejenige an den Kastenstegen. Das gleiche trifft für die in S12 angeregte Schwingung L6 zu. Dieser Querbiege-Einfluss wird als vernachlässigbar klein eingestuft. Etwas anders ist die Situation für die in S11 angeregte Schwingung L5, wo die Amplitude am Konsolkopf rund 72% grösser ist als am Kastensteg. Zumindest im Anregungsbereich ist L5 offenbar eine symmetrische Q-Bewegung überlagert. Die modale Form der Messlinie 2 stimmt jedoch mit der theoretischen Form von L5 so gut überein, dass die Zuordnung trotz der nicht ganz idealen S-Stellung als gesichert gelten kann. Ob es sich bei der Q-Bewegung um eine Eigenschwingung oder um eine von der dominanten L-Bewegung erzwungene Schwingung handelt, lässt sich nicht mit Sicherheit beurteilen. Bild 96 stellt als Illustration die Formen von L2 und L5 einander gegenüber. Analog sind in Bild 97 die Formen zweier der im folgenden diskutierten T-Schwingungen, T1 und T5, dargestellt.

			E1		E2		E2/E1	
Schw. typ	Vers. Si	Instr. WG ii	Freq. (Hz)	Schw.br. (mm)	Freq. (Hz)	Schw.br. (mm)	Freq.	Schw.br.
L2	S1	02	3.07	1.349	3.03	1.009	0.987	0.748
L3	S1	22	4.35	0.872	4.28	0.479	0.984	0.549
L4	S1	82	5.60	0.404	5.49	0.326	0.980	0.807
L5	S11	52	10.1	0.197	10.0	0.056	0.990	0.284
T1	S12	01	3.85	0.385	3.72	0.261	0.966	0.678
T2	S12	01	6.83	0.510	6.70	0.258	0.981	0.506
T3	S12	01	7.64	0.365	7.50	0.230	0.982	0.630
T4	S12	01	8.69	0.558	8.70	0.302	1.001	0.541
T5	S11	111	12.2	0.177	12.2	0.056	1.000	0.316
T6	S11	111	13.9	0.178	14.1	0.076	1.014	0.427

Bild 94: Vergleich der für die Versuchsreihen E1 und E2 ermittelten Resultate für einige Eigenschwingungen.

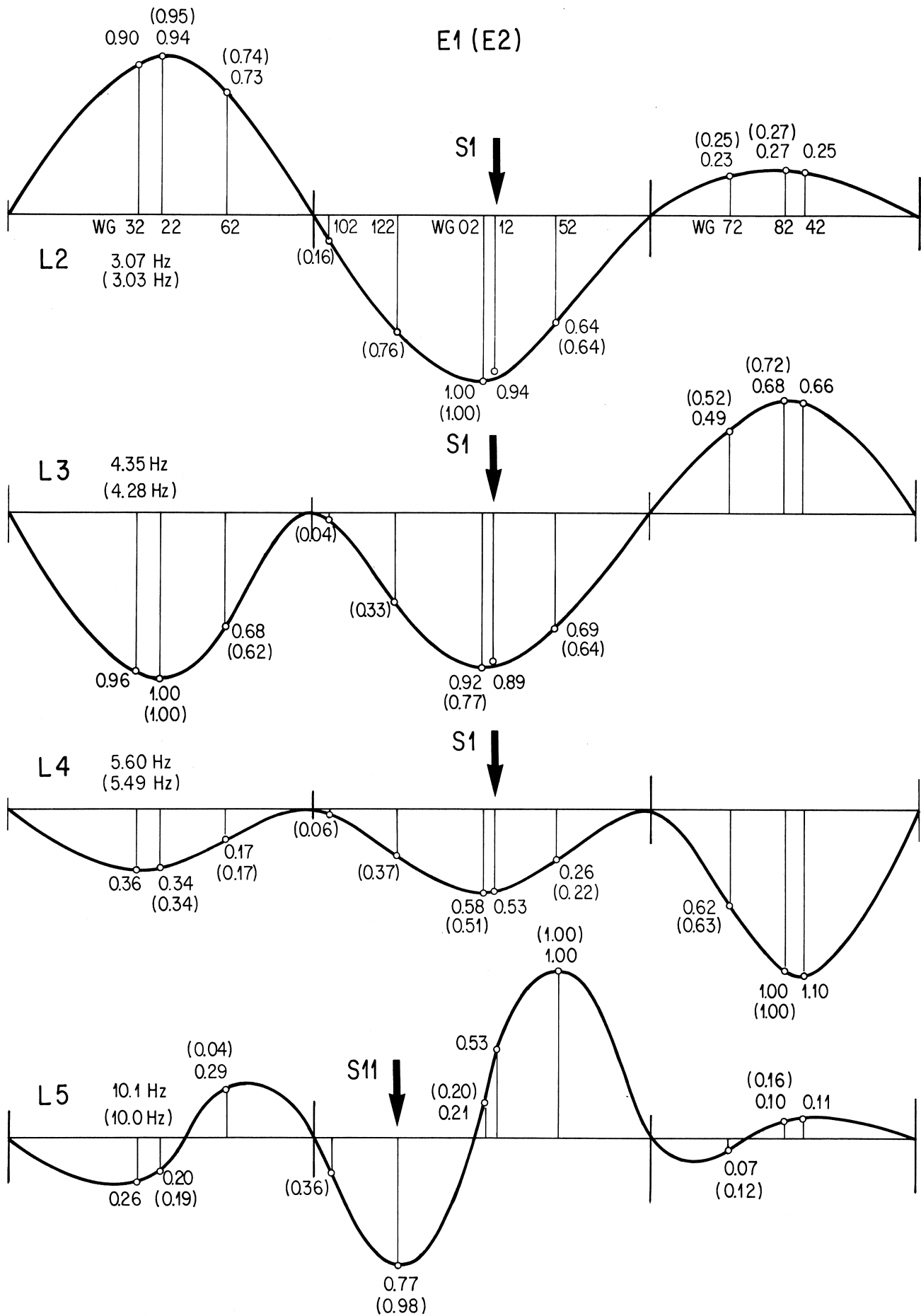
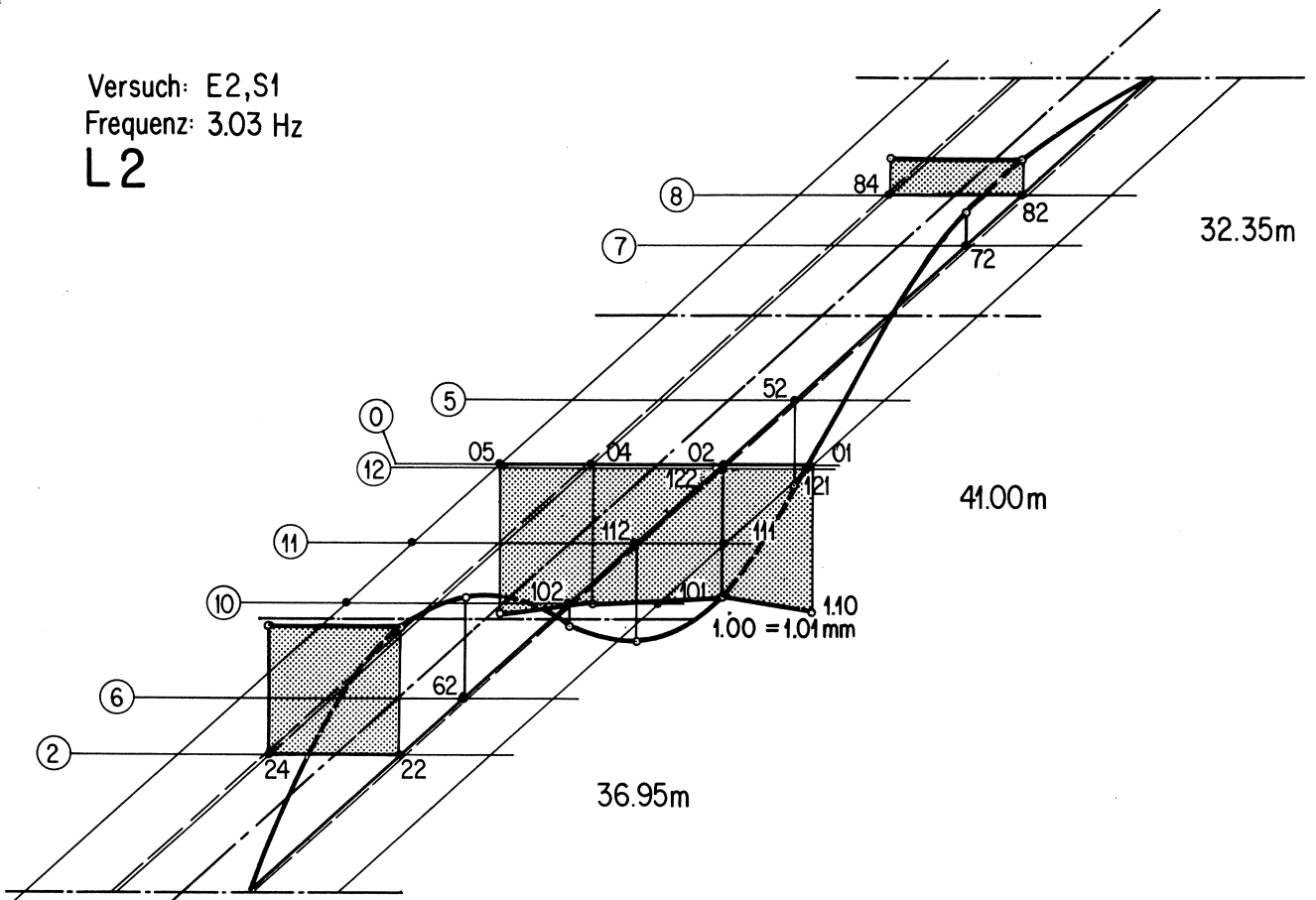


Bild 95: Vergleich der für die Versuchsreihen E1 und E2 ermittelten Frequenzen und Formen für einige Eigenschwingungen. Die gültige Schwingerstellung ist mit einem Pfeil markiert.

Versuch: E2,S1
 Frequenz: 3.03 Hz
L2



Versuch: E2, S11
 Frequenz: 10.00 Hz
L5

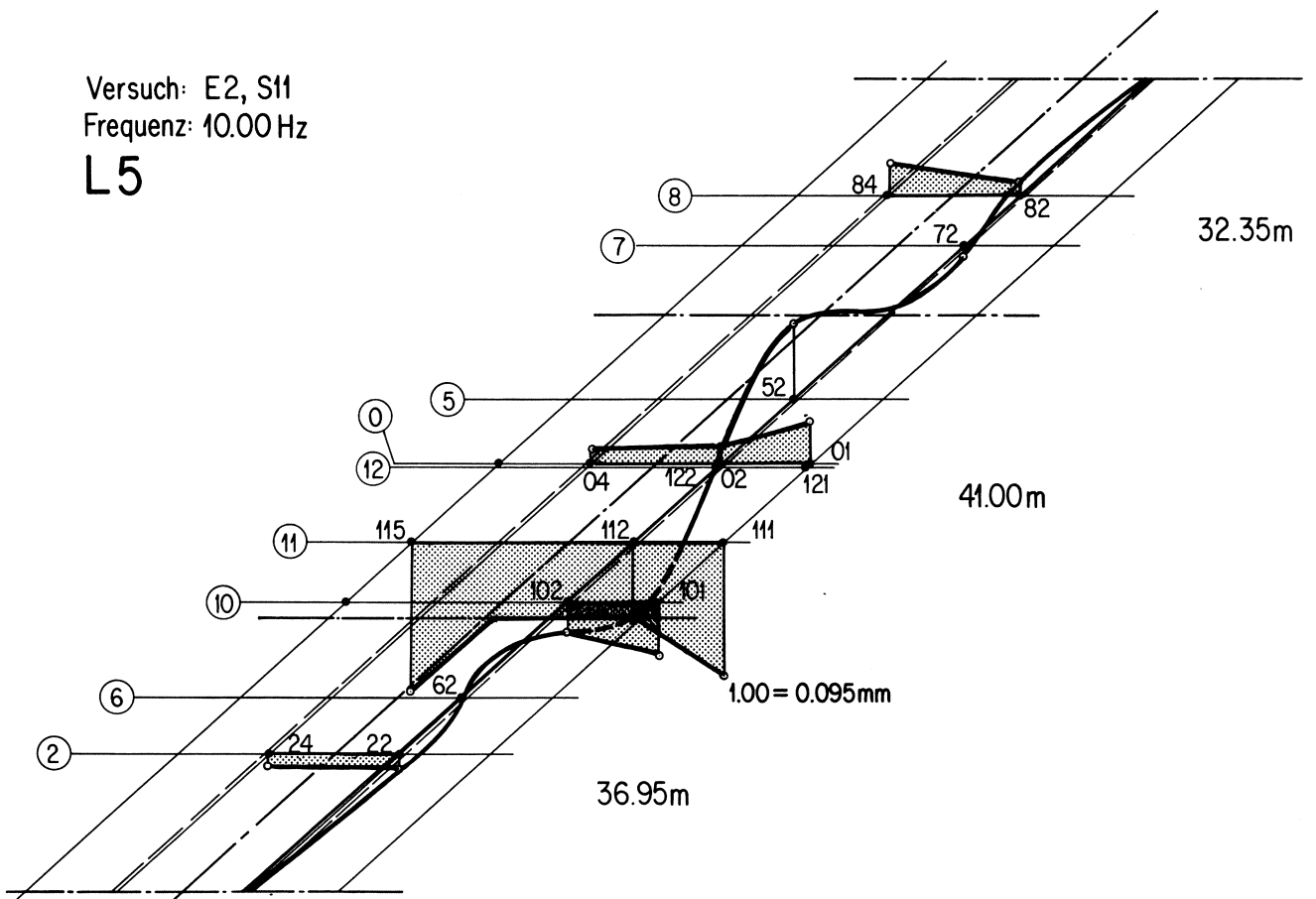
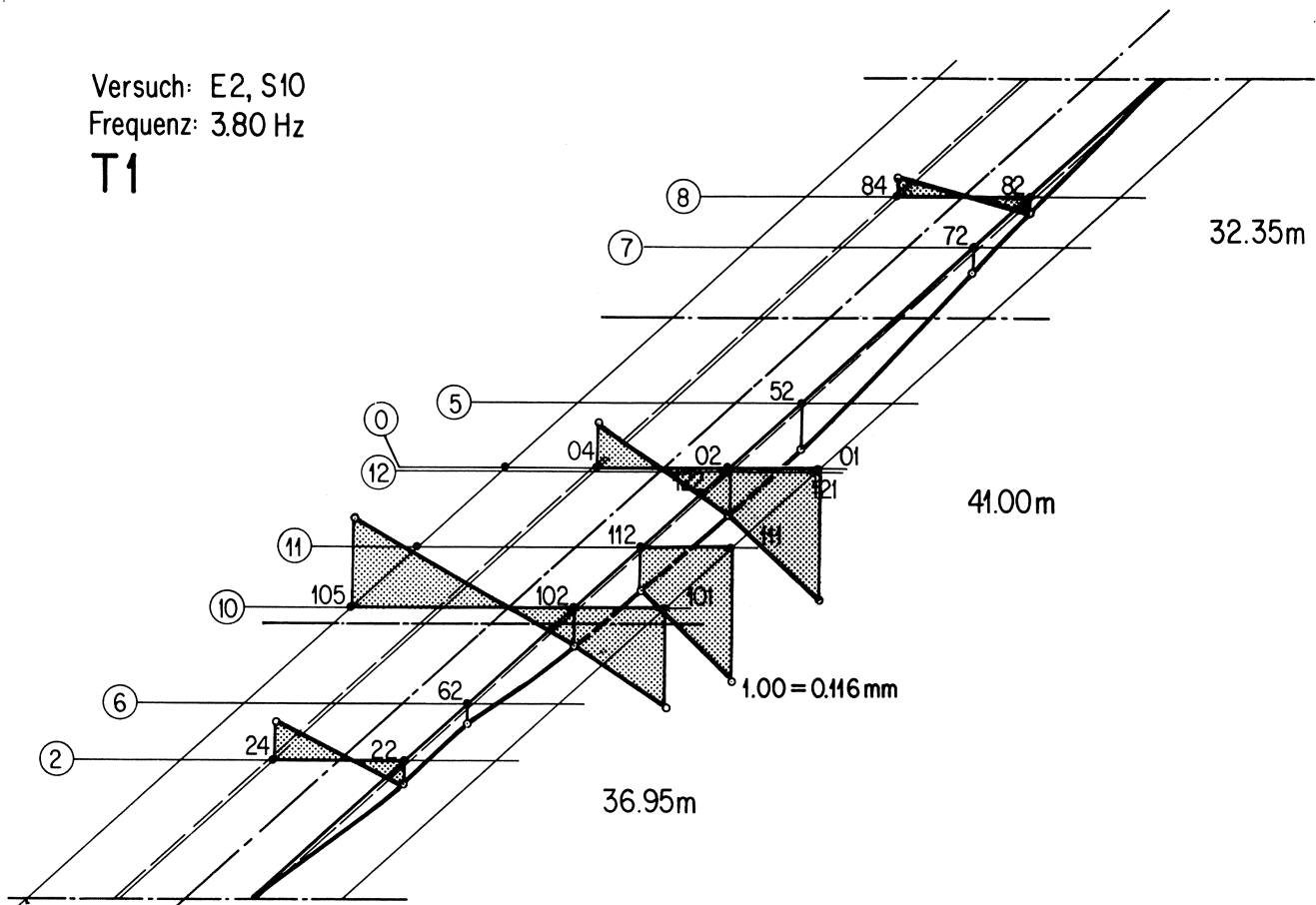


Bild 96: Beispiele von räumlich dargestellten Eigenformen (für zwei Längsbiege-Eigenschwingungen).

Versuch: E2, S10

Frequenz: 3.80 Hz

T1



Versuch: E2, S10

Frequenz: 12.20 Hz

T5

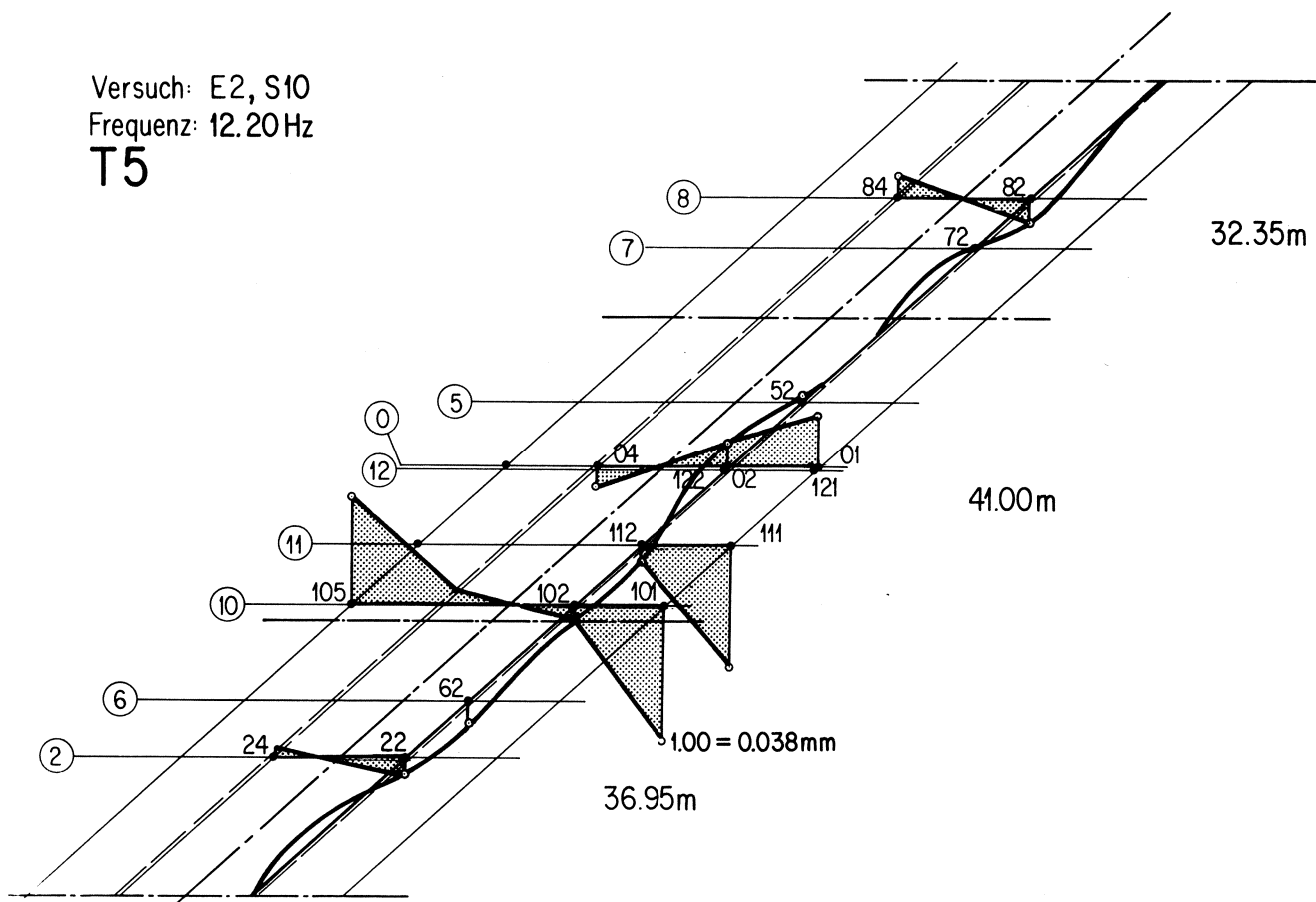
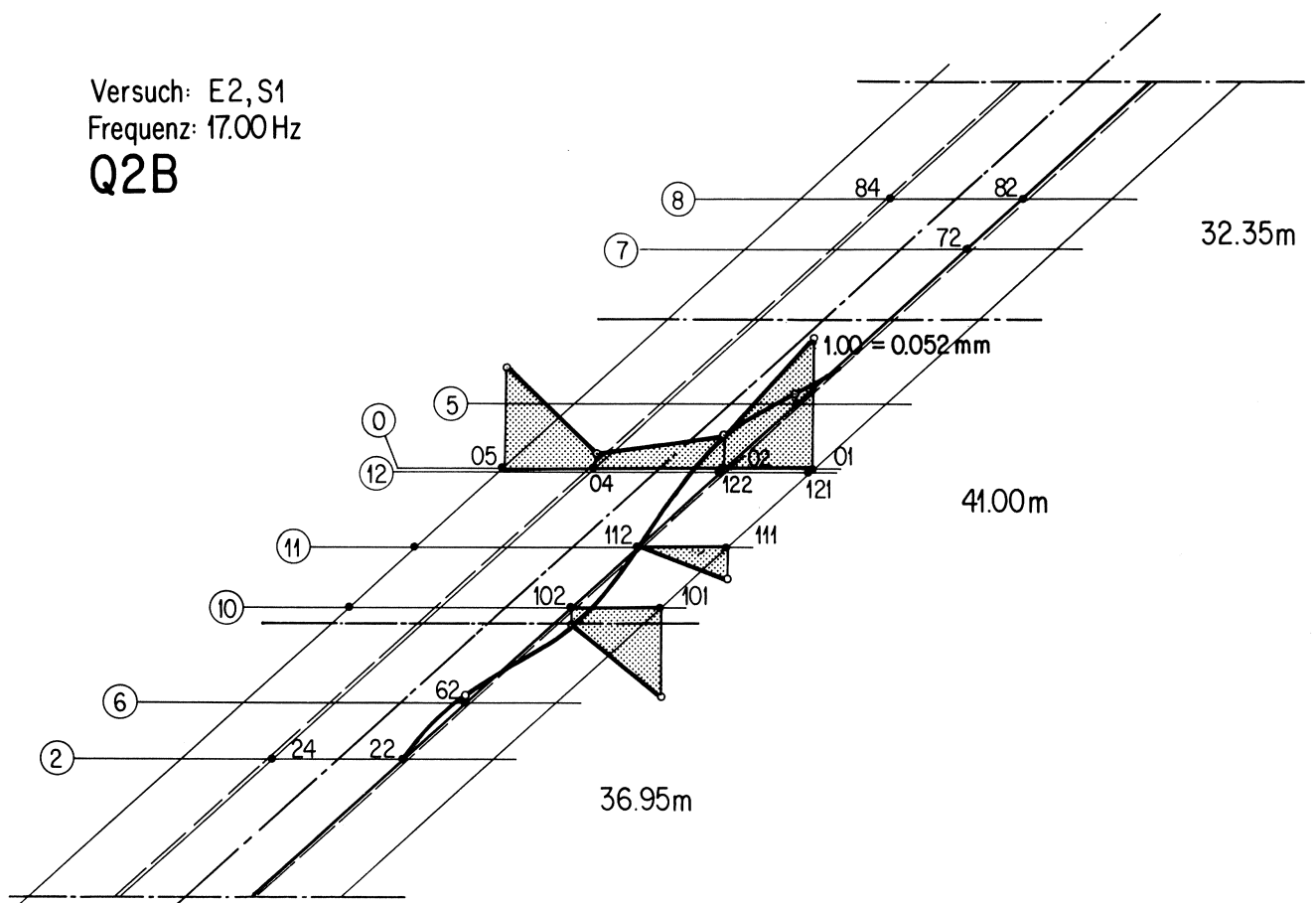


Bild 97: Beispiele von räumlich dargestellten Eigenformen (für zwei Torsions-Eigenschwingungen).

Versuch: E2,S1
Frequenz: 17.00 Hz
Q2B



Versuch: E2,S12
Frequenz: 18.80 Hz
Q4

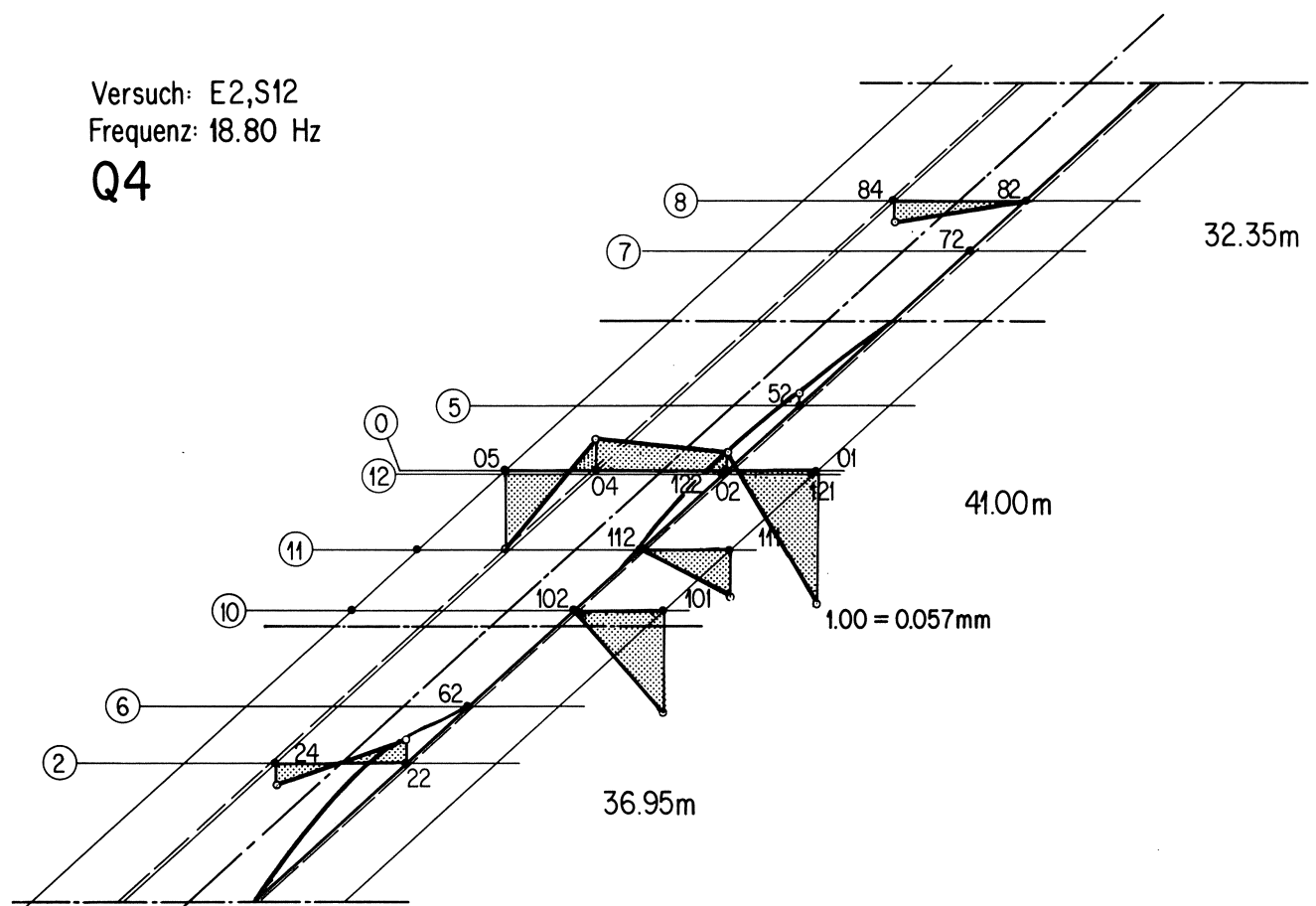


Bild 98: Beispiele von räumlich dargestellten Eigenformen (für zwei Querbiege-Eigenschwingungen).

Bei der Schwingung T1 ist der bei E1 beachtliche Einfluss von T3 auf die Gesamtamplitude bei E2 nicht mehr vorhanden (A1.6 und A1.56). Der Grund hierfür ist nicht offensichtlich, denn das Frequenzverhältnis $T3/T1$ beträgt für den Anregungspunkt S12 und E1 1.984, für S12 und E2 2.016, ist also für beide Versuchsreihen praktisch identisch. Ebenso sind die Formen beider Schwingungen im wesentlichen gleich geblieben. Bezüglich der Form kann festgestellt werden, dass die Anforderungen an Linearität und Phasenlage der Amplitude gut erfüllt sind.

Bei der Form der Schwingung T2 fällt auf, dass der Knoten, in dem sich die Drehrichtung des Querschnittes ändert, bei E1 in der Stütze im Schnitt 10, bei E2 aber ungefähr in der Mitte des 37-m-Feldes liegt. Besonders ausgeprägt gilt dies für Anregung in S12 (A1.16, A1.67). Amplitudenverteilung und Phasenlage entsprechen den Erwartungen bei E1 und beiden S-Stellungen, bei E2 aber nur für S12. Bei Anregung in S11 ist die modale Amplitude im Schnitt 11 am Konsolkopf, d.h. im Anregungspunkt, deutlich grösser als erwartet.

Instabilitäten im Knoten der Schwingungsform treten bei T3 im Gegensatz zu T2 nicht auf. Dieser liegt immer bei der Stütze, die das 32-m-Feld vom 41-m-Feld trennt (A1.20, 22, 24, 71, 73, 75). Dagegen sind ebenfalls gewisse Ueberhöhungen der Amplitude der Konsolköpfe festzustellen: Bei E1 im Schnitt 10 für Anregung in S10, bei E2 im Schnitt 12 für alle drei S-Stellungen.

Bei T4 scheint es sich um eine ideale Torsionsschwingung zu handeln, deren Form zu keinen Bemerkungen Anlass gibt. Wesentliche Unterschiede zwischen E1 und E2 sind nicht festzustellen (A1.26, 28, 77, 79).

Wie bereits bei der Besprechung der Resultate von E1 angetönt, lässt sich die Anzahl Knoten der Form von T5 nicht eindeutig bestimmen (A1.32, 34, 83, 85). Der unsichere Bereich betrifft das 32-m-Feld. Insbesondere ist die Phasenlage der Horizontalbewegung des Kopfes der an dieses Feld anschliessenden Stütze unklar. Einige Bemerkungen lassen sich aber für den Bereich zwischen dem Schnitt 5 und dem beim Schnitt 3 gelegenen Widerlager anbringen. Der Schwingungsknoten zwischen den Schnitten 12 und 11 ist in jedem Fall vorhanden. Ein weiterer Knoten im 37-m-Feld liegt für E1 zwischen den Schnitten 6 und 2, für E2 aber zwischen Schnitt 2 und dem Widerlager. Dies gilt sowohl für An-

regung in S10 als auch in S11. Während die Verteilung der Phase über den Querschnitt den Erwartungen entspricht, deutet die Amplitudenverteilung in den Schnitten 10 und 11 bei Anregung in S10 darauf hin, dass in diesem Fall der T-Bewegung eine ausgeprägte asymmetrische Q-Bewegung überlagert ist.

Dabei handelt es sich sehr wahrscheinlich um die Schwingung Q1, die bei etwas höherer Frequenz als T5 identifiziert werden konnte. Warum Q1 nur bei E2, nicht aber bei E1 erscheint, ist nicht klar. Möglicherweise fallen für E1 die Frequenzen von T5 und Q1 zusammen.

Die Schwingung T6 weist mit sechs Halbwellen in der Messlinie 2 eine so komplizierte Form auf, dass auch mit der für E2 gültigen Instrumentierung die Identifikation mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist (A1.36, A1.89). Von den Messschnitten 10, 11 und 12 liegt lediglich der Schnitt 11 in einem Schwingungsbauch. Aus der Amplituden- und Phasenverteilung in diesem Schnitt und aus der Regelmässigkeit der Form der Messlinie 2 kann jedoch geschlossen werden, dass es sich eher um eine T- als um eine asymmetrische Q-Schwingung handelt.

Die Diskussion der Q-Schwingungen stützt sich vorwiegend auf die Ergebnisse der Versuchsreihe E2. Ausser für QC und Q4, die möglicherweise miteinander verwandt sind, kann zwischen den Resultaten für E1 und E2 kein Zusammenhang hergestellt werden. (Dies ist vor allem auf die Unterschiede in der Instrumentierung zurückzuführen.) Um nicht einen möglicherweise falschen Eindruck entstehen zu lassen, sind deshalb die Q-Schwingungen für E1 und E2 in unterschiedlicher Weise bezeichnet.

Q1 ist eine asymmetrische Q-Schwingung im Bereich der Schnitte 10 und 11, wobei die modale Amplitude der Kastenstege praktisch gleich Null ist (A1.87).

Q2 ist eine symmetrische Q-Schwingung im Bereich des mittleren Brückenfeldes (A1.92, 94, 98, 100). Die modale Amplitude der Konsolköpfe ist zwei- bis dreimal so gross wie diejenige der Kastenstege. Die Phase wechselt innerhalb des erwähnten Bereiches in Brückenlängsrichtung zweimal das Vorzeichen. Bei zentrischer Anregung in S1 fällt als einziger Unterschied zwischen Q2A (16.00 Hz) und Q2B (17.00 Hz) auf, dass jeweils einer der beiden Konsolköpfe eine grössere Amplitude aufweist als der andere. Dies

könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Belag nicht über die ganze Querschnittsbreite eingebracht war; denn die lediglich mit Betonwürfeln belastete Konsole weist die grössere Amplitude bei der tieferen Frequenz auf als die sicher steifere, mit dem Belag versehene Konsole.

Bei gleicher modaler Form der Messlinie 2, d.h. zweimaliger Vorzeichenwechsel der Phase innerhalb des Mittelfeldes der Brücke, weist Q3 eine andere Querschnittsform auf als Q2 (A1.96). Es scheint sich um die Ueberlagerung einer antimetrischen mit einer symmetrischen Bewegung zu handeln, so dass die resultierende Amplitude der beiden Konsolköpfe unterschiedlich gross und gegenphasig ist.

Q4 hat wiederum eine symmetrische Schwingungsform, wobei sich jetzt aber die Konsolköpfe gegenphasig zu den Kastenstegen bewegen (A1.104). Innerhalb des mittleren Brückenfeldes scheint die Phasenlage konstant zu sein. Möglicherweise handelt es sich dabei um die gleiche Schwingung, wie sie für die Reihe E1 mit QC bezeichnet ist (A1.49, 51).

Verglichen mit Q4 ist für Q5 die Phasenlage in Querrichtung noch verwickelter: Die beiden Konsolköpfe und ein Kastensteg weisen die eine, der zweite Kastensteg die entgegengesetzte Phasenlage auf (A1.106).

Schliesslich ist die Form von Q6 verwandt mit jener von Q1, wobei aber die Bewegung in den Schnitten 10 und 11 nicht mehr gleich-, sondern gegenphasig ist (A1.108). Damit dürfte auch der Frequenzunterschied zwischen diesen beiden Q-Schwingungen erklärt sein.

Als Illustration zeigt Bild 98 die für Q2B und Q4 ermittelten Eigenformen.

2.63 Vergleich Theorie/Experiment

Aus vorgenannten Gründen umfasst die Diskussion hier nur L- und Q-Schwingungen. Bezüglich der L-Schwingungen fällt sofort auf, dass die Schwingung L1 zwar bei der Berechnung, nicht aber experimentell nachgewiesen wurde. In der Annahme, ein Experiment sei immer zuverlässiger als die Theorie, wurde diese Diskrepanz zunächst nicht weiter beachtet. Die später durchgeführte Analyse des Ausschwingverhaltens der Deibüel-Brücke im

Frequenzbereich ergab jedoch, dass L1 nicht eine Erfindung des Computers, sondern eine reale Tatsache ist. Dieser Befund ergab sich jedoch nur deshalb, weil sich diese Analyse im Frequenzbereich über ganze Versuchsserien und damit über das gesamte Spektrum der Fahrgeschwindigkeit erstreckte. Im allgemeinen wird der Ausschwingvorgang nämlich von einer Kombination aus L2, L3 und L4 dominiert. Dass L1 dominant in Erscheinung tritt, ist nur relativ selten der Fall. Die nach unserer Erfahrung als aussergewöhnlich zu taxierende Tatsache, dass ein und dieselbe Brücke im Ausschwingen zwei völlig voneinander verschiedene Verhaltensmuster zeigt, wird später noch zu diskutieren sein.

Die Ueberprüfung der berechneten Eigenformen gibt einen Hinweis, warum L1 bei den Versuchsreihen E1 und E2 nicht gefunden werden konnte. Im Bild 74 sind neben den vertikalen auch die charakteristischen horizontalen modalen Amplituden eingetragen. Vergleicht man nun für L1 bis L7 diese horizontale Amplitude mit der jeweils grössten vertikalen Amplitude, stellt man fest, dass dieses Verhältnis für L1 mit 0.84 einen vergleichsweise grossen Wert erreicht. Mit anderen Worten: Im Gegensatz zu den Schwingungen L2 bis L7, wo sich der Ueberbau vorwiegend in vertikaler Richtung bewegt, ist die Schwingung L1 mit einer Horizontalbewegung in Brückenlängsrichtung in der Grösse von 84% der maximalen vertikalen Amplitude verbunden. Die praktisch ausschliesslich in vertikaler Richtung in die Brücke eingeleitete Energie des Schwingungserregers genügt offenbar nicht, um diese Horizontalbewegung zu erzwingen und damit L1 anzuregen.

Bild 99 zeigt den Vergleich zwischen den theoretischen und den experimentell bestimmten Frequenzen und Formen der Eigen-schwingungen L2 bis L6. Den Resultaten aus den Versuchsreihen E1 und E2 werden dabei die Ergebnisse aus den entsprechenden Berechnungen gegenübergestellt, wobei den unterschiedlichen Randbedingungen bezüglich Belagsausführung Rechnung getragen ist. Für L2 bis L4 kann die Uebereinstimmung von Frequenz und Form als gut bis sehr gut bezeichnet werden. Dies trifft bei L5 nur für das mittlere Brückenfeld zu, während für L6 sowohl bezüglich Frequenz als auch bezüglich Form grössere Diskrepanzen zu verzeichnen sind. Immerhin stimmt bei der Form dieser nur bei E1 beobachteten Schwingung die Phasenlage mit dem theoretischen Verlauf überein.

Wesentlich komplizierter als für L- und wahrscheinlich auch für T-Schwingungen sind die Verhältnisse bezüglich der Q-Schwingungen. Wie nicht anders zu erwarten ist, treten Q-Schwingungen nur in Ausnahmefällen in reiner Form auf. Bei symmetrischen Q-Schwingungen spielt das globale Längsbiegeverhalten, bei antisymmetrischen Schwingungen das Torsionsverhalten des Ueberbaus eine Rolle. Dieses globale Verhalten ist offensichtlich wesentlich komplexer, als für die Berechnung vorausgesetzt wurde. Ein Blick auf den Verlauf der Phase an den Konsolköpfen und den Kastenstegen zeigt, dass diese keineswegs über die Brückenlänge konstant ist, wie dies die Berechnung voraussetzt (s. beispielsweise A1.94). Trotzdem verläuft der Versuch nicht ganz erfolglos, zwischen Theorie und Messung der Q-Schwingungen einen Zusammenhang herzustellen. Dabei wird lediglich auf den für E2 gültigen Zustand der Brücke abgestellt.

Die Berechnung ergab für jeden untersuchten Fall jeweils eine antisymmetrische und eine höherfrequente symmetrische Q-Schwingung (Bild 75). Für den Bereich der Feldmitte liegt die für die antisymmetrische Schwingung erwartete Frequenz zwischen 8.1 Hz und 9.3 Hz. Da dies etwa der Frequenz von T4 entspricht, erstaunt es nicht, wenn diese Q-Schwingung in isolierter Form nicht identifiziert werden konnte. Die Form von T4 weist allerdings nicht auf "Mitbeteiligung" einer Q-Schwingung hin (A1.77). Dagegen

trifft dies für die Form von T2, $f = 6.70$ Hz, bei Anregung in S11 zu (A1.69).

Die berechnete Frequenz der entsprechenden symmetrischen Q-Schwingung beträgt 14.9 Hz bis 16.8 Hz. Zwischen der für den Fall "gefedert gelagerte Kastenstege" berechneten und der für Q2 gemessenen Schwingungsform herrscht gute Übereinstimmung (Bild 75, A1.94). Die für Q2 gemessene Frequenz beträgt 16 Hz bis 17 Hz. Es erscheint deshalb als vertretbar, wenn Q2 als zweite Q-Schwingung des Feldquerschnittes bezeichnet wird.

Im Stützenbereich herrschen bezüglich der antisymmetrischen Q-Schwingung insofern günstige Verhältnisse vor, als die Torsionschwingungen, die dort keinen Knoten aufweisen, frequenzmässig zu tief liegen, um noch beeinflussend wirken zu können. Dementsprechend bereitet die Zuordnung von Q1, $f = 12.6$ Hz, zur ersten Q-Schwingung des Stützenquerschnittes keine Schwierigkeiten (Bild 75, A1.87). Die berechnete Frequenz liegt allerdings mit $f = 16.4$ Hz offensichtlich zu hoch.

Die für den Stützenbereich gültige symmetrische Q-Schwingung konnte nicht mit Sicherheit identifiziert werden. Ebenso war es nicht möglich, zwischen den übrigen experimentell bestimmten Q-Schwingungen und der Theorie einen Zusammenhang herzustellen.

L6
E1
S12

Frequenz: 16.50 Hz gem.
13.87 Hz ger.

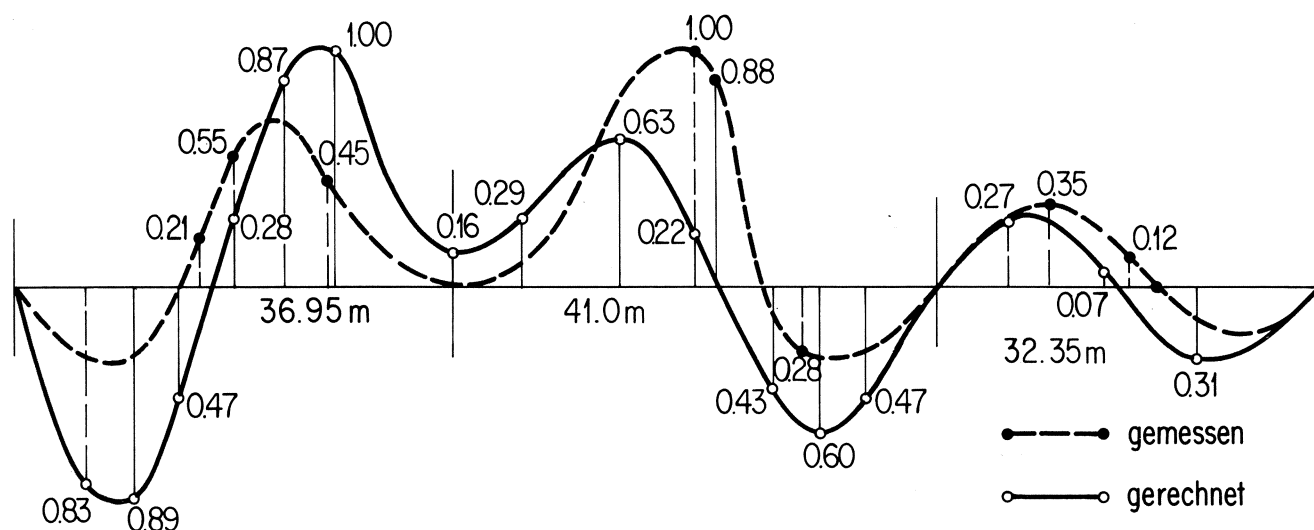


Bild 99a: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eigenfrequenzen und -formen (L6).

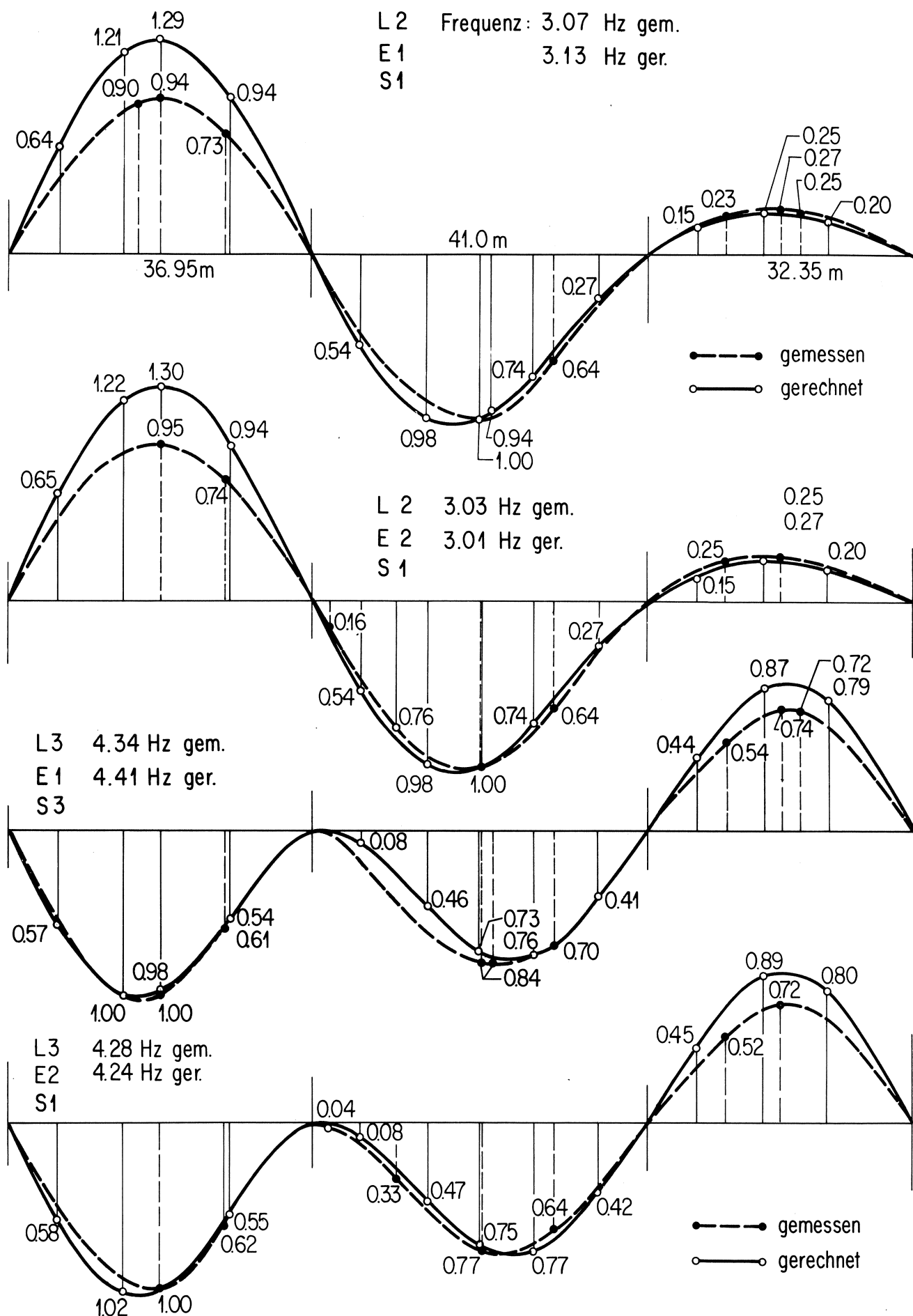
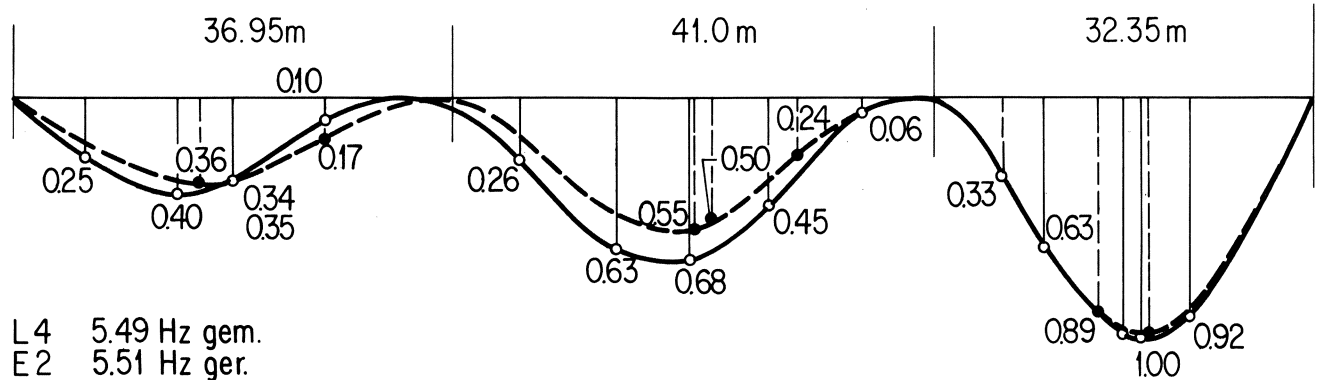


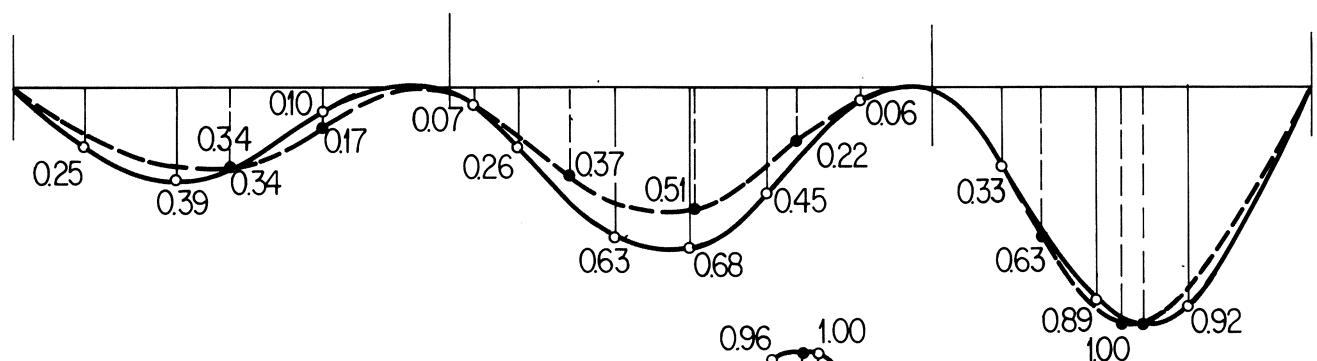
Bild 99b: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eigenfrequenzen und -formen (L2, L3).

L 4 Frequenz: 5.53 Hz gem.
E 1 5.73 Hz ger.
S 4

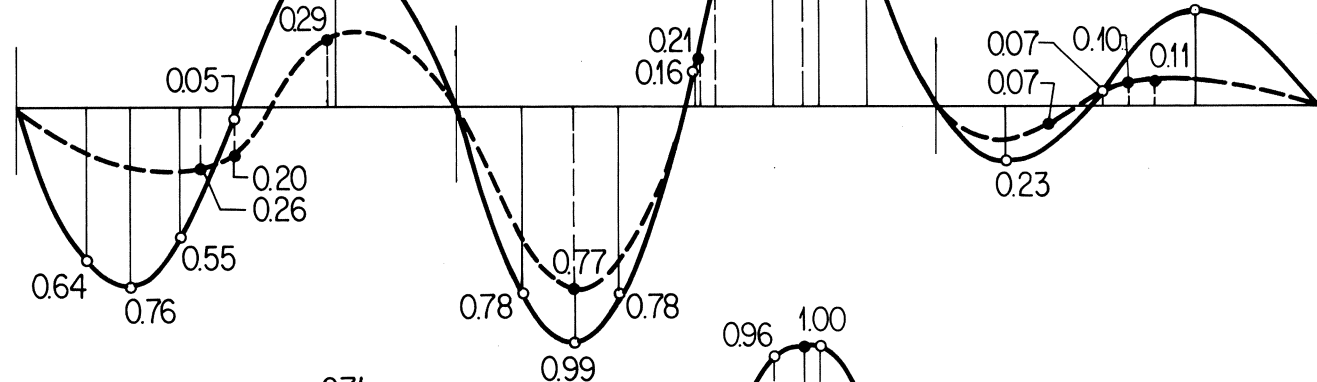
—•— gemessen
—○— gerechnet



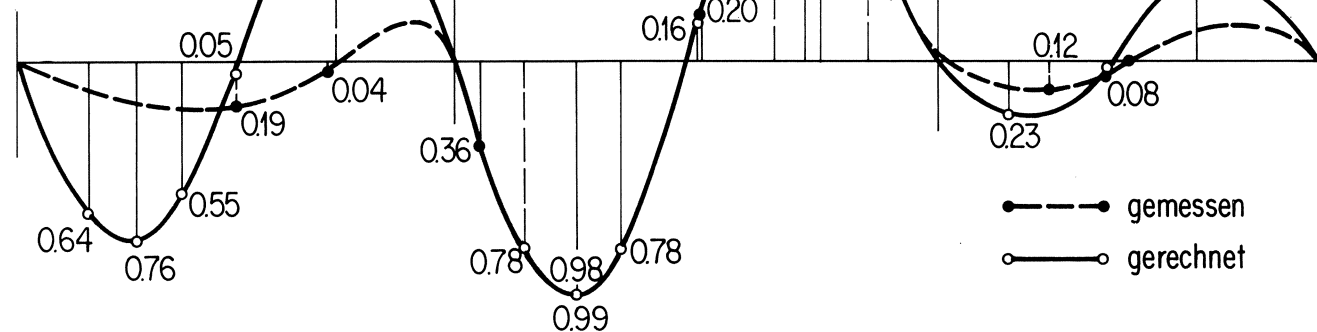
L 4 5.49 Hz gem.
E 2 5.51 Hz ger.
S 1



L 5 10.10 Hz gem.
E 1 11.23 Hz ger.
S 12



L5 10.00 Hz gem.
E2 10.81 Hz ger.
S11



—•— gemessen
—○— gerechnet

Bild 99c: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eigenfrequenzen und -formen (L4, L5).

2.7 Der Versuchsbelag

2.71 Allgemeines

In den meisten Berichten über dynamische Versuche an Strassenbrücken fehlen detaillierte Angaben über den Zustand oder die Ebenheit der Fahrbahn und der Fahrbahnübergänge. Der Grund dafür ist wahrscheinlich in der Tatsache zu suchen, dass die notwendigen Informationen nicht in einfacher Weise zu beschaffen sind. Carey/Irick beschreiben diese Tatsache sehr treffend [34]: "There is no instrument that can be plugged into a highway to tell in objective units how well it is serving the users". Es erstaunt deshalb nicht, dass sich die verschiedenen interessierten Kreise bis heute nicht auf eine international anerkannte Methode für die Bestimmung der Qualität einer Fahrbahnoberfläche, auch wenn "Qualität" ausschliesslich "Ebenheit" bedeuten soll, einigen konnten.

Fahrbahnunebenheiten wirken sich auf den Fahrkomfort, die Fahrsicherheit und die Beanspruchung von Strasse, Fahrzeug und Ladung aus [35]. Aus dieser Aufzählung wird klar, dass der Mensch und seine Ansprüche als Benützer einen wesentlichen Einfluss auf die Beurteilung der Qualität einer Fahrbahn ausüben. Leider ist sein Urteil immer subjektiv und messtechnisch nicht direkt erfassbar, so dass Anstrengungen unternommen worden sind, um einigermaßen objektive Massstäbe zu entwickeln.

Wahrscheinlich erste Schritte in dieser Richtung sind Anfang der sechziger Jahre in den USA im Zusammenhang mit dem AASHO Road Test unternommen worden [36]. Zwar wurde mit dem Rating Panel ein spezielles Gremium zur Beurteilung des Fahrbahnzustandes eingesetzt, aber es war von Anfang an klar, dass dieses Gremium aus zeitlichen Gründen nicht in der Lage sein würde, diese Aufgabe mit der erforderlichen Intensität zu erfüllen. Der PSI-Wert (Present Serviceability Index), eine von den Beurteilern aufgrund ihrer Erfahrung gewählte Zahl zwischen Null und Fünf für die Taxierung der Gebrauchsfähigkeit einer Fahrbahn, wurde deshalb durch multivariate Regression in eine mathematische Formel abstrahiert, die als Variablen eine Anzahl messbarer Grössen enthält (Längsprofil, Querprofil, Risse, Flickstellen) [34]. Dadurch war es zwar möglich, die Beurteilung der Beläge unabhängig vom Rating Panel vorzunehmen. Die Formel für den PSI-Wert war jedoch zufolge ihrer engen Verknüpfung mit

der subjektiven Meinung der Panel-Mitglieder bald Gegenstand von Diskussionen und konnte sich langfristig nicht weltweit durchsetzen.

In der Folge wurde in verschiedenen Ländern eine ganze Reihe von Geräten zur Messung und Beurteilung der Ebenheit von befestigten Fahrbahnen entwickelt [35], [37] - [47]. Ostwald erwähnt in [42] 26 verschiedene Messverfahren, die er in drei Gruppen einteilt:

- Messbrückenverfahren mit feststehender Basis (Typ I),
- Messbrückenverfahren mit bewegter Basis (Typ II) und
- dynamische Verfahren (Typ III).

Im vorliegenden Zusammenhang kann nicht im Detail auf alle diese Verfahren eingegangen werden. Es wird jedoch notwendig sein, Fragen zu diskutieren, die sich beim Einsatz je eines Gerätes der Typen I und II sowohl in bezug auf den Aufwand als auch auf die Genauigkeit und den Informationsgehalt des Messresultates stellen.

Aus den Erläuterungen im Abschnitt 2.3, "Das dynamische Uebertragungsverhalten von zweiachsigen Solofahrzeugen", geht hervor, dass für die vertikalen dynamischen Radlasten die spektrale Dichte der Unebenheiten in Fahrrichtung der massgebende Fahrbahnparameter ist. Das Unebenheitsspektrum einer Fahrbahn ist jedoch kein direkt anwendbares Mass für ihre Ebenheit. Es ist daher nicht erstaunlich, wenn die üblichen Geräte nicht dieses Spektrum, sondern einen einfachen numerischen Vergleichswert liefern, zum Beispiel die Standardabweichung oder die Varianz der Unebenheitsamplituden. Die einzige Ausnahme von dieser Regel, die dem Verfasser bekannt ist, ist der französische APL 25 [35], [43].

Die Bestimmung eines Unebenheitsspektrums ist wahrscheinlich zum erstenmal in [48] beschrieben worden. Das Längsprofil des Belages war dabei mit einem Nivelliergerät ausgemessen und das Spektrum anschliessend analytisch bestimmt worden (Verfahren Typ I). Die Dissertation von Braun enthält eine ganze Anzahl von seither experimentell bestimmten Unebenheitsspektren von Fahrbahnoberflächen [49].

In der Schweiz ist der Problemkreis "Ebenheit von Strassenbelägen" in zwei Normen geregelt [50], [51]. Die Bestimmung der Ebenheit einer Fahrbahn stützt sich auf zwei

Messgeräte vom Typ II ab, den Goniographen (heute praktisch nicht mehr im Einsatz) und den Winkelmesser ISETH. Der Winkelmesser ist in [35] ausführlich beschrieben (Bild 100). Im Prinzip wird der Verlauf des Winkels W zwischen zwei benachbarten, an das wahre Profil gelegten Sehnen von je 1 m Länge gemessen und kontinuierlich auf Magnetband aufgezeichnet. Die Fahrgeschwindigkeit des Messfahrzeuges kann dabei zwischen 15 km/h für sehr schlechte und 50 km/h für sehr gute Oberflächen betragen. Der s_W -Wert ist die Standardabweichung des W -Wertes über eine Messlänge von 250 m. Die Norm [51] definiert sowohl für den W -Wert, d.h. das Mass für eine lokale Unebenheit, als auch für s_W , d.h. das Mass für die mittlere Unebenheit einer längeren Strecke, Abnahmewerte für neue Strassen und Grenzwerte, bei deren Ueberschreiten Massnahmen getroffen werden müssen. Mitte der siebziger Jahre wurden die Auswertemethoden vom Institut für Strassen- und Untertagbau der ETH Zürich, ISETH, soweit entwickelt, dass trotz des sehr unregelmässigen Uebertragungsverhaltens des Gerätes die spektrale Dichte der Unebenheiten aus den Aufzeichnungen berechnet werden konnte [35].

Bezüglich des auf der Deibüel-Brücke zu verwendenden Belages wurden die folgenden Randbedingungen angestrebt:

- Der Belag sollte möglichst genau das Längsprofil einer natürlich gealterten Strasse aufweisen. Insbesondere sollte er keine dominierenden Wellenlängen enthalten, die zu periodischer Anregung der Fahrzeuge führen würden. Das Spektrum der Unebenheiten sollte im doppeltlogarithmischen Massstab demnach möglichst exakt einer Geraden entsprechen [49].



Bild 100: Der neue Winkelmesser ISETH.

- Der Belag sollte keinen extremen W -Wert aufweisen, um so deterministische Einflüsse von einzelnen aussergewöhnlichen Unebenheiten, beispielsweise im Bereich der Fahrbahnübergänge, auszuschalten. Für die Untersuchung des Einflusses solcher Unebenheiten waren die Fahrten über ein auf der Fahrbahn liegendes Brett vorgesehen.
- Der Belag sollte zunächst einen extrem hohen s_W -Wert aufweisen, der dann in einer oder mehreren Stufen verbessert werden sollte.
- In Querrichtung sollte die Ebenheit des Belages ideal sein, d.h. das Längsprofil sollte über die ganze Fahrbahnbreite konstant sein.
- Der Zustand der Fahrbahnoberfläche sollte, abgesehen von den vorgesehenen Verbesserungen, zeit-, last- und temperaturinvariant sein.

2.72 Belag A

Die Diskussion mit den Verantwortlichen des Instituts für Strassen- und Untertagbau der ETH Zürich, ISETH, ergab, dass dieses Institut bei einer Reihe von Teststrecken in der Schweiz die zeitliche Entwicklung der Ebenheit der Fahrbahn verfolgt und deshalb über deren aktuellen Zustand genau im Bild ist. Als ein in der Nähe von Dübendorf gelegenes geeignetes Objekt fand sich die Teststrecke Nr. 8, ein 250 m langes Stück einer asphaltierten Waldstrasse am Adlisberg. Einerseits war die Ebenheit dieser Fahrbahn mit $s_W = 6.78\%$ genügend schlecht, wurde doch der nach [51] für Strassen mit einer Ausbaugeschwindigkeit $v_a < 80$ km/h noch zulässige Grenzwert $s_W = 6\%$ leicht überschritten. Andererseits zeigte das Unebenheitsspektrum mit akzeptabler Genauigkeit die gewünschte lineare Form, so dass beschlossen wurde, ein Teilstück der Teststrecke Nr. 8 auf die 110 m lange Deibüel-Brücke abzubilden.

Bei der Diskussion über die Bauart des Versuchsbelages stellte sich rasch heraus, dass nur ein Betonbelag die gestellten Anforderungen bezüglich Profilgenauigkeit und -invarianz erfüllen konnte. Dank der grosszügigen Haltung der Firma Walo Bertschinger, Zürich, die sich vom vorgesehenen Aufbringen eines Ausgleichsmörtels einige neue Erkenntnisse in der Belagstechnologie versprach, konnten auch die finanziellen Klippen des Belagseinbaus umschifft werden.

Im Sommer 1977 wurde das Längsprofil eines 110 m langen Teilstückes der ISETH-Teststrecke Nr. 8 im Massstab 1 : 1 auf Papierstreifen von je 5 m Länge aufgezeichnet. Dies geschah mit Hilfe eines "Planum" genannten Gerätes, das uns das Kantonale Tiefbauamt Zürich zur Verfügung stellte und dessen Registriervorrichtung von der EMPA den Erfordernissen bezüglich des Aufzeichnungsmassstabes angepasst wurde (Bilder 101 bis 103). Die Koten der Endpunkte aller 5-m-Abschnitte wurden mit einem Nivellement bestimmt. Nach erfolgter rechnerischer Anpassung des unregelmässigen Gefälleverlaufes der Teststrecke Nr. 8 an das im Bereich der Deibüel-Brücke konstante Längsgefälle konnte das aufgezeichnete Profil direkt auf 100 mm breite Schalungsbretter übertragen werden. Diese Arbeit sowie das nachfolgende Aussägen des gewünschten Profils mit Hilfe einer Stichsäge wurden von der Abteilung Holz der EMPA mit grosser Akribie besorgt.

Im Herbst 1977 erstellte die Firma Walo Bertschinger den Versuchsbelag auf der Deibüel-Brücke. Die Bilder 104 bis 107 illustrieren den Bauvorgang: Montage der Schalungsbretter, Verlegen einer Plastikfolie (der Belag wurde nach den Versuchen wieder entfernt und durch den definitiven Schwarzbelag ersetzt), Einbringen des Betons, Abziehen mit einem geeigneten, von den paarweise gleich ausgesägten Oberkanten der Schalungsbretter geführten Vibrator, Abtalschieren und Anbringen eines Besenstriches von Hand. Aus Kostengründen wurden die Abmessungen des Belages auf das absolut Notwendige beschränkt: Auf der Brücke zwischen den Fahrbahnübergängen auf einer Länge von 115 m und in einer Breite von 7.2 m, entsprechend der Lage der beiden vorgesehenen Fahrspuren, und vor der Brücke ebenfalls 115 m lang, aber nur in der Breite einer Fahrspur (4.2 m). Um einen stichhaltigen Vergleich der dynamischen Radlasten für die Fälle "Fahrt auf starrer Unterlage" und "Fahrt über die Brücke" zu ermöglichen, wurden für beide Belagsabschnitte die gleichen Schalungsbretter verwendet. Um die Symmetrie in der Massenverteilung zu erhalten, wurden im belagslosen Bereich der Brückenfahrbahn rund 80 t Ballast in Form von Betonwürfeln aufgebracht (Bild 3). Im Anfahrtsbereich vor der Brücke erhielt die zweite Fahrspur einen Schwarzbelag, der übrigens mit der Zeit recht erhebliche Spurrinnen aufwies. Bild 108 zeigt den fertigen Belag auf der Brücke, während Bild 109 einen Ueberblick über die Verhältnisse im Bereich der Anfahrtsstrecke gibt.

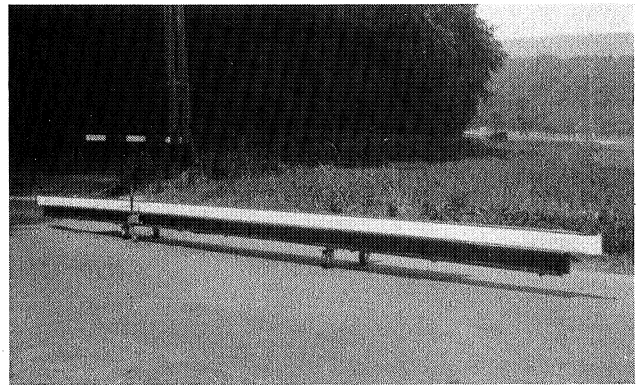


Bild 101: Das Gerät zur 1:1-Aufzeichnung der Fahrbahnoberfläche (Frontansicht).

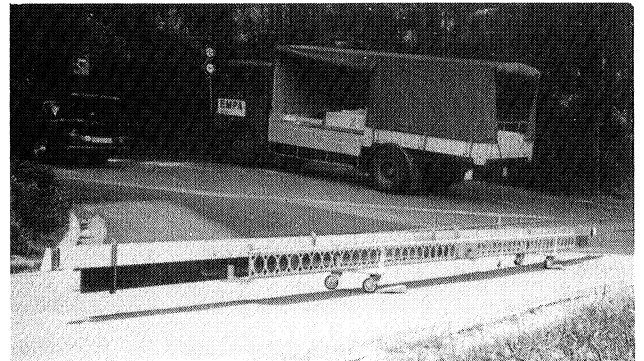


Bild 102: Das Gerät zur 1:1-Aufzeichnung der Fahrbahnoberfläche (Ansicht von der Rückseite).

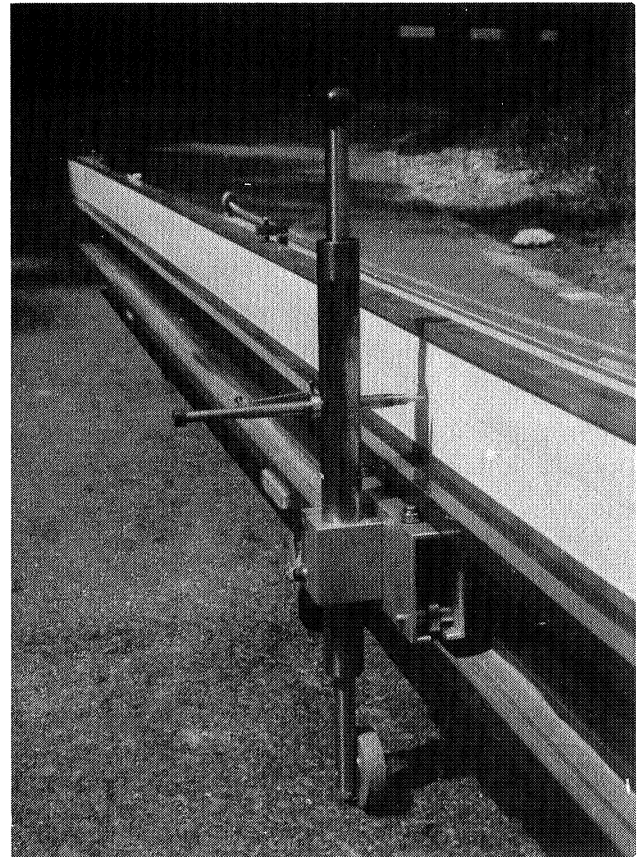


Bild 103: Aufzeichnung des Längsprofils der Fahrbahn mittels eines Kugelschreibers auf einen Papierstreifen (Massstab 1:1).



Bild 104: Einbau des Versuchsbelages A. Sichtbar sind die Randabschalung mit der ausgesägten Oberkante und die Plastikfolie für die Trennung des Belages vom Konstruktionsbeton.

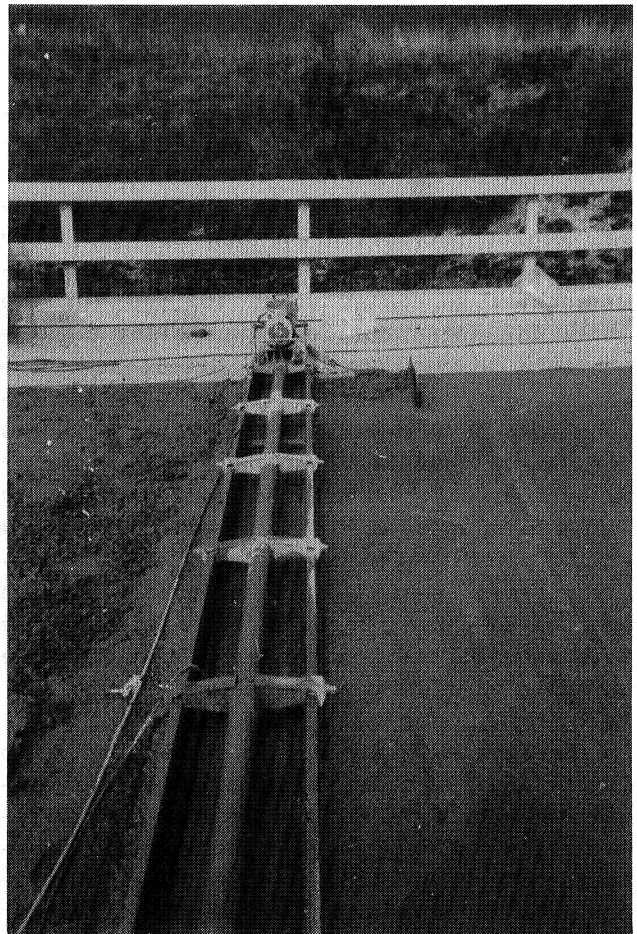


Bild 106: Einbau des Versuchsbelages A. Abziehen der Oberfläche mit einem Vibrationsbalken, der von den Oberkanten der zwei Abschalungen geführt wird.

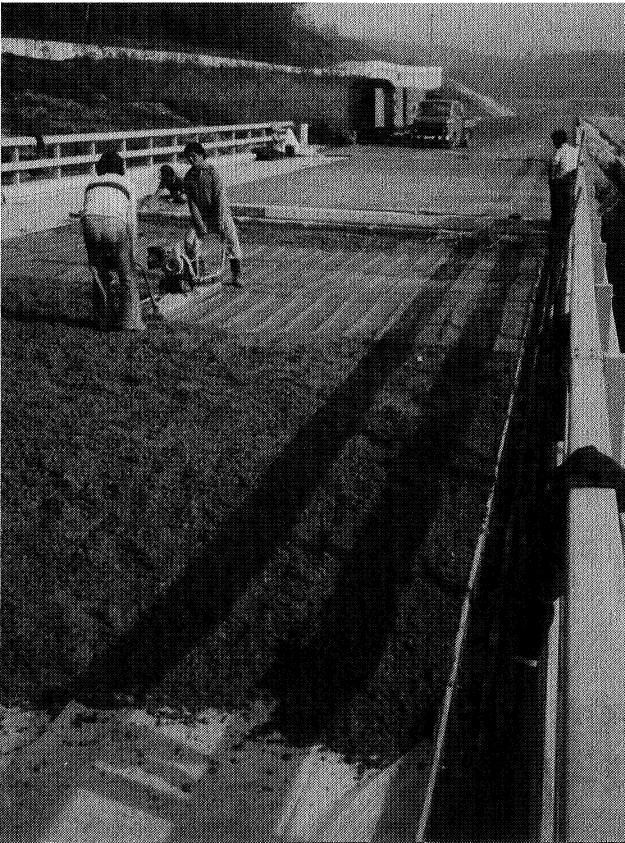


Bild 105: Einbau des Versuchsbelages A. Verdichten des Betons mit einem Vibrationsbalken.

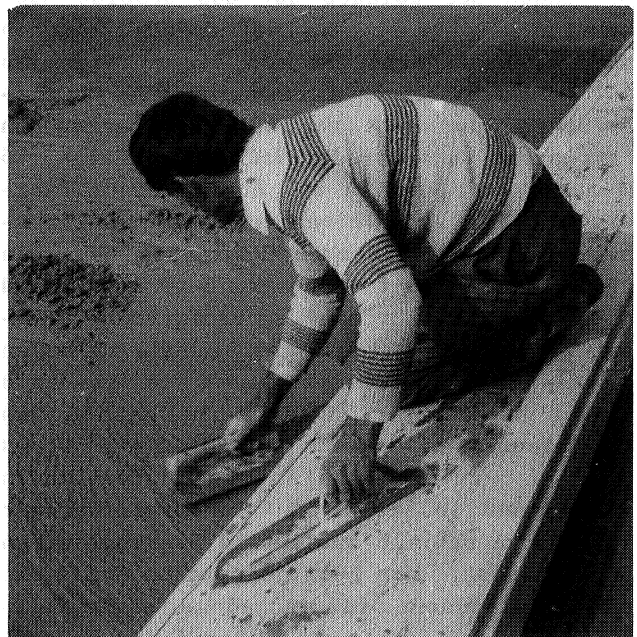


Bild 107: Einbau des Versuchsbelages A. Abschliessende Behandlung der Oberfläche von Hand.

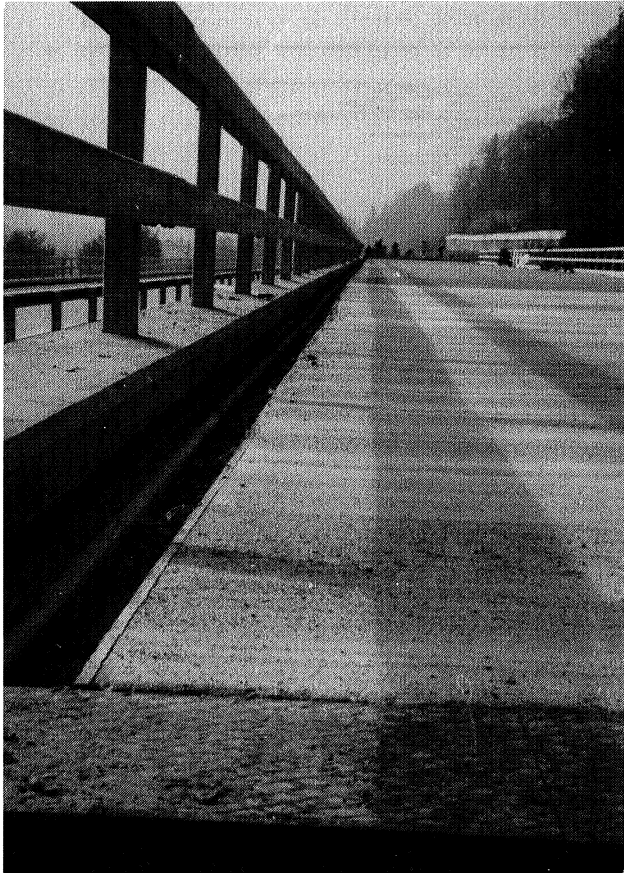


Bild 108: Der fertige Belag A im Bereich der Brücke.

Im Bericht des ISETH über die Ebenheitsmessung an der Versuchsstrecke Deibüel wird unter anderem ausgeführt [52]: "Zunächst kann festgestellt werden, dass die Reproduktion der Unebenheiten mittels Schablone gut gelungen ist. Der angestrebte Wert von $s_W = 6.78\%$ wurde fast erreicht; die in den drei Spuren gemessenen Werte betrugen $s_W = 6.67\%$, 6.48% und 6.00% . (...) In der Ebenheitsnorm [51] wird ein W-Wert von $W = 28\%$ zugelassen. Unsere Messungen ergaben jedoch, dass die maximalen W-Werte lediglich zwischen 14% und 20% erreichen. Es werden also in der Praxis, beispielsweise im Bereich von Brückenfugen, grössere W-Werte toleriert, als auf der Versuchsstrecke vorhanden sind. Auf Beilage 5 sind die Leistungsdichten in Funktion der Wellenlänge dargestellt. Auch hier wird durch Vergleich bestätigt, dass die Reproduktion der Unebenheiten gut gelungen ist." Bild 110 zeigt die im ISETH-Bericht erwähnte Beilage 5 mit den Spektren der Teststrecke Nr. 8 und des Versuchsbelages Deibüel. Um ihn von einer später erzeugten Belagsvariante zu unterscheiden, wird dieser ursprüngliche Belag in der Folge mit "Belag A" bezeichnet.

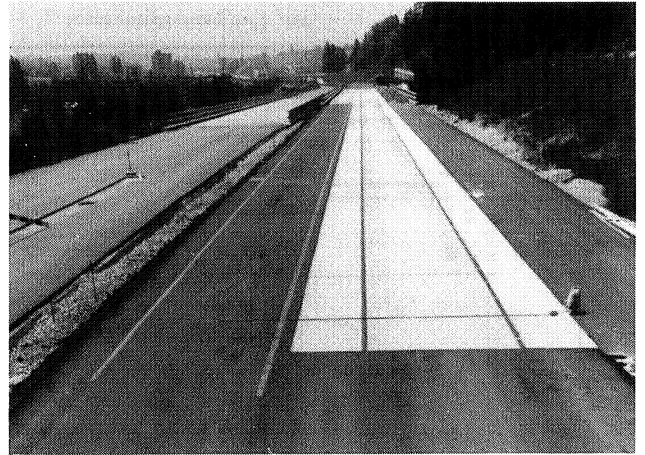


Bild 109: Der fertige Belag A im Bereich der Anfahrtsstrecke (Blick in Fahrtrichtung).

Der vom ISETH eingesetzte Winkelmesser (Bild 100) weist einige Eigenschaften auf, die die Genauigkeit des berechneten Unebenheitsspektrums und dessen Frequenzumfang beeinträchtigen:

- Wie bei allen Geräten vom Typ II wird nicht das Längsprofil direkt, sondern seine zweite Ableitung gemessen.
- Abgesehen davon, dass sie sehr kompliziert ist, weist die Übertragungsfunktion des Gerätes im Wegfrequenzbereich singuläre Punkte auf, d.h. die Amplituden gewisser Wellenlängen werden mit dem Faktor Null bewertet. Für Wellenlängen über 10 m fällt die Übertragungsfunktion zudem rasch auf Null ab [35].

Daraus ergab sich das Bedürfnis, den Versuchsbelag mit einem Gerät vom Typ I auszumessen und dann ein absolut zuverlässiges Spektrum zu erhalten. Die entsprechende Arbeit wurde im Herbst 1977 vom Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Braunschweig ausgeführt [53]. Das dabei verwendete Messgerät, der "Braunschweiger Profilograph", ist eine Weiterentwicklung des bekannten Köhler-Fuess-Gerätes. Das Gerät besteht im wesentlichen aus einer 5 m langen Schiene, über die ein durch mehrere Rollen und Räder geführter Messwagen geschoben wird (Bilder 111, 112). Dabei läuft ein Messrad über die Unebenheiten, und sowohl seine Vertikal- als auch seine Horizontalbewegung werden auf Magnetband registriert. Die Knoten der Endpunkte der 5-m-Messstrecken werden nivelliert. Während die Nettomesszeit mit dem Winkelmesser ISETH vielleicht 15 Minuten betrug, nahm die Messung mit dem Braunschweiger Profilographen mehr als zwei Arbeitstage in Anspruch.

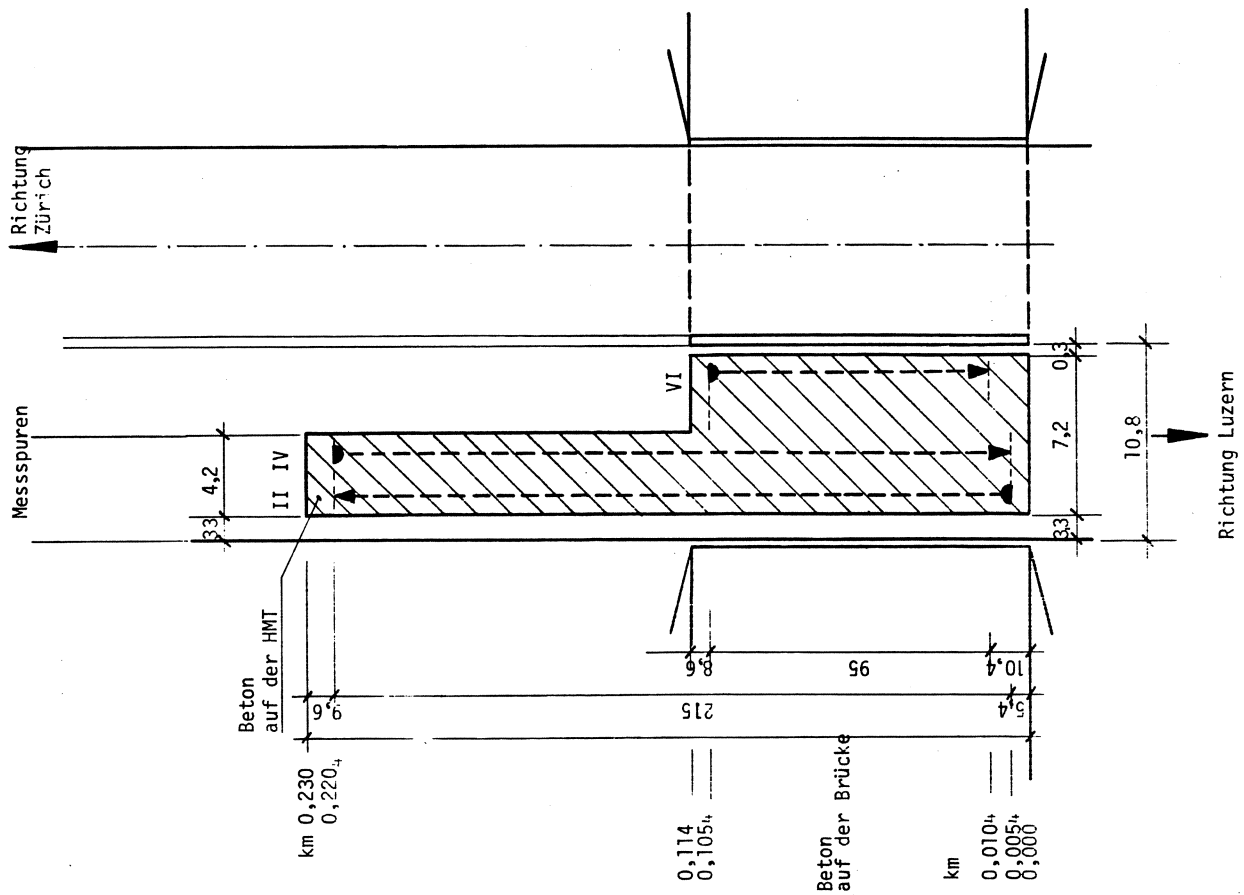
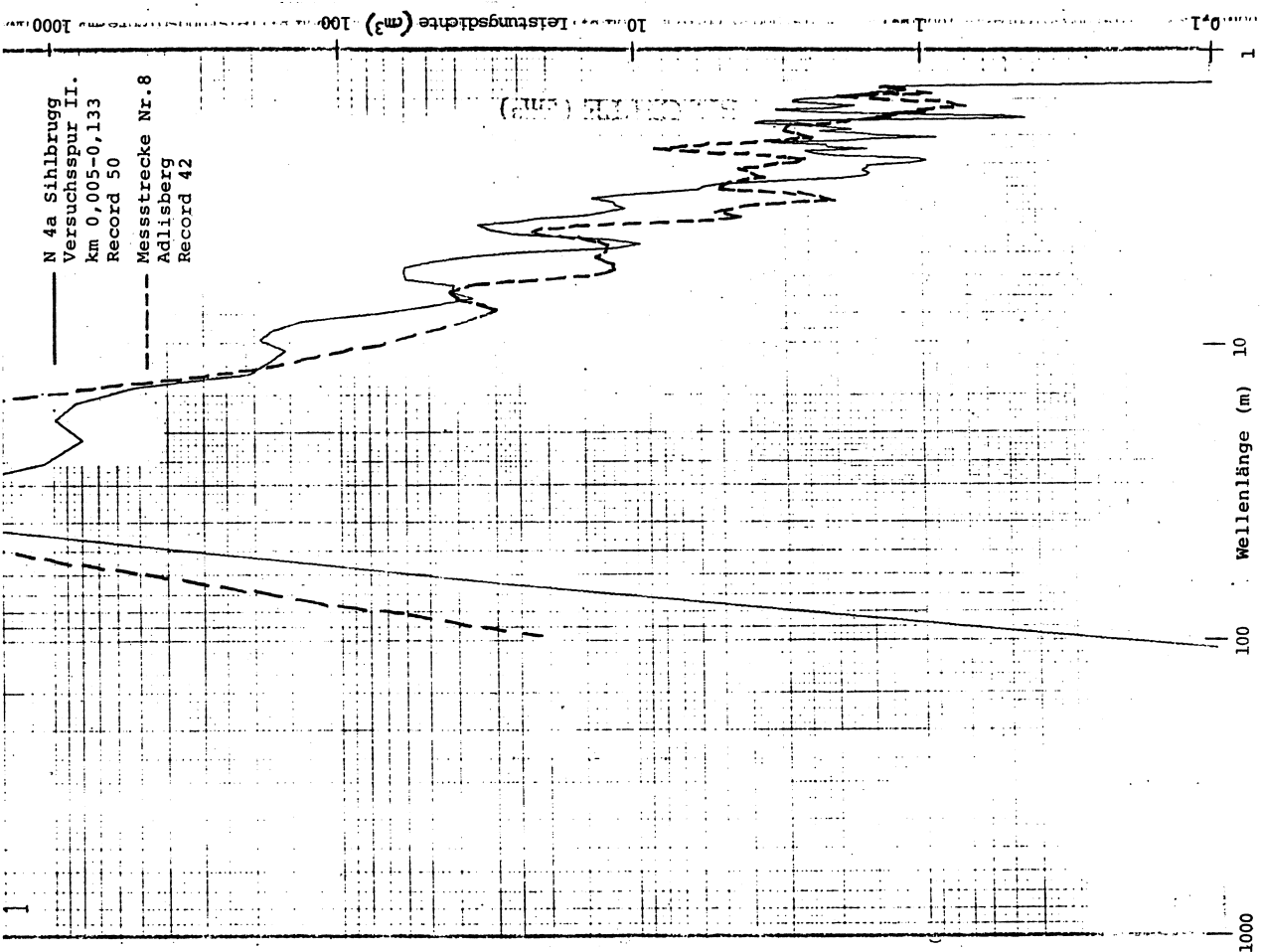


Bild 110: Vom ISETH mit dem Winkelmesser bestimmte Unebenheitsspektren. Resultate für die Teststrecke Nr. 8 und den Versuchsbelag A (aus [52]).

Die Resultate der Braunschweiger Messungen werden im entsprechenden Bericht wie folgt kommentiert [53]:

"Die während der Messung auf Magnetband gespeicherten Werte wurden später im Institut für Fahrzeugtechnik mit einer Schrittweite von 39 mm digitalisiert und zu den (...) spektralen Dichten der drei Einzelspuren, der Kohärenzfunktion und der Phasendiffe-

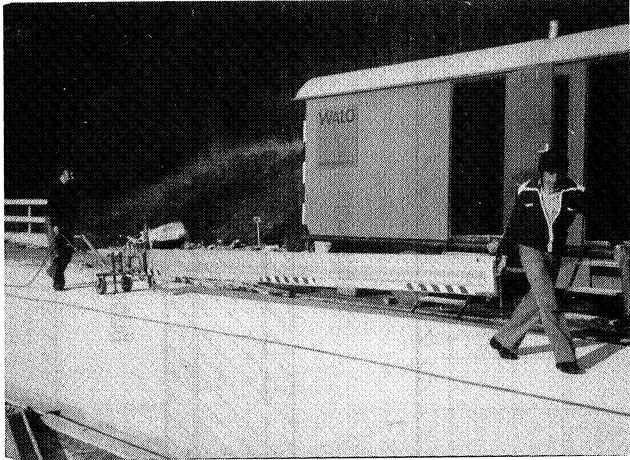


Bild 111: Vermessung des Längsprofils des Belages A mit dem Braunschweiger Profilographen.

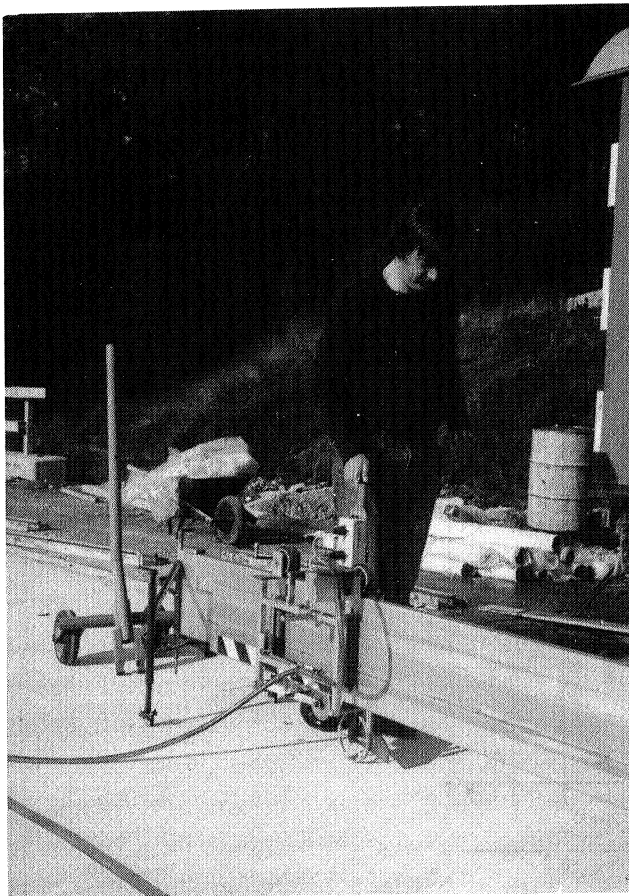


Bild 112: Der Braunschweiger Profilograph im Einsatz.

renzfunktion für das Spurpaar 2/3 verarbeitet (Bilder 113, 115).

Dabei zeigt sich, dass die Spektren der Einzelspuren im Wellenlängenbereich von 0.25 m bis 20 m der Beziehung

$$\frac{\Phi_h(\Omega)}{\text{cm}^3} = 14 \left[\frac{\Omega_0}{\Omega} \right]^{2.4}; \quad \Phi_h(\Omega_0) = 14 \text{ cm}^3 \quad w = 2.4$$

folgen. Die Bezugsdichte $\Phi_h(\Omega_0)$ macht eine Aussage über die Strassenqualität bei der Wegkreisfrequenz Ω_0 , und die Welligkeit w gibt den Dichteabfall über der Frequenz an (Bild 114). Auffällig ist zunächst, dass die spektralen Dichten der Spuren 2 und 3 nahezu identisch sind. Die Dichte einer ausmittelnden Geraden bei der Bezugswegfrequenz $\Omega_0 = 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ beträgt $\Phi_h(\Omega_0) = 14 \text{ cm}^3$, womit die Versuchsstrecke in der Klassifikation von Zementbeton-Fahrbahnen [49] als mittelmässig bis schlecht und nach der beabsichtigten DIN-Klassifikation als mittel eingeordnet werden kann. Der Welligkeitswert der mittleren Geraden ist mit $w = 2.4$ im Vergleich zu anderen vermessenen Strassen gross [49]. Das bedeutet, dass langwellige Unebenheiten im Spektrum relativ stärker vorhanden sind als kurzwellige. Ausgeprägte Periodizitäten liegen nicht vor.

Um den Zusammenhang der Unebenheiten der Spuren 2 und 3 beurteilen zu können, wurden die Kohärenz- und die Phasendifferenzfunktion dieses Spurpaares berechnet. Die Kohärenzfunktion γ ist im Bereich $0 < \gamma < 1$ definiert. Ist $\gamma = 0$ gibt es keinen statistischen Zusammenhang zwischen den beiden Unebenheitsfunktionen, bei vollständiger Korrelation ist $\gamma = 1$. Die für die Spuren 2 und 3 berechnete Kohärenzfunktion zeigt den bei bisherigen Messungen von Strassenunebenheiten ermittelten charakteristischen Verlauf einer Exponentialfunktion, die aber abweichend von früheren Ergebnissen in Richtung grosser Wegfrequenzen (kleiner Wellenlängen) verschoben ist (Bild 115). Die mittlere Phasendifferenz kann im Wellenlängenbereich $20 \text{ m} > L > 1 \text{ m}$ als vernachlässigbar klein angenommen werden. Mit grösserer Wegfrequenz nimmt der Phasenfehler infolge der abnehmenden Kohärenz progressiv zu.

Berücksichtigt man, dass im Wellenlängenbereich $20 \text{ m} > L > 3 \text{ m}$ der Phasendifferenzwinkel nahezu gleich Null und die Unebenheitsspektren identisch sind, folgt, dass die Unebenheitsverläufe $h(x)$ beider Spuren im Bereich grosser Wellenlängen, wahrscheinlich herstellungsbedingt, gleich sind."

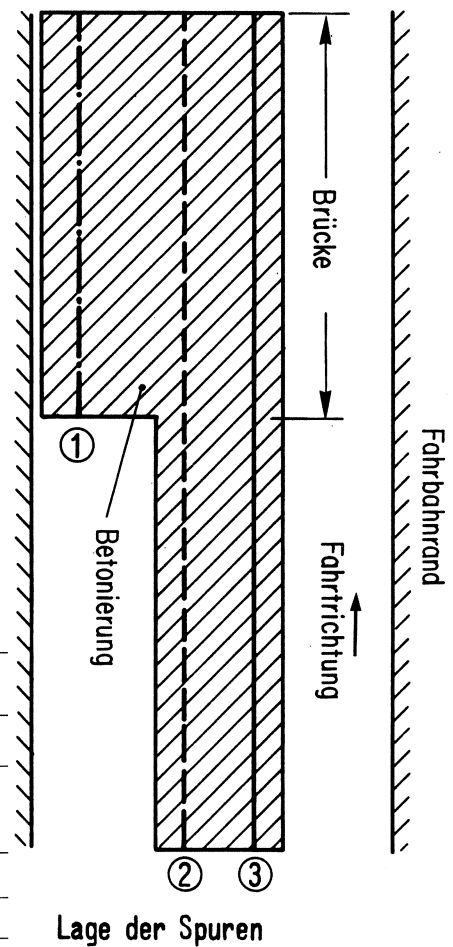
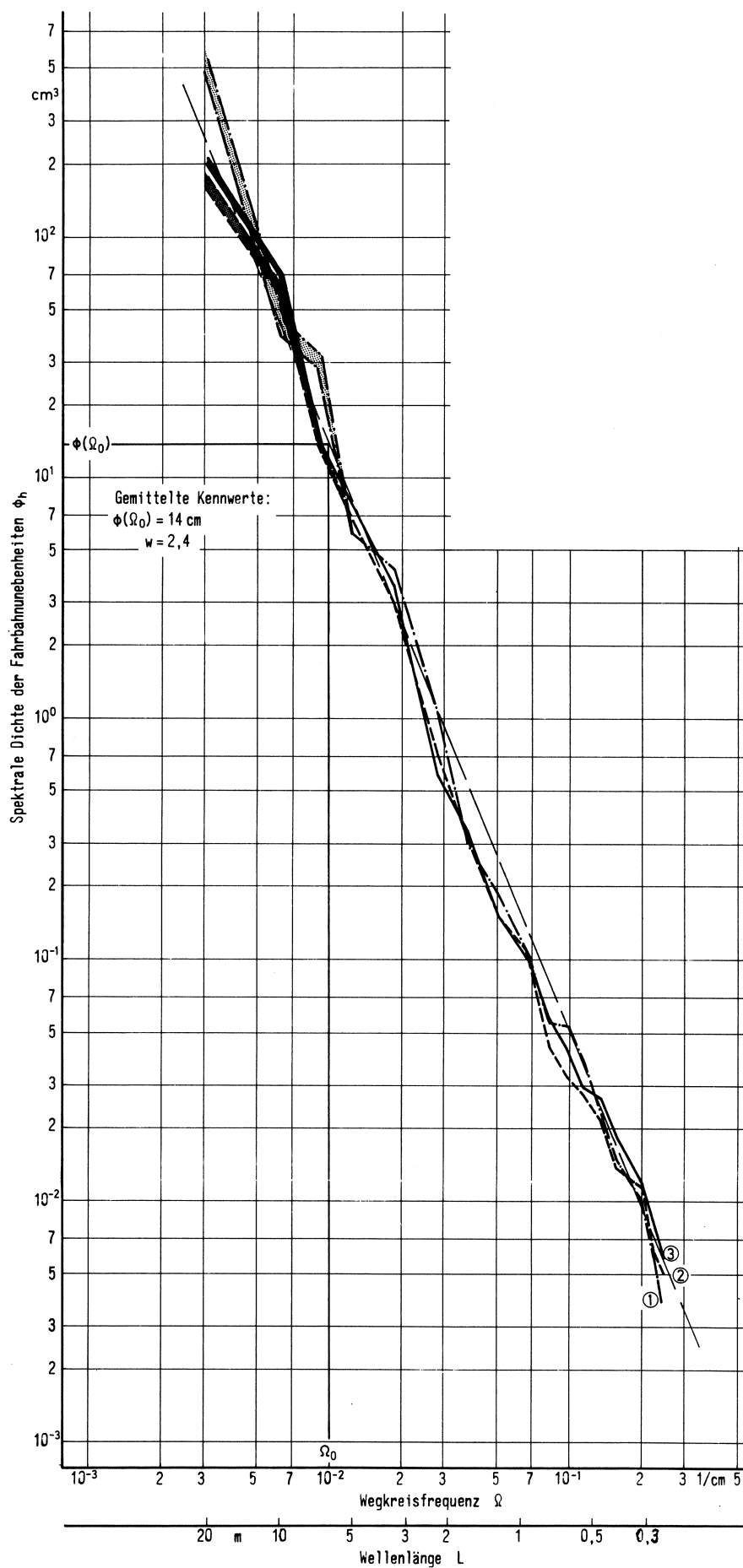


Bild 113: Mit dem Braunschweiger Profilographen bestimmte Unebenheitsspektren des Belages A (aus [53]).

2.73 Belag B

Nachdem auf dem oben beschriebenen Belag A 4780 Versuchsfahrten durchgeführt worden waren, wurde die Ebenheit der Fahrbahnoberfläche verbessert. Dabei gelangte ein vom Hersteller, Walo Bertschinger, Zürich, neu entwickeltes Verfahren zur Anwendung. Auf den bestehenden Belag wurde eine Ausgleichsschicht aus Kunststoffmörtel von 15 mm bis 25 mm Stärke aufgezogen (Bild 116).

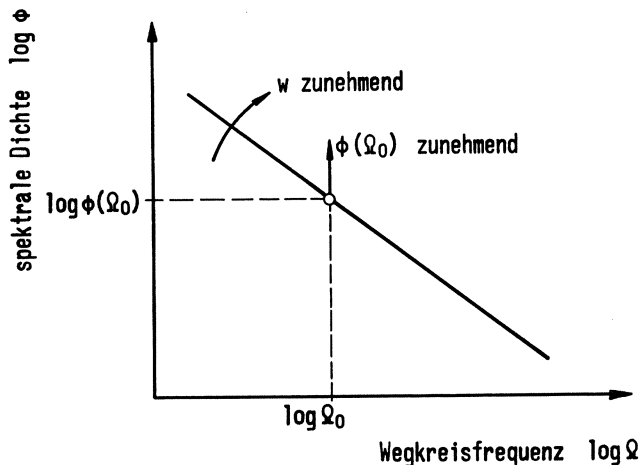


Bild 114: Schematische Darstellung der Bedeutung der zwei Parameter, die vom Iff für die Charakterisierung von Unebenheitsspektren verwendet werden (aus [53]).

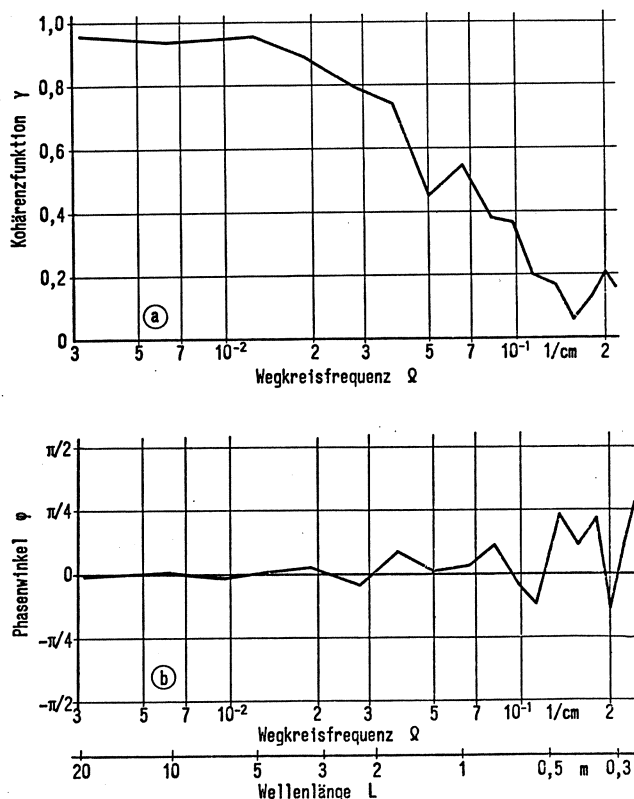


Bild 115: Kohärenzfunktion und Phasengang für die Radsuren 2 und 3 des Belages A (aus [53]).

Im August 1978 wurde die Ebenheit dieses verbesserten Belages B mit dem Winkelmesser ISETH untersucht [54]: "Die Ebenheit der Kunststoffmörtel-Verschleisschicht ist deutlich besser als die der ursprünglichen Verschleisschicht:

- Spur II: $s_W = 3.36\%$ im neuen und $s_W = 6.48\%$ im alten Zustand,
- Spur IV: $s_W = 3.32\%$ im neuen und $s_W = 6.00\%$ im alten Zustand,
- Spur VI: $s_W = 3.86\%$ im neuen und $s_W = 6.67\%$ im alten Zustand.

Nichtsdestoweniger ist die neu erzielte Ebenheit offensichtlich schlechter als der normierte Abnahmewert mit $s_W = 1.8\%$ bzw. 2.2% für neue Strassen mit einer Ausbaugeschwindigkeit $v_a > 80$ km/h bzw. $v_a < 80$ km/h. Auch die Grösse der Leistungsdichte hat sich verkleinert; am wirksamsten im Wellenbereich von rund $L = 50$ m bis 10 m". Bild 117 zeigt die Spektren der Beläge A und B.

Es war dem Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU Braunschweig in der kurzen Frist zwischen dem letzten Fahrversuch und dem Abbruch des gesamten Betonbelages nicht möglich, eine Vermessung der Oberfläche B mit dem Profilographen durchzuführen. Deshalb wurde das Längsprofil dieser Oberfläche mit Hilfe des vorgenannten Planums von der EMPA im Massstab 1 : 1 auf je 5 m lange Papierstreifen aufgezeichnet. Ebenfalls stellte man die Koten der Zwischenpunkte mittels Nivellement fest. Aus finanziellen Gründen konnte die Auswertung dieser Aufzeichnungen durch das IfF erst im Jahr 1982 erfolgen [55]: "Im Vergleich zu den Spektren aus dem früheren Bericht lassen sich



Bild 116: Einbau des Versuchsbelages B. Aufbringen der Schicht aus Kunststoffmörtel.

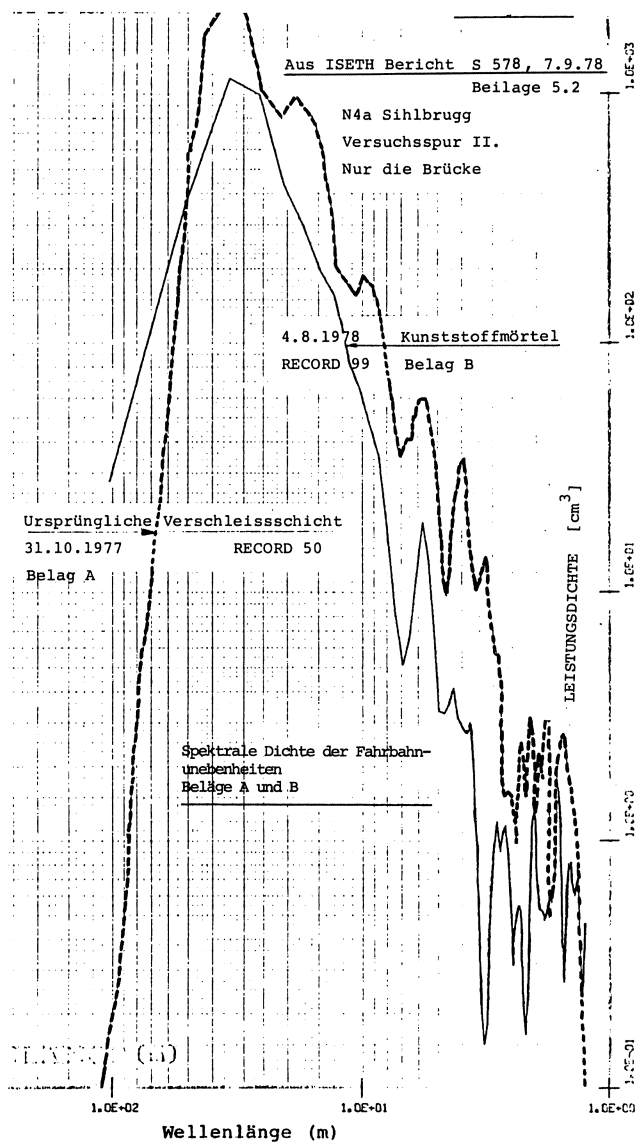


Bild 117: Vom ISETH mit dem Winkelmesser be-
stimmte Unebenheitsspektren. Resultate
für die Beläge A und B (aus [54]).

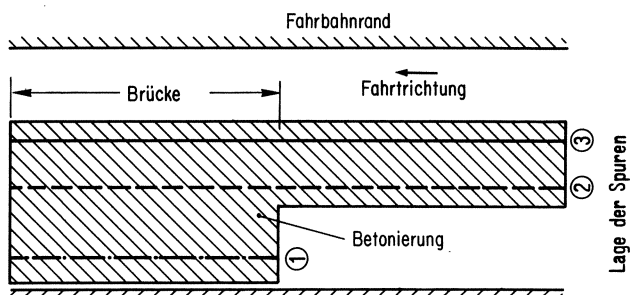
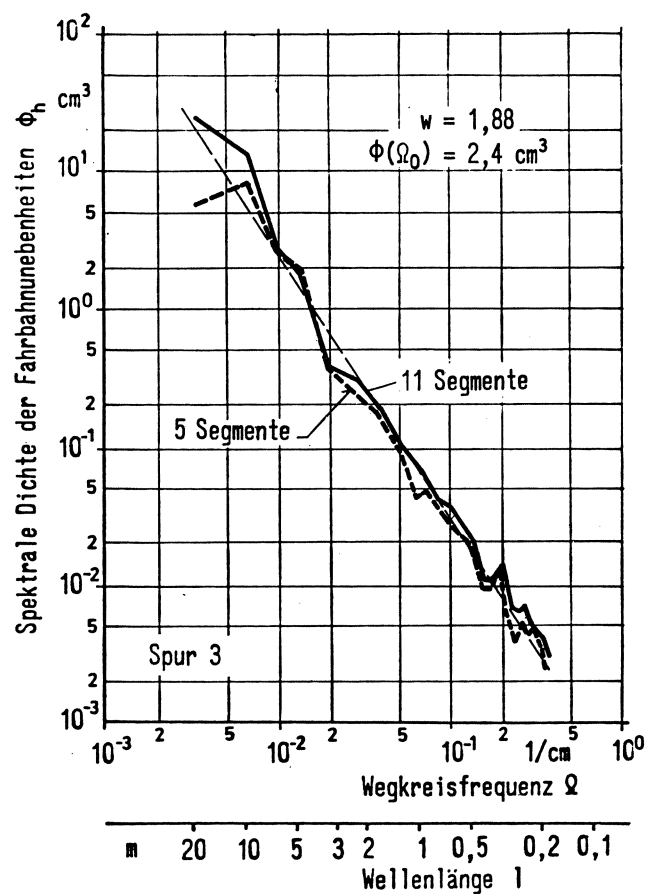
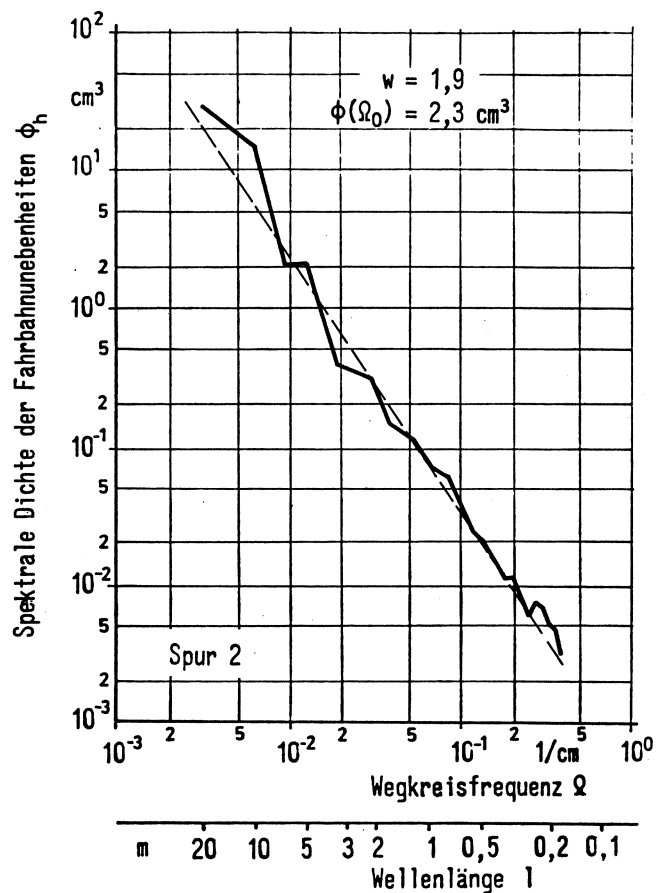


Bild 118: Vom Iff mit dem Braunschweiger Profilographen bestimmte Unebenheitsspektren. Resultate für
die Spuren 2 und 3 des Belages B (aus [55]).



die jetzt gewonnenen Spektren im Wellenlängenbereich von 0.25 m bis 20 m durch die Gleichung

$$\frac{\Phi_h(\Omega)}{\text{cm}^3} = 2.3 \left[\frac{\Omega_0}{\Omega} \right]^{1.9}; \quad \Phi_h(\Omega_0) = 2.3 \text{ cm}^3; \quad w = 1.9$$

näherungsweise beschreiben. Die Oberflächen-ebenheit liegt damit an der Grenze zwischen den Bezeichnungen "sehr gut" und "gut" in der in Vorbereitung befindlichen ISO-Spezifikation, sie ist also sehr viel besser als bei den früheren Messungen. Die Unebenheitsamplituden sind nahezu auf ein Drittel des ehemaligen Wertes zurückgegangen. Ausgeprägte Periodizitäten liegen wiederum nicht vor. Wie schon bei den früheren Messungen zeigen die Kohärenz- und die Phasendifferenz-Funktionen wieder einen stärkeren Zusammenhang der Unebenheiten in rechter und linker Spur bis zu kürzeren Wellenlängen als üblich, bei grossen Wellenlängen aber geringere Korrelation als üblich. Die Ursache wird in der Schablonenfertigung der Ursprungsoberfläche und dem jetzt für die Ein-ebnung verwendeten Spachtelverfahren gesehen."

Die Bilder 118 bis 120 zeigen die für den Belag B ermittelten Ergebnisse. Während der Vergleich der für alle drei vermessenen Spuren und die Beläge A und B bestimmten Unebenheitsspektren in Bild 121 dargestellt ist, zeigt Bild 122 die Kohärenz- und Phasendifferenzfunktionen für das Spurpaar 2/3 und wiederum beide Beläge.

Auf dem Belag B wurden 1075 Fahrten durchgeführt. Sowohl aus zeitlichen wie auch aus finanziellen Gründen war es nicht möglich, die Ebenheit des Belages ein zweites Mal zu verbessern.

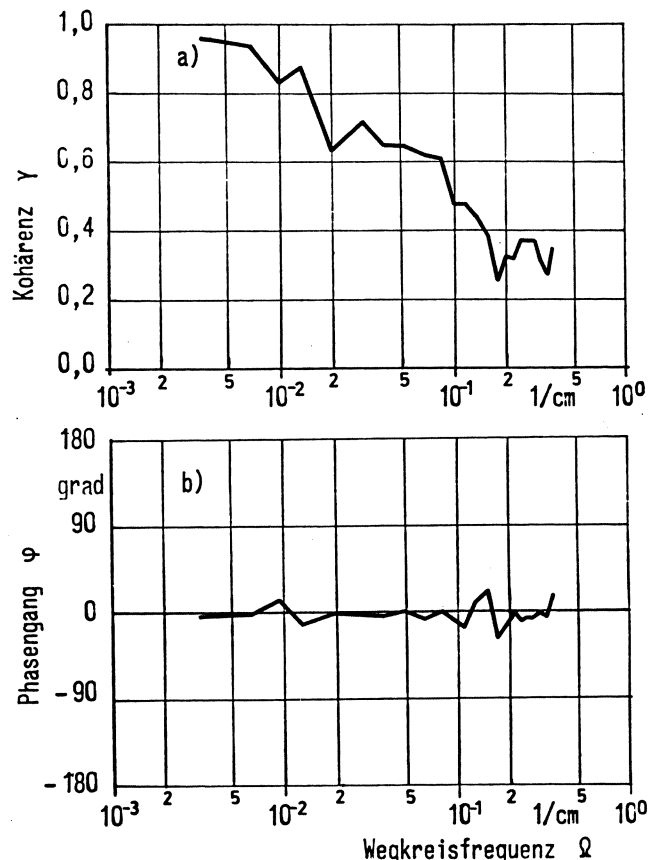


Bild 119: Kohärenzfunktion und Phasengang für die Radspuren 1 und 2 des Belages B (aus [55]).

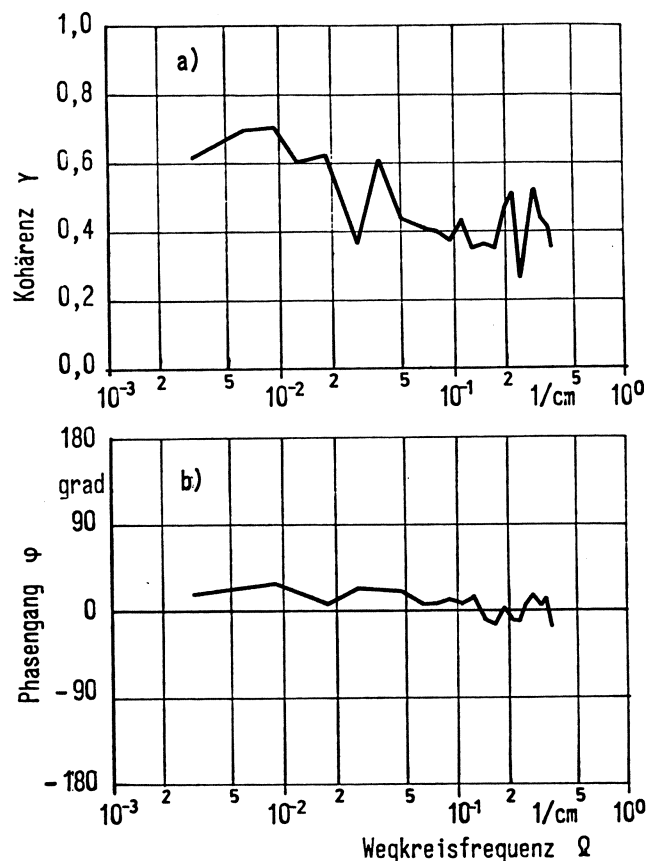


Bild 120: Kohärenzfunktion und Phasengang für die Radspuren 2 und 3 des Belages B (aus [55]).

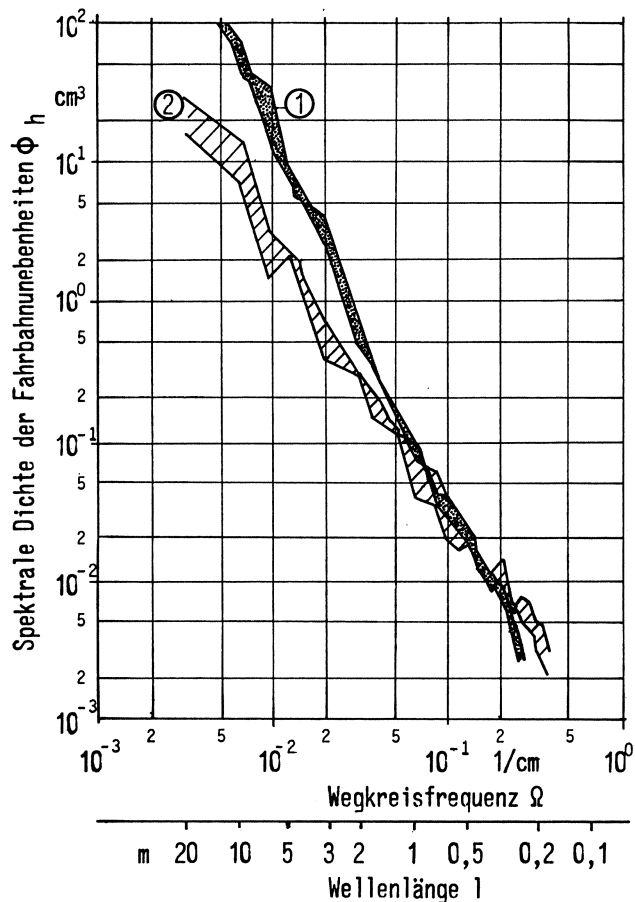


Bild 121: Vom IFF bestimmte Unebenheitsspektren. Vergleich der Resultate für die Beläge A (mit 1 bezeichnet) und B (2, aus [55]).

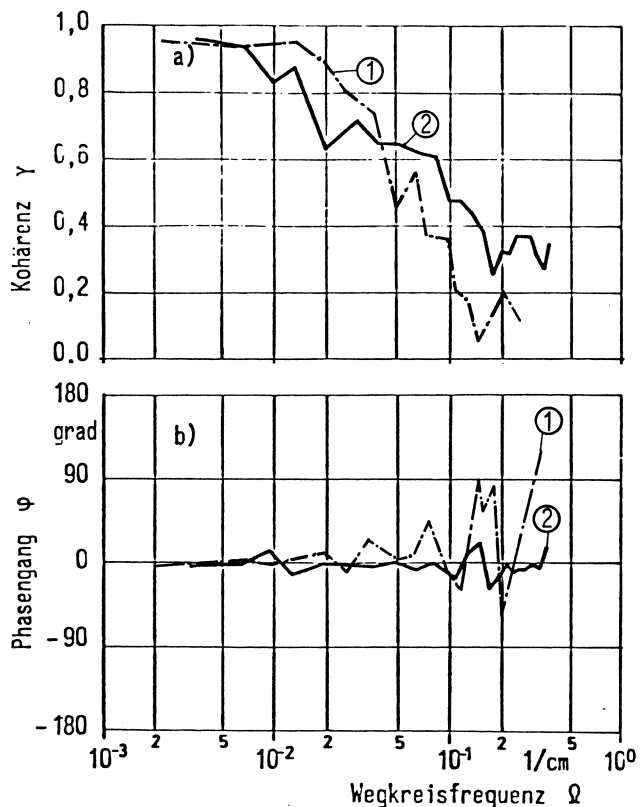


Bild 122: Vergleich von Kohärenzfunktion und Phasengang der beiden Radspuren der Fahrachse A für die Beläge A (mit 1 bezeichnet) und B (2, aus [55]).

2.74 Das Brett

Bild 123 zeigt Geometrie und Anordnung des Brettes, das bei rund der Hälfte der Versuchsfahrten in der Mitte des 41-m-Feldes auf die Brücke geschraubt war. Bei einer Dicke von 50 mm betrugen die Abmessungen des Brettes in Fahrrichtung oben 300 mm und unten 400 mm. Im Gegensatz zu den üblichen EMPA-Versuchen hatte das Brett somit keinen rechteckigen Querschnitt, sondern wies auf beiden Längsseiten Anschrägungen unter 45° auf. Damit konnte verhindert werden, dass die Elektronik der Messanlage für die dynamischen Radlasten mit einer plötzlichen Verschiebung des Lichtfleckes um einige Zentimeter belastet wurde. Vorversuche hatten ergeben, dass die Elektronik auf eine derartige Stufenfunktion mit kurzfristigem Ueberschwingen reagiert, während sie einer Rampe ohne grössere Probleme zu folgen vermag.

Ebenfalls im Gegensatz zu den üblichen EMPA-Versuchen bestand das Brett nicht aus einem einzigen, rund 4 bis 5 m langen auf die Fahrbahn gelegten Abschnitt, sondern aus zwei, je rund 1.5 m langen auf die Fahrbahn geschraubten Stücken. Die Verschraubung garantierte die Konstanz der Lage des Brettes auch über einen längeren Zeitabschnitt, und die Lücke zwischen den beiden Brettstücken ermöglichte es, dass das für die exakte Messung der Fahrgeschwindigkeit eingesetzte Messrad auch bei den Fahrten über das Brett gefahrlos verwendet werden konnte (s. Abschnitt 3.2, "Die Instrumentierung der Fahrzeuge").

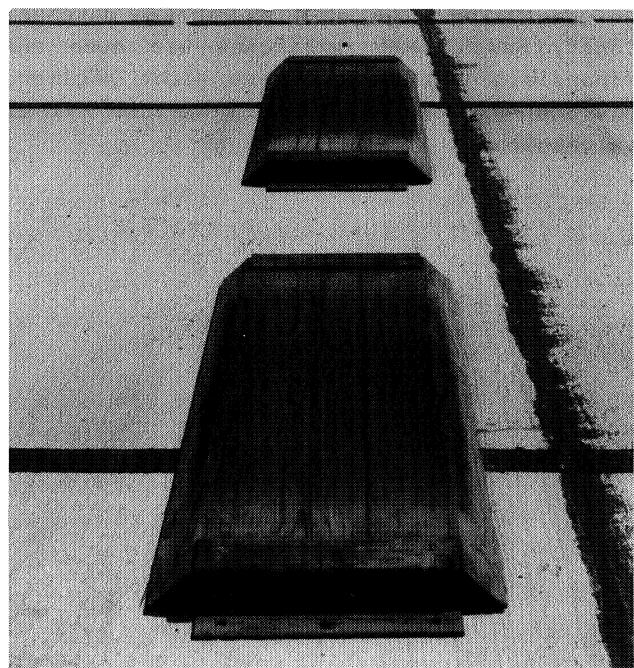


Bild 123: Das auf den Belag geschraubte Brett.

3 Hauptversuche

3.1 Das Versuchsprogramm

Bild 124 zeigt eine schematische Zusammenstellung der durchgeführten Versuchsserien. Mit konstant gehaltenen Fahrzeugparametern wurden im allgemeinen vier Versuchsserien durchgeführt:

- Fahrachse über der Längsachse der Brücke (Achse A), mit und ohne Brett, und
- Fahrachse so weit wie möglich aussen auf dem Kragarm (Achse K), mit und ohne Brett.

Die exakte Lage der beiden Fahrachsen im Brückenquerschnitt geht aus Bild 125 hervor. Das Brett befand sich jeweils in der Mitte des 41-m-Feldes quer zur benützten Fahrspur.

Fahrzeug	Belag	Q	Ao	Am	Ko	Km
14 D *	A	C	8.5 7 5.5	8.5 7 5.5	8.5 7 5.5	8.5 7 5.5
14 R *	A	C	10 8 6	10 6	10 8 6	10 8 6
	A	A	10	10	10	10
	B	A	10	10	10	10
11 *	A	A	10 8 6	10 8 6	10 8 6	10 8 6
13 *	A	A	10 8 6	10 6	10 8 6	10 6
	B	A	10	10	10	10
12 *	A	A	10 6	10 6	10 6	10 6
	B	A	10	10	10	10
21	A	A	10	10	10	10
	B	A	10	10	10	10
24	A	A	10	10	10	10
42 *	A	A	10 6	10 6	10 6	10 6
20	A	B	10 6	10 6	10 6	10 6
52	A	B	10 6	10 6	10 6	10 6
25	A	B	10 6	10 6	10 6	10 6
74	A	B	10 6	10 6	10 6	10 6
71	A	B	10 6	10 6	10 6	10 6
76	A	B	10 6	10 6	10 6	10 6
2LH	A	B	10			
2MH, 2MN	A	B	10	10	10	Ao/Ko: 10
4MH, 4MN	A	B	10		(10, Unfall)	Ao/Ko: 10

Bild 124: Schematische Darstellung der durchgeführten Versuchsserien. Die Kolonne Q gibt Informationen über das jeweils übliche Geschwindigkeitsinkrement: A: $\Delta v = 1...5$ km/h, B: $\Delta v = 2...5$ km/h, C: $\Delta v = 5$ km/h. * = mit Messung der dynamischen Radlasten.

Die Kurzbezeichnung einer Versuchsserie umfasst sechs Parameter. Zum Beispiel bedeutet

14R10AoB,

dass das Fahrzeug 14 (14) mit radialen Reifen (R) und einem Reifendruck von 10 bar (10) in der Fahrachse A (A) ohne Brett auf der Fahrbahn (o) über den Belag B (B) fuhr.

Pro Fahrzeug und Fahrachse wurden zuerst jeweils drei sogenannte quasistatische Fahrten durchgeführt, d.h. mit einer Geschwindigkeit von rund $v = 2$ km/h. Die Auswertung dieser Versuche lieferte die für die Berechnung der dynamischen Inkremente benötigten "statischen" Vergleichswerte.

Innerhalb einer Versuchsserie wurde die Fahrgeschwindigkeit zwischen $v = 5$ km/h und $v = 70...80$ km/h variiert, wobei sie pro Fahrt so konstant wie möglich gehalten wurde. Die Spitzengeschwindigkeit wurde durch die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge, die topografischen Randbedingungen der Beschleunigungsstrecke und den Zustand der Fahrbahnoberfläche begrenzt.

Das Längsgefälle der rund 500 m langen Beschleunigungsstrecke stieg von anfänglich rund 1% auf 2.36% kurz vor dem Beginn des Versuchsbelages. Auf der rund 230 m langen Versuchsstrecke selbst blieb das Längsgefälle mit 2.36% konstant. Die Verzögerungsstrecke war mit mindestens 700 m genügend lang, so dass das Abbremsen der Versuchsfahrzeuge nach dem Ueberqueren der Brücke keine Probleme aufwarf. Beschleunigungs-, Versuchs- und Verzögerungsstrecken lagen in einer Geraden. Die Rückfahrt der Versuchsfahrzeuge an den Start erfolgte für die 2D- und 3D-Fahrzeuge und kleine Geschwindigkeiten rückwärts über die Brücke, in allen anderen Fällen auf der Talspur der T4.

Bei Fahrten über das Brett lag die Spitzengeschwindigkeit aus Sicherheitsgründen meist etwas tiefer als bei Serien ohne Brett, minimal aber bei $v = 70$ km/h. Besonders bei Sattelzügen traten bei höheren Geschwindigkeiten Stabilitätsprobleme auf. Der Verlust des Bodenkontaktes und damit auch der Seitenführungskräfte an den Aufliegerachsen während und nach dem Ueberqueren des Brettes führte zu erheblichen Schleuderbewegungen des Aufliegers.

Ausgehend von den bisher an der EMPA üblichen Versuchen wurde die Fahrgeschwindigkeit zunächst in Intervallen von $\Delta v = 5$ km/h gesteigert. Es zeigte sich jedoch bald, dass

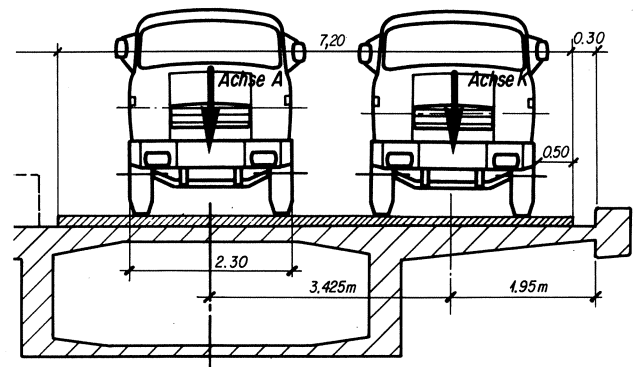


Bild 125: Lage der Fahrachsen A und K im Brückenquerschnitt.

diese Rasterung zu grob war, um die Spitzenwerte der dynamischen Reaktion der Brücke mit genügender Sicherheit erfassen zu können. Soweit der zeitliche Rahmen der Versuche dies erlaubte, wurden die Geschwindigkeitsintervalle in der Folge deshalb teilweise bis auf $\Delta v = 1$ km/h abgesenkt. Bild 124 enthält entsprechende Informationen.

In der Zeit vom 6. März bis zum 8. August 1978 wurden insgesamt 5855 Versuchsfahrten durchgeführt, aufgeteilt in 148 Serien mit einem einzelnen Fahrzeug und 9 Serien (426 Fahrten) mit zwei bis vier Fahrzeugen. Die Versuche mit mehreren Fahrzeugen mussten infolge eines Unfalles, der glücklicherweise nur Sachschaden zur Folge hatte, vorzeitig abgebrochen werden. Mit drei 2D- und einem 4D-Fahrzeug (jeweils einzeln) wurden analoge Versuchsserien auf den Fahrbahnbelägen A und B durchgeführt.

Bei allen 2D-Fahrzeugen und beim Lastenzug 42R wurden die dynamischen Radlasten gemessen.

Die Brückenreaktion wurde an 15 bzw. 22 Stellen gemessen und, im ersten Fall synchron mit den dynamischen Radlastsignalen, auf Magnetband aufgezeichnet.

3.2 Die Instrumentierung der Fahrzeuge

3.2.1 Ueberwachung der Fahrgeschwindigkeit

Einer der wichtigsten Fahrzeugparameter bei dynamischen Versuchen an Strassenbrücken ist die Fahrgeschwindigkeit. Um diese während der Versuchsfahrten möglichst konstant und möglichst exakt auf einem bestimmten Wert halten zu können, wurde ein Schlepprad der Firma Peiseler, Olching bei München, BRD, eingesetzt (Bild 126). Eine Eichung

auf dem Rollenprüfstand der Abteilung 132, "Organische Chemie, Schmierstoffe, Abgase", der EMPA ergab, dass das Rad für Geschwindigkeiten zwischen 1 km/h und 100 km/h sehr exakte Werte liefert (maximale Abweichung ± 0.25 km/h). Das analoge Spannungssignal, das die zum Rad gehörige Elektronik abgibt, wurde einerseits für die Ansteuerung eines in der Führerkabine angebrachten analogen Tachometers verwendet, andererseits wurde es zu Kontrollzwecken via Telemetrie zur Messzentrale übertragen und auf Magnetband registriert. Nach einem entsprechenden Umbau des Netzteils konnte die Stromversorgung wahlweise ab Fahrzeugbatterie oder ab 220-V-Aggregat erfolgen. Das Messrad wurde bei sämtlichen Versuchsfahrten eingesetzt, wobei jedoch teilweise knifflige Montageprobleme zu lösen waren. Im übrigen erwies es sich als vorteilhaft, wenn jederzeit eine Ersatzfelge verfügbar war.

Um in jedem Fall bei der Auswertung über genügend genaue Angaben betreffend die effektive Fahrgeschwindigkeit zu verfügen, wurden auf der Versuchsstrecke vier Kontaktschwellen angebracht (Bild 136): Am Anfang des Versuchsbelages (d.h. 115 m vor der Brücke), am Anfang der Brücke, am Anfang des 41-m-Feldes und am Ende der Brücke. Der Luftdruckstoss, den die Fahrt einer Achse über einen dieser Gummischläuche in diesem erzeugte, bewirkte, dass ein Relais einen Spannungsimpuls lieferte, der auf Magnetband aufgezeichnet werden konnte. Aufgrund des

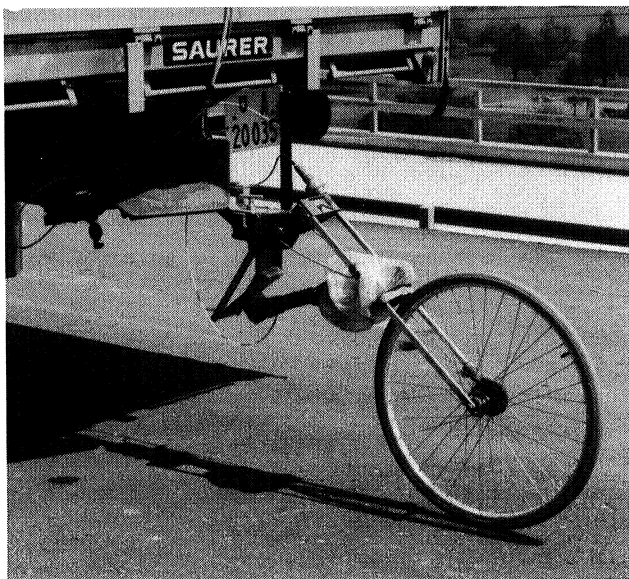


Bild 126: Das für die exakte Messung und Ueberwachung der Fahrgeschwindigkeit verwendete Peiseler-Rad. Bei Bedarf kann es pneumatisch von der Fahrbahn abgehoben werden.

Radstandes des Fahrzeuges oder der Distanz zwischen den Schwellen und der zwischen den Impulsen verstrichenen Zeit konnten lokale oder mittlere Fahrgeschwindigkeiten exakt ermittelt werden.

Eine weitere wesentliche Aufgabe erfüllen diese synchron mit den dynamischen Radlasten und den Brückenreaktionen aufgezeichneten Impulse dadurch, dass sie Angaben über die Lage des Fahrzeuges auf der Versuchsstrecke liefern. So war es zum Beispiel auf einfache Weise möglich, den Ausschwingzustand der Brücke sauber von jenem "unter Last" zu trennen. Das gleiche gilt für die Auswertung der dynamischen Radlasten "auf starrer Unterlage" und "während der Fahrt über die Brücke".

3.22 Messung der dynamischen Radlasten

Die grundsätzliche Wirkungsweise der optoelektronischen Anlage, die für die Messung der dynamischen Radlasten an 2D-Fahrzeugen und am Lastenzug 42R eingesetzt wurde, ist im Abschnitt 2.4, "Messung der dynamischen Radlasten schwerer Fahrzeuge", eingehend beschrieben. Hier wird nur auf die letzte Bauform der Anlage eingegangen.

Der nutzbare Messbereich der Anlage beträgt rund ± 50 mm Reifenweg. Er wird einerseits durch das Blickfeld der Kamera, andererseits aber auch durch die Fokussierung des Infrarotfleckes begrenzt. Das Auflösungsvermögen der Kamera hängt vom Winkel zwischen Senderachse und optischer Achse der Kamera ab. Der gleiche Winkel, in der Folge kurz als optischer Winkel bezeichnet, beeinflusst auch die Form bzw. die Linearität der Weg/Spannungs-Kurve des Systems. Von beiden Gesichtspunkten aus wäre ein Winkel von 90° ideal: Das Auflösungsvermögen wäre maximal und die Kennlinie wäre linear. Solche idealen Verhältnisse können jedoch bei reflektivem Einsatz des Messsystems nicht eintreten. Im vorliegenden Fall erwies sich für die Hinterachs-Messstellen ein Winkel von 45° , für die Vorderachsen ein solcher von 30° als optimal: Das Auflösungsvermögen ist für beide Fälle etwa gleich, und das Lichtraumprofil des Fahrzeuges wird durch die an den Naben der Vorderräder befestigten Apparaturen nicht allzu stark vergrößert (Bilder 69 und 70). Das Auflösungsvermögen betrug für

• Einfachbereifung

45° : 42 mV/kN (+)
36 mV/kN (-)

30° :	33 mV/kN (+)	)
	26 mV/kN (-)	)
• Zwillingsbereifung		) gewählte Winkel
45° :	21 mV/kN (+)	)
	18 mV/kN (-)	)
30° :	16 mV/kN (+)	
	13 mV/kN (-)	

Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen Bereich von rund 30 mm Reifeneindrückung (+) und Reifenausfederung (-). Die nichtlineare Beziehung zwischen gemessener Optospannung und Radlast konnte im Feld nicht direkt bestimmt werden. Dazu hätte in der Nähe der Brücke eine Installation aufgebaut werden müssen, die das kontrollierte Erzeugen von Radlasten zwischen Null und dem interessierenden Maximalwert erlaubt hätte (Bilder 31 und 32). Der entsprechende Aufwand wurde als zu gross eingeschätzt, und man entschied sich für das etwas kompliziertere, aber ebenfalls machbare Eichverfahren, wie es in der Folge beschrieben wird.

Für jede Versuchsserie wurde zunächst der optische Winkel so justiert, dass das Ausgangssignal jeder der vier montierten Kameras im Ruhezustand des Fahrzeuges Null Volt betrug. Dies geschah derart, dass die Schrauben, die die Kamera am Support fixierten, gelockert, die Kamera in die gewünschte Lage gedreht und die Schrauben wieder angezogen wurden. Damit wurde sichergestellt, dass der mögliche Messbereich auch tatsächlich zur Verfügung stand.

In einem nächsten Schritt war für jede Kamera die vom optischen Winkel abhängige Eichkurve zu bestimmen, d.h. der Verlauf der Signalspannung in Abhängigkeit von der Lage des Lichtfleckes. Diese Kurve, die den Bereich ± 50 mm vertikale Verschiebung des Lichtfleckes abdeckt, wird in der Folge als EOK-Kurve (Eichkurve Opto-Kamera) bezeichnet. Für ihre Bestimmung wurde das Versuchsfahrzeug zunächst mit allen vier Rädern auf rund 60 mm dicke Holzplatten gefahren (Bild 127). Mit Hilfe eines vertikal verschieblichen Metallplättchens, auf dessen Oberfläche zwecks Erzeugung einer betonähnlichen Reflexionsebene ein Stück Karton aufgeklebt war, wurde der Infrarotfleck schrittweise von - 50 mm bis + 50 mm verschoben (Bilder 128 und 129). Die mit einer mechanischen Uhr (Auflösung 1/100 mm) gemessene Vertikalverschiebung des Fleckes und die zugehörige Ausgangsspannung der Kamera ergaben je einen Punkt der EOK-Kurve. Bild 130 zeigt die EOK-Kurven für die vier am Fahrzeug 14R10

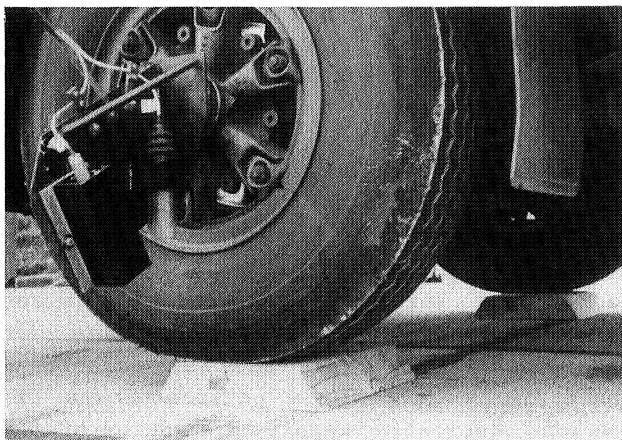


Bild 127: Für die Eichung der Optokameras wurde das Fahrzeug auf Holzstücke gefahren.

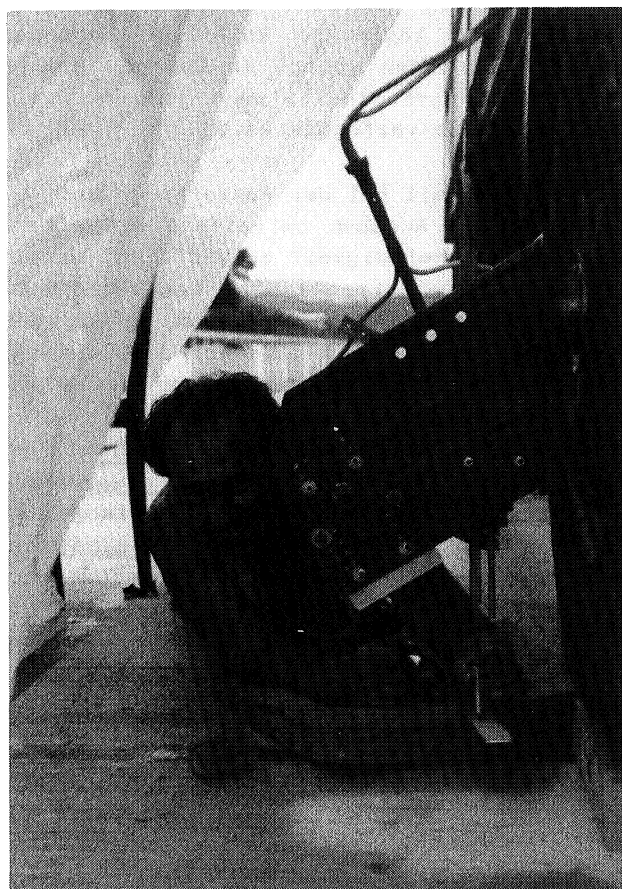


Bild 128: Eichung einer Optokamera an einem Vorderrad.

montierten Kameras. Das Bild vermittelt einen Eindruck von der Anzahl gemessener Punkte, die für die durch nichtlineare Regression erhaltene mathematische Beschreibung der EOK-Kurven zur Verfügung standen. Es wird ebenfalls deutlich, dass für die Kameras K1 und K4 eine Reifeneinfederung zu einer positiven, für die Kameras K2 und K3 aber zu einer negativen Spannung führt. Dies ergibt sich aus der unterschiedlichen Anordnung der Kameras und Sender.

Die Bezeichnung der Kameras war für alle 2D-Fahrzeuge gleich:

- K1: Hinterachse, in Fahrrichtung linkes Rad (H/L),
- K2: Hinterachse, rechtes Rad (H/R),
- K3: Vorderachse, in Fahrrichtung linkes Rad (V/L),
- K4: Vorderachse, rechtes Rad (V/R).

Beim Fahrzeug 42R waren alle vier in Fahr- richtung linken Räder mit Messvorrichtungen bestückt:

- K1: Vorderachse des Zugfahrzeuges (2D-Fahrzeuge K3),
- K2: Hinterachse des Zugfahrzeuges (2D-Fahrzeuge K2),
- K3: Vorderachse des Anhängers (2D-Fahrzeuge K4),
- K4: Hinterachse des Anhängers (2D-Fahrzeuge K1).

Während für alle 2D-Fahrzeuge immer die gleichen Supporte benutzt werden konnten, mussten für die Befestigung der Geräte an den Anhängerachsen des Fahrzeuges 42R spezielle Konstruktionen hergestellt werden.

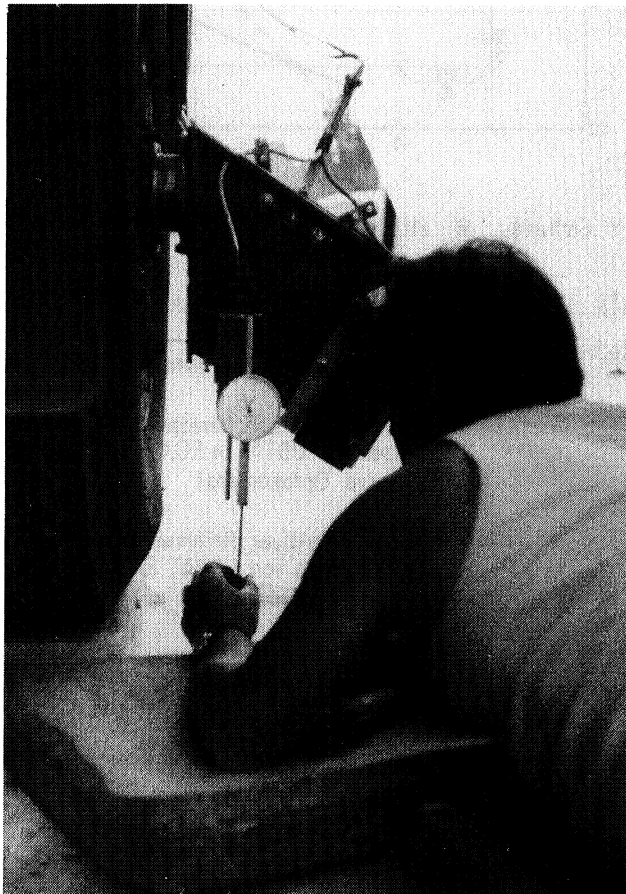


Bild 129: Auf diesem Bild ist die mechanische Uhr sichtbar, die für die Bestimmung der EOK-Kurven verwendet wurde.

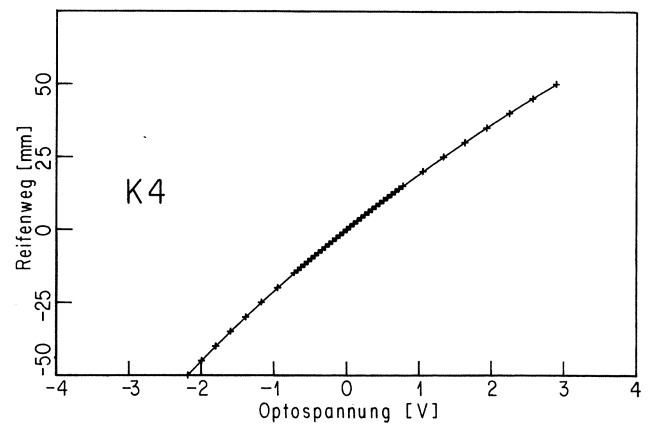
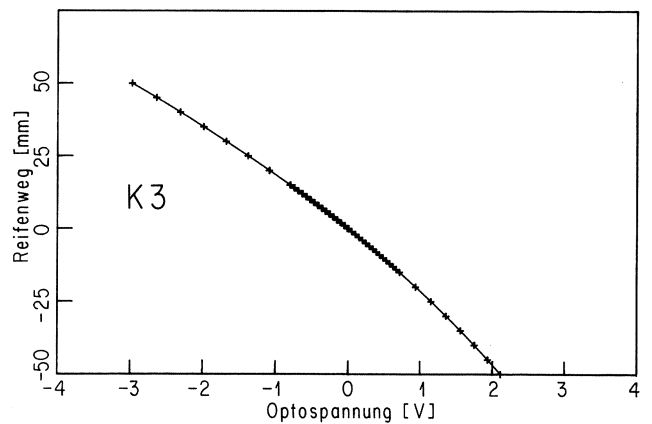
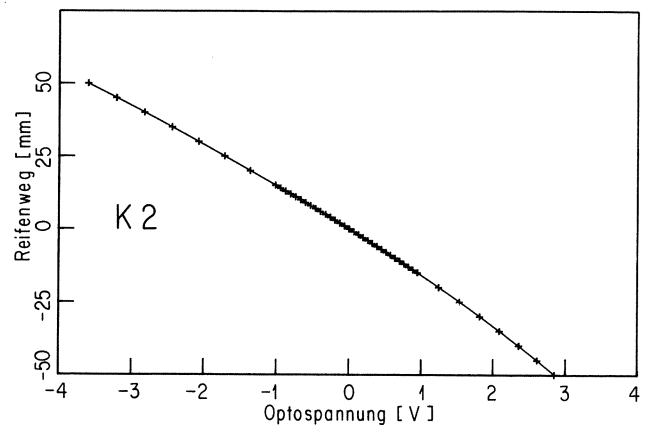
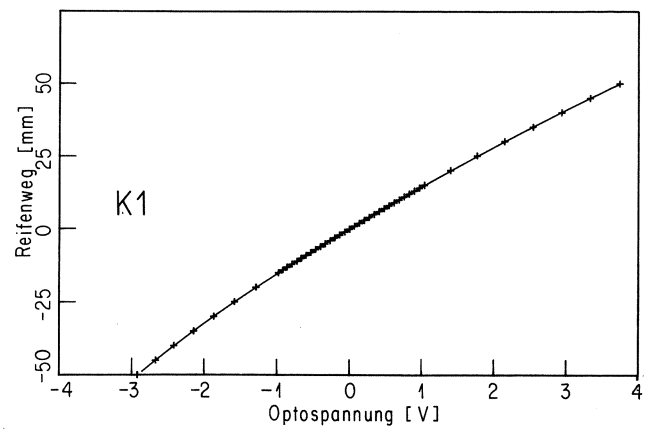


Bild 130: EOK-Kurven für die vier am Fahrzeug 14R montierten Optokameras.

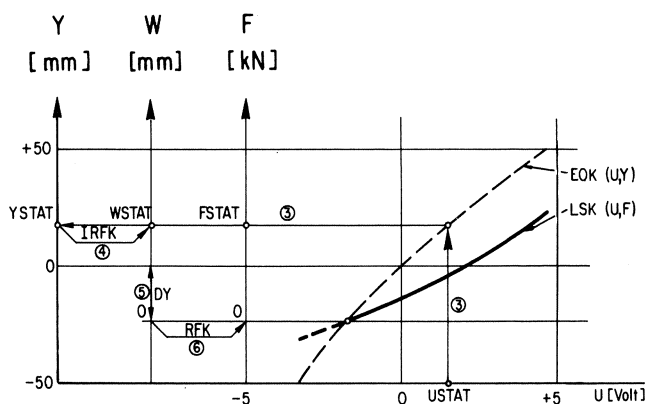
Die Berechnung der Uebertragungsfunktion Optospannung/Radlast einer Kamera umfasst sieben Schritte (Bild 131):

- Messen der statischen Radlast F_{stat} ,
- Messen der statischen Optospannung, d.h. des Ausgangssignals der Kamera bei ruhendem Fahrzeug, U_{stat} ,
- Berechnen der zu U_{stat} gehörigen Wegordinate Y auf der EOK-Kurve, Y_{stat} , durch Einsetzen von U_{stat} in die Gleichung der EOK-Kurve: $Y = f_1(U)$.
- Berechnen der statischen Reifeneindrückung W_{stat} durch Einsetzen von F_{stat} in die Gleichung für die inverse Reifenfederkennlinie IRFK: $W = f_2(F)$.
- Transformation der Eichwegordinate Y (für jeden gemessenen U, Y -Punkt der EOK-Kurve) in die Ordinate des effektiven Reifenweges W :
 $W = Y + DY$, wobei $DY = W_{\text{stat}} - Y_{\text{stat}}$.
- Transformation der Reifenwegordinate W (für jeden transformierten U, W -Punkt) in die Radlastordinate F durch Einsetzen von W in die Gleichung der Reifenfederkennlinie RFK: $F = f_3(W)$.
- Bestimmung der gesuchten Beziehung zwischen gemessener Optospannung U und Radlast F , der LSK-Kurve: $F = f_4(U)$, durch nichtlineare Regression der so erhaltenen Wertepaare (U, F) .

Bild 132 zeigt die LSK-Kurven für die vier am Fahrzeug 14R10 montierten Kameras. Die entsprechenden mathematischen Funktionen erlaubten die Umrechnung jedes mit der optoelektronischen Anlage gemessenen Spannungswertes in einen absoluten Wert der Radlast. Dabei wurde auch der Einfluss der Vorzeichen der gemessenen Spannungen aufgehoben. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die LSK-Kurve nicht eigentliche Spannungswerte in Volt in Radlastwerte in kN umwandelt, sondern dass sie direkt auf die digitalisierten Spannungswerte in sogenannten PCMEinheiten (PCME) zugreift, wie diese auf Band registriert worden sind. Dies wird dadurch ermöglicht, dass es keine Messverstärker-Einstellung zu berücksichtigen gilt, und dass am PCM-Modulator immer mit dem gleichen Bereich der Eingangsspannung ± 5 Volt gearbeitet wurde. Auf die weitere Verarbeitung der Radlastsignale wird später eingegangen.

Im Verlauf einer Versuchsserie blieb der Reifendruck nicht exakt konstant. Insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten erhöhten sich bei den relativ rasch aufeinander-

derfolgenden Bremsmanövern zunächst die Bremsen und dann die Reifen, was zu einem Anstieg der Lufttemperatur in den Reifen und damit des Reifendruckes führte. Die Witterungsverhältnisse spielten dabei eine untergeordnete Rolle. Bei intensivem Versuchsbetrieb ist damit zu rechnen, dass der Reifendruck innert drei bis vier Stunden um rund 1 bar zunehmen kann. Durch entsprechende Massnahmen wurde dafür gesorgt, dass die Abweichung des Reifendruckes von seinem Sollwert ± 0.2 bar nicht überschritt. Inwiefern die Temperatur eines Reifens über die Materialsteifigkeit einen direkten Einfluss auf seine Federkennlinie hat, konnte nicht untersucht werden.



Y: Eichweg, W: eff. Reifenweg, F: Radlast

- ① FSTAT: Statische Radlast, gemessen
- ② USTAT: Statische Optospannung, gemessen
- ③ YSTAT: Zugehöriger Eichweg, berechnet durch Einsetzen von USTAT in EOK (Eichkurve Optokamera)
- ④ WSTAT: Statischer, effektiver Reifenweg, berechnet durch Einsetzen von FSTAT in IRFK (inverse Reifenfederkennlinien)
- ⑤ $Y \rightarrow W$: $DY = WSTAT - YSTAT$
Eichweg $\rightarrow$ effektiver Reifenweg
- ⑥ $W \rightarrow F$: W einsetzen in RFK (Reifenfederkennlinien)
- ⑦ LSK durch nichtlineare Regression

Bild 131: Schematische Darstellung des Berechnungsganges für die LSK-Kurven (Uebergang von gemessener Optospannung auf die Radlast).

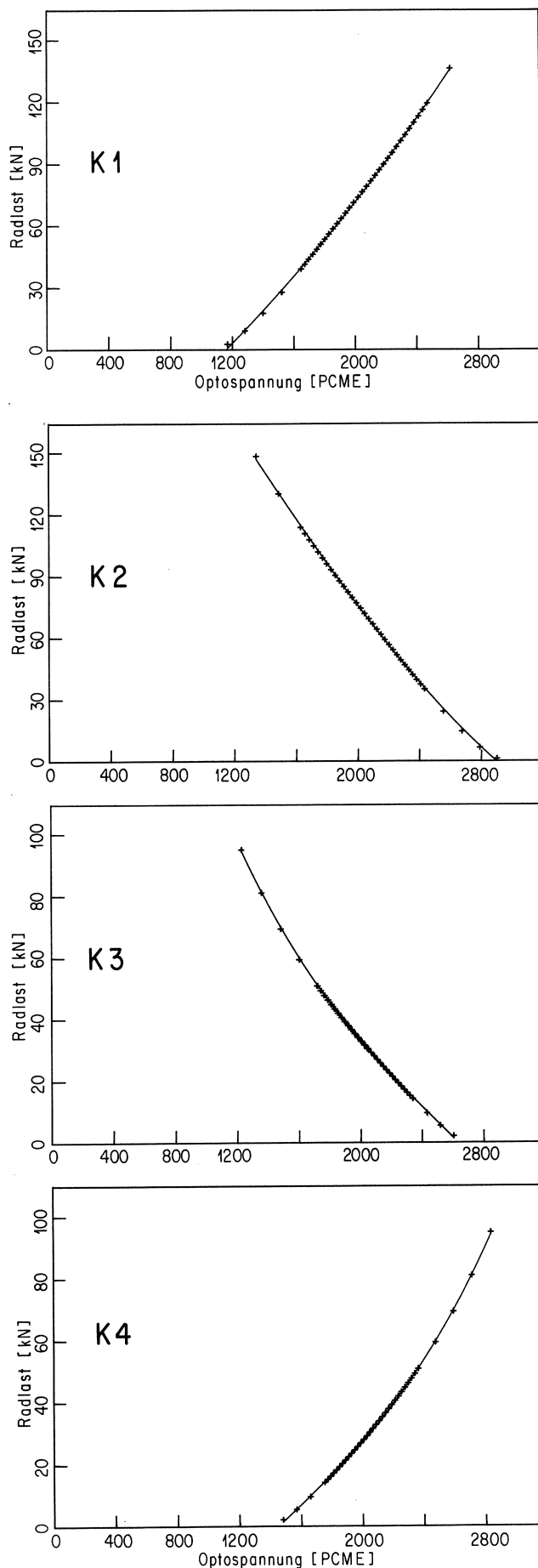


Bild 132: LSK-Kurven für die vier am Fahrzeug 14R montierten Optokameras.

3.23 Transfer der Daten vom Fahrzeug zur Messzentrale

Grosser Wert wurde auf die Synchronität der Erfassung und Registrierung von Einwirkung (Radlasten) und Reaktion (Brückenschwingungen) gelegt. Die dazu erforderliche verzugslose Uebertragung der am Fahrzeug erfassten Signale zu der zwangsweise stationären Messzentrale, wo die an der Brücke erfassten Signale zusammenliefen, konnte in sinnvoller Weise nur mit Hilfe einer Funk-Telemetrie-Anlage geschehen. Grundsätzlich wäre es möglich gewesen, eine übliche analoge FM-Anlage mit einer Trägerfrequenz von rund 433 MHz zu verwenden. Im Zusammenhang mit der Beschaffung einer PCM-Anlage zur Registrierung der Messsignale, auf die in den Abschnitten 3.4 und 3.5, "Datenaufzeichnung" und "Auswertungsmethoden", näher eingegangen wird, ergab sich die Möglichkeit, eine digitale Anlage zu verwenden. Die Messsignale werden dabei noch vor der Funkstrecke digitalisiert und dann als solche auf einen 2.45 GHz-Träger aufmoduliert [56], [57], [58], [59]. Angepasst an die aus achtkanaligen Modulator/Demodulator-Einheiten aufgebaute PCM-Anlage vom Typ TM/TD8K13 überträgt die von der Firma Johne + Reilhofer, Martinsried bei München (BRD), hergestellte Funk-Telemetrie-Anlage TSE 245 die von einem Modulator zu einem einzigen Bitstrom zusammengefassten digitalisierten Signale von acht Messkanälen. Die Sendeleistung beträgt 0.1 W an der Endstufe, als Antennen wurden nach einigen Vorversuchen auf der Versuchsstrecke Deibüel die zirkular polarisierten Abstrahler (sogenannte "Schuhcremedosen-Antennen") den üblichen Dipolantennen vorgezogen.

Bei den Versuchen mit Messung der dynamischen Radlasten befanden sich demnach neben der zu den Messanlagen gehörenden Elektronik ein PCM-Modulator, der Telemetrie-Sender und die Sendeantenne sowie ein Benzinaggregat für die Stromversorgung im oder am Fahrzeug (Bilder 133 bis 135). Neben oder in der beim Brückenende Seite Baar, d.h. am Ende der Versuchsstrecke, angeordneten Messzentrale befanden sich die Empfangsantenne, der Telemetrie-Empfänger, ein Interface, das die empfangenen Signale regenerierte, und das Magnetbandgerät.

Die vom Fahrzeug gesendeten Messwerte, vier dynamische Radlastsignale und das Fahrzeugschwindigkeitssignal, wurden so gleichzeitig mit den Brückenreaktionen auf Band aufgezeichnet.

Im Laufe der Versuche drängte sich eine Modifikation der Position der Empfangsantenne auf. Die quer zur Fahrriichtung angeordnete Sendeantenne weist eine recht stark gerichtete Abstrahlcharakteristik auf, und zwar erstaunlicherweise mit hoher Intensität nicht nur nach vorne, d.h. bei der gewählten Anordnung der Antenne in Fahrriichtung, sondern auch nach hinten. Sobald sich aber das Fahrzeug praktisch auf der Höhe der Messzentrale befand, brach die Funkverbindung kurzzeitig ab, da die Empfangsantenne kein Signal mehr feststellen konnte. Um die entsprechenden, mehr unangenehmen denn wirklich problematischen Signalausfälle zu beheben, wurde die Empfangsantenne auf einen rund 3 m hohen Mast montiert und um 100 m in Richtung Baar verschoben. Da die Länge des HF-Kabels zwischen Antenne und Telemetrie-Empfänger auf wenige Meter zu beschränken war, brachte dies den Nachteil mit sich, dass der Empfänger im Freien angeordnet werden musste. Es zeigte sich aber, dass er den mehrmonatigen Feldeinsatz klaglos überstand. Entgegen den Erwartungen brachte auch die 100 m lange Verbindung zwischen Telemetrie-Empfänger und Interface (in der Messzentrale) keinerlei Probleme mit sich. Für diese Verbindung wurde ein von der EMPA sonst für die Uebertragung hochempfindlicher Dehnungssignale verwendetes Kabel eingesetzt.

Der Vollständigkeit halber soll noch auf einen Nachteil der ganzen Funk-Uebertragungskette hingewiesen werden. Der Telemetrie-Empfänger weist kein Messgerät für die ein-

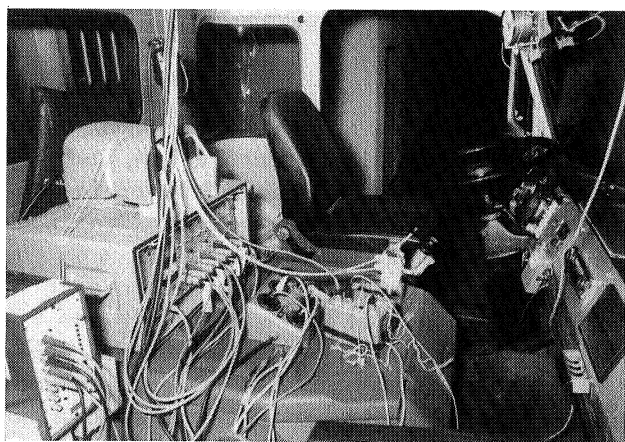


Bild 133: Blick auf die in der Führerkabine jeweils vorhandene Elektronik (von links): PCM-Modulator, Elektronik der optoelektronischen Messanlage, darauf angebracht der Telemetriesender. Rechts vom Steuerrad: Hebel für die pneumatische Bedienung des Peiseler-Rades. Oberhalb des Steuerrades: Analoges Präzisions-tachometer.

strahlende Feldstärke auf, so dass bei einem Ausfall des Datenstroms, der am Interface angezeigt wird, immer eine ganze Reihe von Komponenten überprüft werden muss: Stromversorgung (Benzinstand im Aggregat!), PCM-Modulator, Sender, Empfänger, beide Antennen, Interface sowie sämtliche Kabelverbindungen zwischen diesen Geräten. Insbesondere die im Fahrzeug mitgeführten Apparaturen waren erheblichen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt, so dass neben einigen Kabelverbindungen auch zweimal der PCM-Modulator repariert werden musste. Die Telemetrieanlage als solche funktionierte immer einwandfrei.

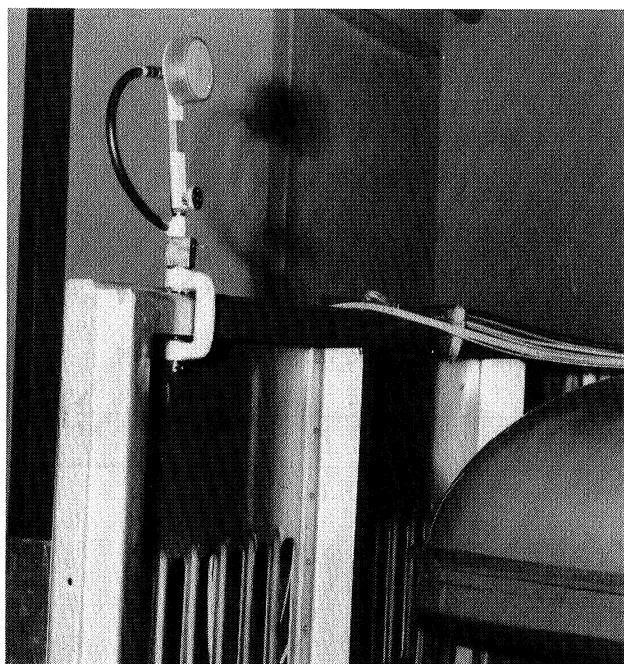


Bild 134: Die am Fahrzeug montierte Sendeantenne der 2.45 GHz-Telemetrie.

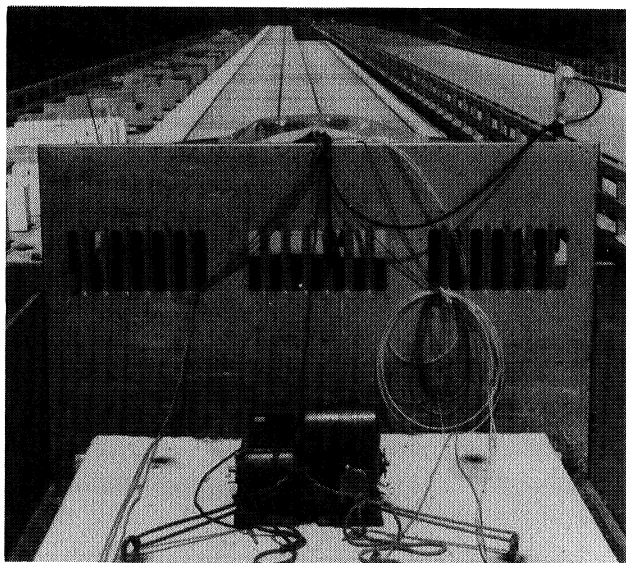


Bild 135: Für die Stromversorgung der am Fahrzeug eingesetzten Geräte musste auf der Lastwagenbrücke ein Benzinaggregat mitgeführt werden.

3.3 Die Instrumentierung der Brücke

Für die Erfassung der Brückenreaktion bei den Fahrversuchen wurden im ganzen 12 Durchbiegungs- und 13 Dehnungsmessstellen eingerichtet. Da nur untaugliches Material zur Verfügung stand, wurden Versuche zur Messung von Beschleunigungen rasch abgebrochen. Die Anordnung der Messstellen an der Brücke ist in Bild 136 dargestellt. Abgekürzt werden Messstellen der Durchbiegung mit WG xx, solche der Dehnung mit DMS xx bezeichnet. Das gleiche Bild gibt auch Auskunft über den Standort der Messzentrale und die Lage der vier Kontaktschwellen.

3.31 Durchbiegungsmessung

Wie bei den meisten routinemässigen EMPA-Versuchen an Strassenbrücken fanden für die Durchbiegungsmessung induktive Wegaufnehmer der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Darmstadt (BRD), vom Typ W 20 Anwendung. Diese weisen einen maximalen Messbereich von ± 20 mm auf und werden von einem Messverstärker mit einem 5-kHz-Trägerfrequenzsignal gespeist (Bild 137). Die Messverstärker, Typ KWS, wiederum von HBM, erlauben zudem den Nullabgleich und eine Verstärkung des Messsignals in 10 Stufen mit einer 1,2,5-Stufung (Bild 138). Das Ausgangssignal am Messverstärker liegt im Bereich von ± 10 Volt.

Die Montage der Wegaufnehmer an der Brücke erfolgte nach dem an der EMPA üblichen drahtgestützten Verfahren, bei dem im Messpunkt ein Invardraht zwischen Struktur und Terrain gespannt wird. Invar ist ein mit 33% bis 37% Nickel legierter Stahl mit einem Elastizitätsmodul von $15.6 \cdot 10^7$ kN/m² und einem Temperaturendeckungskoeffizienten von $\alpha = 2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Bei einem der Befestigungspunkte des 2 mm starken Drahtes wird eine Feder angeordnet und bei der Montage auf rund 60 kg vorgespannt. Die Spule, in der sich der Tauchanker bewegt, wird entweder mit dem Tragwerk oder mit dem festen Terrain verbunden. Daraus ergeben sich zwei verschiedene mögliche Anordnungen, die in Bild 139 schematisch dargestellt sind. Bei der Bergspurbrücke Deibüel wurden beide Anordnungen angewandt. Bild 140 zeigt einen am Konsolkopf der Brücke montierten Aufnehmer, während die Bilder 141 und 142 eine Spezialkonstruktion zeigen, bei denen der Aufnehmer im Innern des Brückenkastens angebracht ist. Für die Durchführung des Invardrahtes war hier ein Loch von 20 mm Durchmesser in

die Druckplatte des Kastens zu bohren. Dies konnte mit einem Diamant-Kernbohrer problemlos geschehen.

Wenn sich die Brücke im Messpunkt hebt oder senkt, ändert sich die Spannkraft der Feder und des Invardrahtes und somit auch die Drahtlänge. Dies führt zu einem Messfehler von rund 3% pro 10 m Drahtlänge, der jedoch einfach zu berücksichtigen ist, da er konstant ist und die gemessenen Werte in jedem Fall zu klein sind.

Für Drahtlängen bis zu etwa 20 m ist das oben beschriebene Verfahren zur Messung dynamischer Tragwerksdurchbiegungen in seiner Einfachheit und hohen Genauigkeit nicht zu überbieten. Probleme treten auf, wenn die Drähte länger sein müssen und während der Messung der Wind bläst. Nicht einsetzbar ist das Verfahren, wenn der Draht unter der Brücke nicht befestigt werden kann. Diese Problematik und entsprechende Lösungsvorschläge werden in [60] behandelt. Bei der Deibüel-Brücke betrug die grösste Drahtlänge 12.4 m und der entsprechende Korrekturfaktor $k = 1.038$ (WG 22). Probleme wegen Windeinwirkung traten nicht auf.

3.32 Dehnungsmessung

Statt die üblicherweise verwendeten induktiven HBM-Dehnungsaufnehmer einzusetzen, die die Dehnung der Betonoberfläche über eine Messstrecke von 150 mm erfassen, wurde beschlossen, die Dehnung von einigen Bewehrungsstäben direkt zu messen. Dazu wurden die Stäbe im Bereich des Messpunktes freigelegt und blankgeschliffen, je zwei Dehnungsmessstreifen aufgeklebt, das Signalkabel angeschlossen (Vollbrückenschaltung mit den beiden pro Messstelle applizierten DMS) und die Messstelle lokal mit Kitt gegen Feuchtigkeit isoliert (Bilder 143 bis 145). Wo die Messstelle direkt unter der Fahrbahnoberfläche lag, wurde das herausgespitzte Loch anschliessend mit Kunststoffmörtel wieder vergossen. Die Messkabel wurden dort auch in stabilen Schutzschläuchen bis an den Konsolkopf der Brücke gezogen und damit der Gefahr der Beschädigung während des Einbaus des Versuchsbelages begegnet. Nach dem Abbruch des Versuchsbelages wurden alle noch oberliegenden Signalleitungen in den Brückenkasten gezogen, so dass die Dehnungsmessstellen jederzeit reaktiviert werden können.

Von den ursprünglich installierten 13 Dehnungsmessstellen (Bild 82) fiel nur DMS 12

wahrscheinlich infolge Eindringen von Feuchtigkeit relativ bald aus. Die anderen Messstellen blieben bis zum Abschluss der Versuche funktionstüchtig.

Für die DC-Speisung der DMS und die Konditionierung der Dehnungssignale wurden ebenfalls HBM-Messverstärker vom Typ KWS eingesetzt.

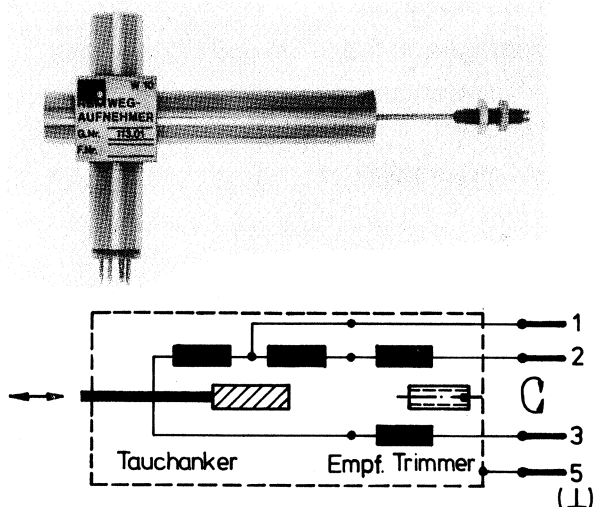


Bild 137: Bild und Schaltschema eines induktiven Wegaufnehmers HBM W20.

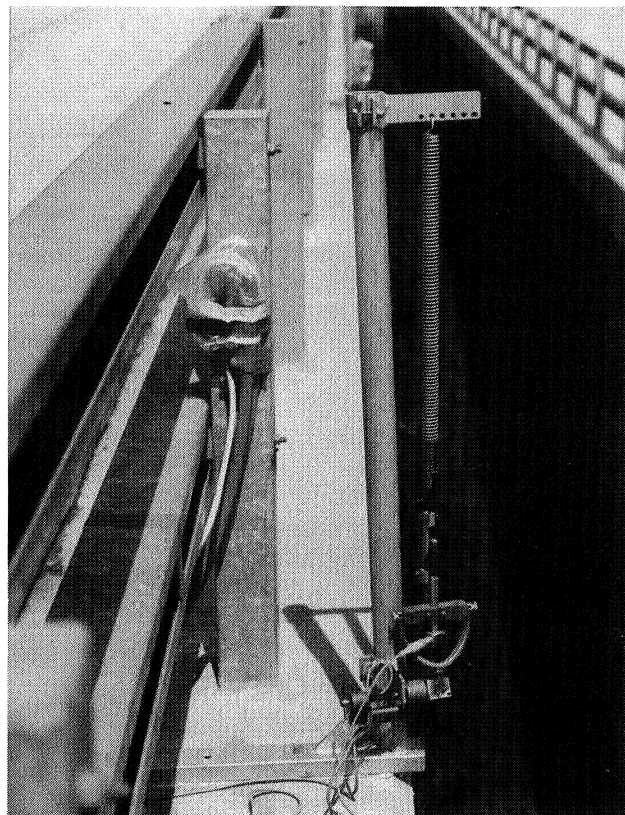


Bild 140: Ein Wegaufnehmer, montiert am Konsolrand der Deibüel-Brücke.

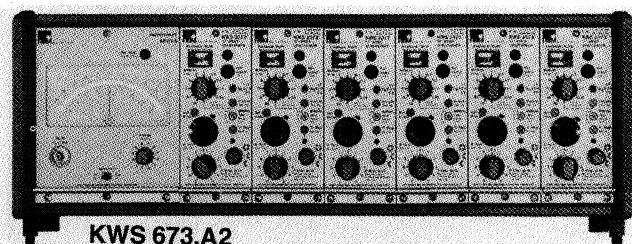


Bild 138: Bild und vereinfachtes Schaltschema eines Messverstärkers HBM KWS 73.

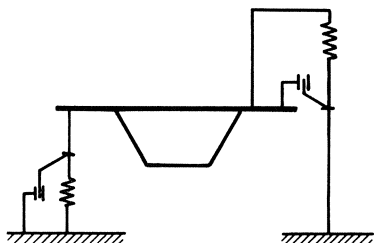


Bild 139: Schematische Darstellung der beiden möglichen Montagearten der Wegaufnehmer für drahtgestützte Durchbiegungsmessungen.

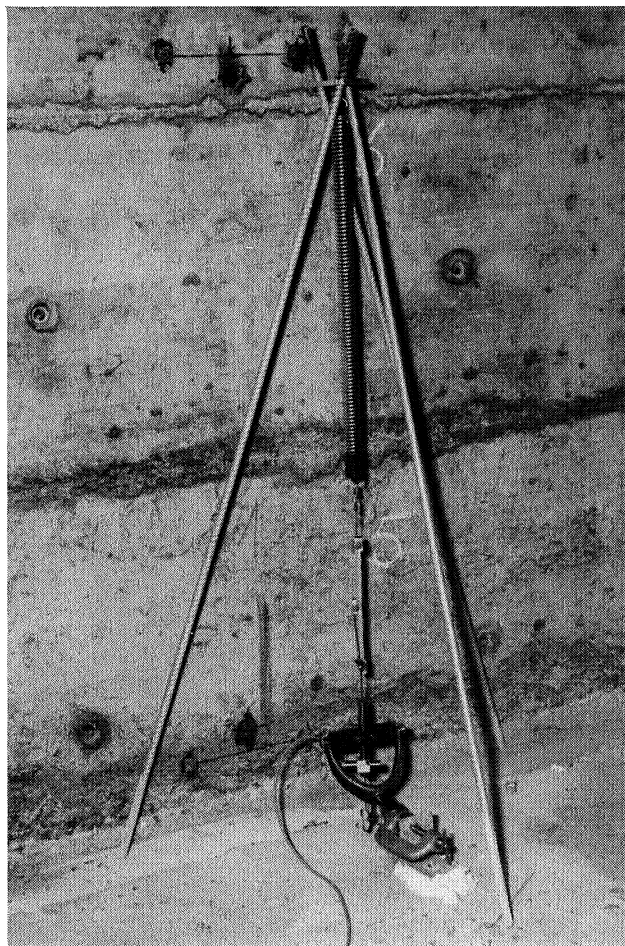


Bild 141: Montage eines Wegaufnehmers im Kasteninnern der Deibüel-Brücke.

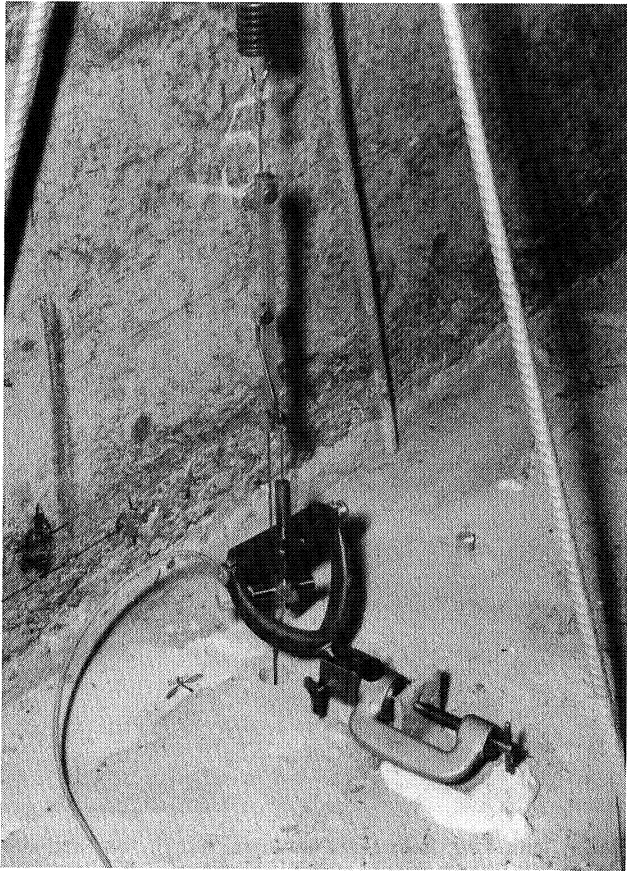


Bild 142: Detail aus Bild 141.

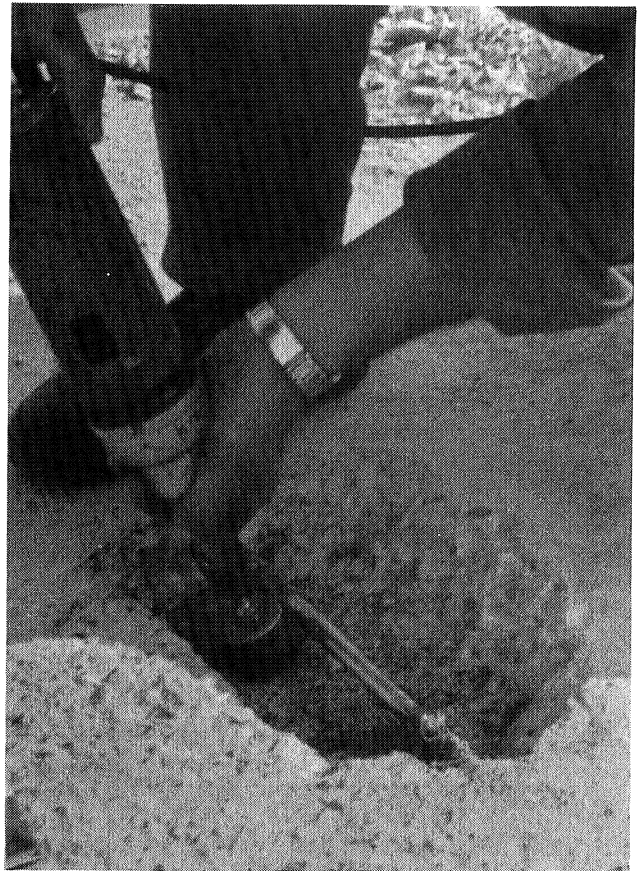


Bild 144: Blankschleifen des Bewehrungsstahles.



Bild 143: Freilegen der oberen Bewehrung der Fahrbahnplatte.

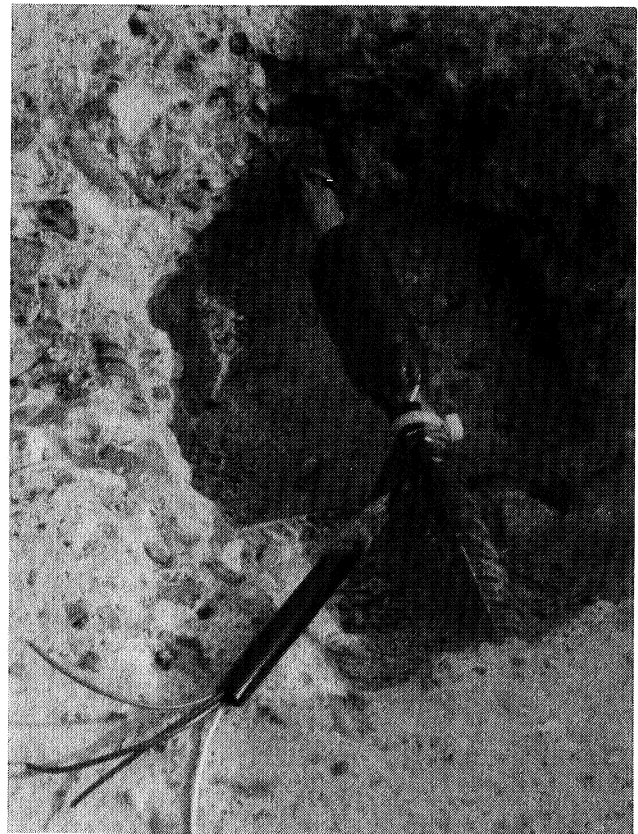


Bild 145: Die Dehnungsmessstreifen sind paarweise auf den Stahl geklebt und sorgfältig gegen Feuchtigkeit abgedichtet worden.

3.4 Datenaufzeichnung

3.41 Mittel

Im Hinblick auf die vorgesehenen Auswertemethoden war von Anfang an klar, dass die sonst übliche Aufzeichnung der Messsignale auf Papier nicht genügen konnte. An Methoden, die eine Aufzeichnung der Signale auf Magnetband erlaubten, standen die FM-Technik (Frequenzmodulation) und die PCM-Technik (Pulscodemodulation) zur Verfügung [58]. Die Gründe, die schliesslich zur Beschaffung einer PCM-Anlage führten, sind die folgenden: Die PCM-Methode bietet eine wesentlich grössere Dynamik (72 dB statt rund 50 dB) und eine grössere maximale Kanalzahl (32 statt 14) als die FM-Methode. Zudem sind die PCM-Geräte einfacher zu bedienen (keine Kalibration der Eingangsverstärker notwendig), strapazierfähiger und auch gewichtsmässig leichter als die FM-Geräte. Ferner werden die Signale beim PCM-Verfahren noch vor der Aufzeichnung auf Magnetband digitalisiert und bleiben von da an unverändert, während beim rein analogen FM-Verfahren beim Abspielen vom Band unter anderem Signalverzerrungen infolge ungleichmässigen Bandlaufes zu erwarten sind. Der einzige echte Vorteil des FM-Verfahrens, der grössere Signalfrequenzbereich, beginnt sich erst bei Frequenzen von mehr als 500 Hz auszuwirken und war deshalb bei der vorliegenden Problemlage ohne Einfluss.

Die Wirkungsweise der PCM-Geräte vom Typ TM/TD8K13, hergestellt von der Firma John + Reilhofer in Martinsried bei München (BRD), ist in [59] eingehend beschrieben. Es sei hier lediglich darauf hingewiesen, dass ein Modulator TM8K13 acht Kanäle mit 12 bit Auflösung, entsprechend 4096 Stufen, digitalisiert und in einem seriellen Bitstrom auf eine Magnetbandspur speichert oder auf die TSE-245-Telemetrestrecke schickt. Das dreizehnte bit wird benutzt, um unter anderem die von einem Zeitcode-Generator ZG 16 gelieferte Echtzeitinformati-on zu registrieren. Ohne diese Zeitinformation, die beim Abspielen des Bandes auf dem Zeitcode-Empfänger ZE 16 wieder ansteht, wäre es praktisch nicht möglich, auf dem Band eine bestimmte Stelle aufzusuchen.

Der Analog/Digital-Wandler (ADC) arbeitet im ± 5 -Volt-Bereich. An den Eingängen können aber fünf Spannungsbereiche zwischen ± 0.5 V und ± 10 V angewählt werden. Eine Sample-and-Hold-Schaltung sorgt dafür, dass alle Kanäle genau synchron abgetastet wer-

den. Benützt man mehrere Modulatoren gleichzeitig, ist zu diesem Zweck eine entsprechende Verkabelung notwendig. Kommen die Daten eines der beteiligten Modulatoren über eine Telemetrie-Strecke auf das Band, ist eine exakte Synchronisation natürlich nicht möglich. Es zeigte sich aber, dass beim Abspielen eines Bandes, dessen Spuren teils über Kabel, teils über Telemetrie bespielt worden waren, keine Probleme auftraten.

Ein Bandgerät vom Typ Stellavox speichert vier PCM-Spuren und eine zusätzliche Audio-Spur, die zum Beispiel mit einem Mikrofon besprochen werden kann, auf handelsüblichem 1/4"-Band. Es wird von einer Firma gleichen Namens in Hauterive (Kt. Neuchâtel) hergestellt. Mit Hilfe der zwischen 1 7/8 ips und 30 ips (ips = inch per second) umschaltbaren Bandgeschwindigkeit kann die Abtastrate pro Kanal in 5 Stufen zwischen 185 Hz und 3 kHz oder die obere Signalgrenzfrequenz zwischen 37.5 Hz und 600 Hz gewählt werden. Diese Zahlen gelten für die Aufzeichnung mit doppelter Datendichte (sogenannte Wide-Band-Tonköpfe) und den Achtkanal-pro-Spur-Betrieb, wie er für dynamische Versuche an Brücken üblich ist. Höhere Signalfrequenzen können bei Aufzeichnung mit der Stellavox-Maschine nur bei entsprechender Reduktion der Anzahl Kanäle pro Modulator (auf 4, 2 oder 1) erreicht werden. Im Achtkanal-pro-Spur-Betrieb kann die Signalfrequenz nur erhöht werden, indem man eine Bandmaschine verwendet, die eine Bandgeschwindigkeit von 60 ips, 120 ips, 240 ips oder sogar 480 ips zulässt. Bei allen Versuchsfahrten an der Deibüel-Brücke wurde mit einer Bandgeschwindigkeit von 3 3/4 ips operiert, d.h. mit einer Abtastrate von 370 Hz bzw. einer oberen Signalgrenzfrequenz von 75 Hz. In einer ersten Beschaffungsphase wurden drei Modulatoren, ein Demodulator, eine Zeitcode-Einheit, eine Telemetrie-Einheit und eine Stellavox-Bandmaschine gekauft. Später wurde die Anlage laufend erweitert.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass für die Versuchsreihe E1 (Bestimmung des Uebertragungsverhaltens der Brücke Deibüel), die vor der Beschaffung der 12-bit-PCM-Anlage durchgeführt wurde, eine 16-kanalige 10-bit-Anlage eingesetzt wurde. Diese wurde vom Lieferanten leihweise zur Verfügung gestellt. Vor der Auswertung mussten die entsprechenden Bänder vom 10-bit- auf das 12-bit-System überspielt werden.

Die Auswertung der Versuche erfolgte in jedem Fall an den auf Magnetband gespeicher-

ten Signalen. Trotzdem wurde der damals bei allen routinemässigen dynamischen Versuchen an Strassenbrücken benützte Achtkanal-Tintenschreiber vom Typ Beckman-Offner-Dynograph, Typ R/504A, auch bei den Deibüelversuchen eingesetzt. Es ist ein unbestreitbarer Vorteil eines Papierschreibers, dass man sofort einen Ueberblick über das Geschehen erhält und bei Unstimmigkeiten irgendwelcher Art unverzüglich einschreiten kann. Die Wahl der auf den Tintenschreiber ausgegebenen Signale wurde laufend den Erfordernissen angepasst. Als weiteres Ueberwachungsmittel wurde ein zweikanaliges Kathodenstrahloszilloskop (KO) verwendet.

Mit Hilfe eines Tracking Voltmeters vom Typ VID, hergestellt von der Firma Gay in Milano (I), konnte ein Kanal dauernd überwacht werden. Dieses Voltmeter ist mit einem Spitzenwertspeicher ausgerüstet, so dass die dynamischen Inkremente für das überwachte Signal, WG 02 bei den Fahrten in der Achse A und WG 01 bei Fahrten in der Achse K, sofort bestimmt und der Versuchsablauf den Ergebnissen angepasst werden konnten. Zudem spielten diese Voltmeterablesungen unbeabsichtigt eine weitere sehr wichtige Rolle. Nachdem rund zwei Drittel der Versuchsfahrten absolviert waren, stellte man eher zufälligerweise fest, dass die Analog/Digital-Wandler der PCM-Modulatoren nicht stabil, sondern im Laufe der Zeit recht erheb-

lich weggedriftet waren. Der Wandler arbeitet nicht mit einem Vorzeichenbit, sondern asymmetrisch: Bei einer Eingangsspannung von - 10 Volt sind alle bit Null, bei + 10 Volt alle Eins. Der Fehler war demnach ebenfalls asymmetrisch und erreichte ein Maximum von 5% bei + 10 Volt (Eingang + 10 V, Ausgang + 9 V). Es war nur der Tatsache zu verdanken, dass das Voltmeter am Eingang des PCM-Modulators, d.h. noch vor der A/D-Wandlung, angeschlossen war, dass die zeitliche Entwicklung der Wandler-Drift genau rekonstruiert und bei der Auswertung berücksichtigt werden konnte. Die dazu notwendigen Untersuchungen nahmen rund drei Monate in Anspruch. Die fehlerhaften Wandler wurden natürlich sofort ersetzt, nachdem die Drifterscheinungen offenbar geworden waren. Heute gehört die PCM-Anlage zu den Standardwerkzeugen bei dynamischen Versuchen. Die Stabilität der Wandler und auch die der an den Eingängen angeordneten Anti-Aliasing-Filter wird laufend überprüft.

Sämtliche Messverstärker und Aufzeichnungsgeräte konnten in einer am Chamer Ende der Brücke aufgestellten Baracke vor der Witterung geschützt aufgestellt werden (Bild 146). Diese Baracke, die Messzentrale, und auch eine zweite, als Materiallager dienende Baracke, wurden uns von der Firma Walo Bertschinger, Zürich, in grosszügiger Weise kostenlos zur Verfügung gestellt.

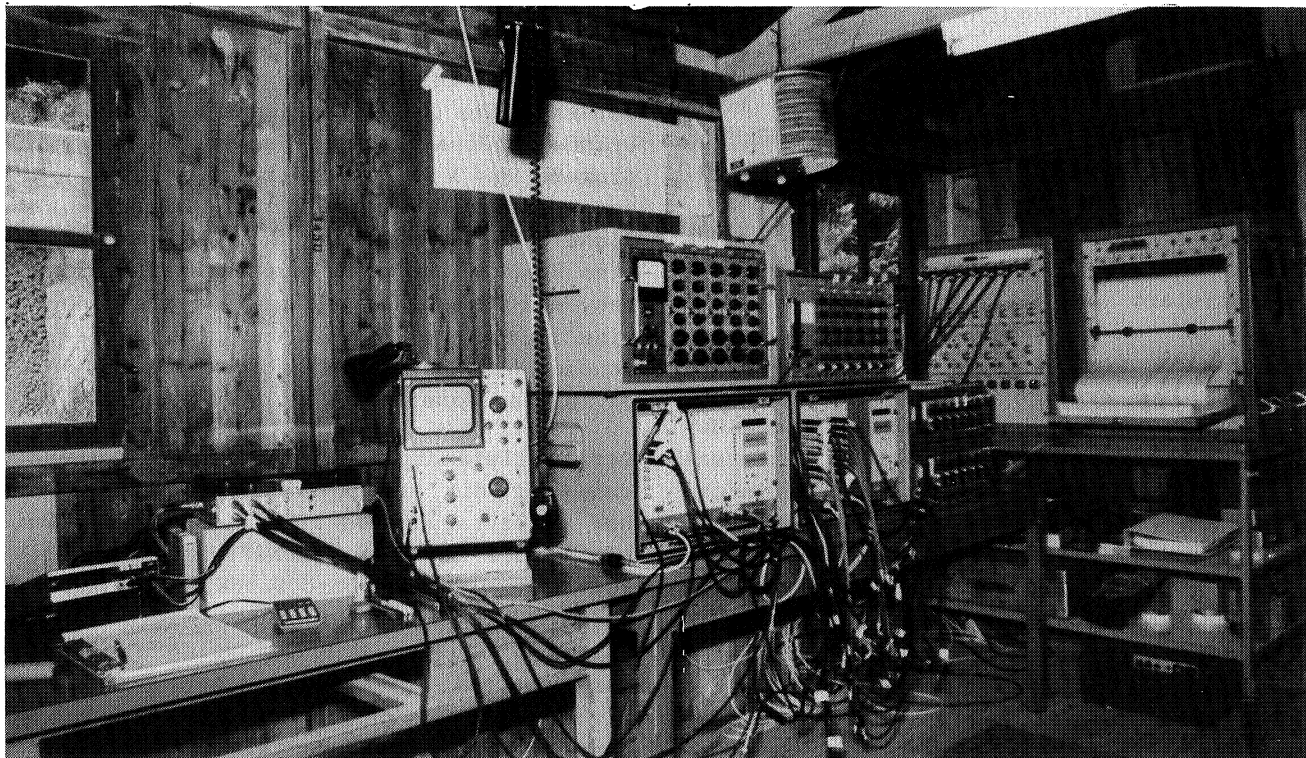


Bild 146: Blick in die Messzentrale (von rechts): Achtkanal-Tintenschreiber mit den zugehörigen Verstärkern; Messverstärker für 23 Kanäle; unter den Messverstärkern in Bildmitte die PCM-Anlage; das Kathodenstrahloszilloskop; die Magnetbandstation; das Tracking Voltmeter. An der Decke befestigt sind ein Funkgerät und ein Heizgebläse.

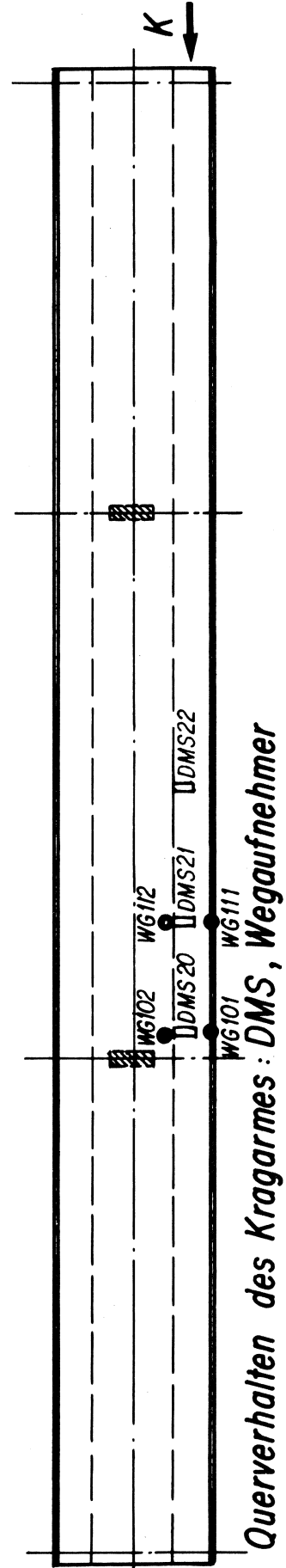
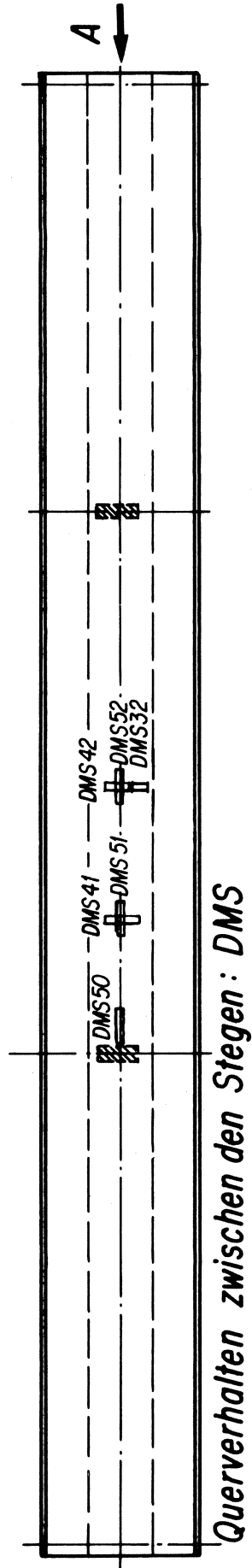
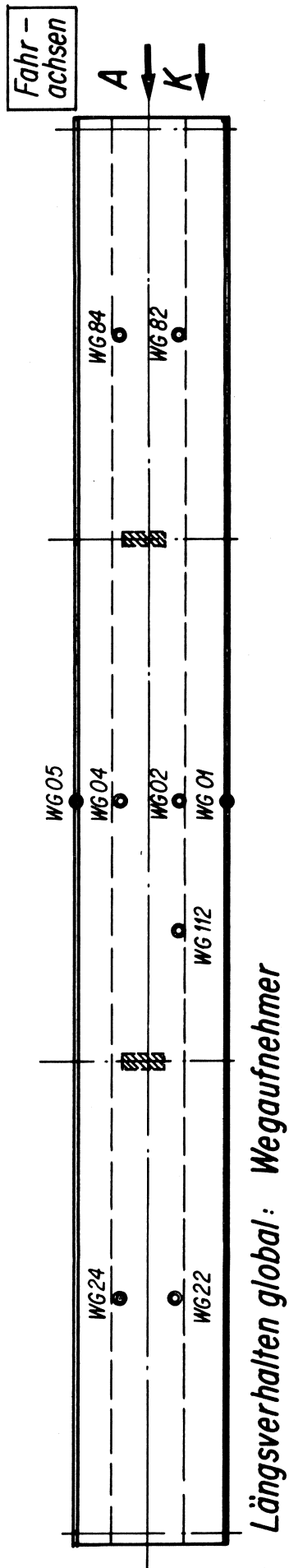


Bild 147: Darstellung der jeweils beobachteten Messsignale. Oben: Neun Durchbiegungen, die in jedem Fall registriert wurden. Mitte: Bei Fahrten in der Achse A jeweils zusätzlich registrierte Dehnungen. Unten: Bei Fahrten in der Achse K jeweils zusätzlich registrierte Durchbiegungen und Dehnungen.

3.42 Konzept

Es war nicht möglich, bei allen Versuchsfahrten die Signale sämtlicher 24 an der Brücke und 5 am Fahrzeug installierter Aufnehmer aufzuzeichnen. Die Grenzen wurden einerseits von der Anzahl verfügbarer Messverstärkerkanäle, 23, und andererseits von der Kapazität der Aufzeichnungsmittel, 8 Kanäle auf Papier, 3 mal 8 Kanäle auf Magnetband, diktiert.

Um über eine konstante Grundinformation betreffend das globale Verhalten der Brücke zu verfügen, wurden bei sämtlichen Versuchsfahrten die Signale von 9 Wegaufnehmern, die zum grössten Teil die Bewegungen des Kastensteges wiedergaben, auf Band registriert. Ein weiterer Kanal war immer mit den Kontaktschwellen-Signalen belegt. Bei Fahrten mit mehreren Fahrzeugen gleichzeitig wurden die Signale der Kontaktschwellen 1 und 3 bzw. 2 und 4 je auf einem eigenen Kanal registriert. Dies erlaubte die sichere Bestimmung der Herkunft eines Kontaktimpulses.

Im weiteren muss unterschieden werden zwischen Fahrten in der Achse A und in der Achse K der Brücke sowie zwischen Fahrten mit und ohne Messung der dynamischen Radlasten. Fuhr das Fahrzeug in der Achse A der Brücke, konzentrierte sich das Interesse neben dem globalen Verhalten der Brücke auf das Verhalten der Fahrbahnplatte im Bereich zwischen den Kastenstegen. Anders bei Fahrten in der Achse K, wo das Verhalten der Fahrbahnplatte im Kragarmbereich von zusätzlichem Interesse war. Bild 147 zeigt, wie sich diese Überlegungen auf die Wahl der 15 jeweils bei den Fahrten mit Messung der dynamischen Radlasten auf Band aufgezeichneten Brückensignale auswirkten. Bei Versuchen ohne Messung der dynamischen Radlasten wurden jeweils 22 Brückensignale auf Band registriert (Bild 148).

3.5 Auswertemethoden

3.51 Auswertung von digitalisierten dynamischen Signalen

Grundsätzlich wäre es möglich gewesen, alle auf Band aufgezeichneten Signale über die PCM-Demodulatoren auf einen Schreiber auszugeben und dann mindestens die Auswertung im Zeitbereich mit Bleistift und Lineal durchzuführen. Aufgrund der grossen Anzahl durchgeführter Versuche und der Tatsache, dass

jeweils zwischen 16 und 24 Kanäle gleichzeitig zu bearbeiten waren, drängte sich jedoch eine Auswertung mit einem Rechner auf. Das tönt sehr einfach, ist aber meist mit einer Reihe ganz erheblicher Schwierigkeiten verbunden. Einfach lösbar ist das Problem nur dann, wenn genügend Geld vorhanden ist, um speziell für die Verarbeitung von PCM-Daten einen ausgewachsenen Minicomputer und die zugehörige Infrastruktur zu beschaffen. Der Umbau bereits vorhandener Rechner für die Bearbeitung dieser Aufgabe führt meist zu unbefriedigenden Lösungen.

Das Hauptproblem besteht darin, die auf dem Band in digitaler Form gespeicherten Daten ohne weitere Wandlungen auf den Disk eines Rechners zu transferieren. Dazu ist zunächst ein Multiplexer erforderlich, der die von mehreren Spuren gleichzeitig anfallenden Daten zu einem einzigen Datenstrom komprimiert. Dann wird ein Interface benötigt, das zwischen Multiplexer und Rechner geschaltet ist. Will man die gesamte Kapazität einer vierspürigen PCM-Anlage ausschöpfen können, muss der Rechner in der Lage sein, einen Datenstrom von $32 \times 3'000 = 96'000$ 16-bit-Datenwörtern (= Samples) pro Sekunde ohne Verluste über sein Memory auf einen Harddisk zu transferieren.

Nach Abschluss der Deibüel-Versuche stand man vor der Tatsache, dass an der EMPA ein Rechner mit der erforderlichen Kapazität nicht vorhanden war. Ausserdem war die Übertragungskapazität der zwischen dem EMPA-Satelliten und dem Rechenzentrum der ETH in Zürich vorhandenen Leitung um einige Zehnerpotenzen zu klein. Als sofort realisierbare Möglichkeit bot sich einzig die Benützung des Hybridrechenzentrums der ETH an. Glücklicherweise, und ohne dieses Glück würden wir PCM-Daten wahrscheinlich heute noch vorwiegend von Hand auswerten, war an der Abteilung Akustik der EMPA Ende 1978 ein Rechner vom Typ Data General (DG) Eclipse S130 in Beschaffung. Auf diesen Rechner wird noch zurückzukommen sein.

Zunächst noch einige Bemerkungen zur Auswertung im Hybridrechenzentrum der ETH (HRZ). Dieses Institut verfügte damals (1979) über einen gut 15 Jahre alten Pace-Analogrechner und einen angekoppelten PDP-9-Digitalrechner. Der Analogrechner war sehr komfortabel ausgebaut, leider waren seine Eingangsverstärker aber nicht mehr besonders stabil. Das Bindeglied zum PDP 9 bestand aus einem 18-bit-ADC mit einer Abtastkapazität von 1 MHz, also von zum Beispiel rund 40 kHz pro

Kanal im 24-Kanal-Betrieb, und war damit für unsere Bedürfnisse beträchtlich überdimensioniert. Seine Abtastrate war vom PDP 9 aus einstellbar. Weniger überdimensioniert war der Harddisk des PDP 9 mit einer Kapazität von 131 KW. Bei einer Abtastrate von 370 Hz und im 24-Kanal-Betrieb war der Disk in knapp 15 Sekunden gefüllt. Im Übrigen soll zu dieser Auswertung im HRZ, die in [19] ausführlich beschrieben ist, nur noch festgehalten werden, dass sie sich als machbar herausstellte, dass es aber wenig sinnvoll ist, bereits einmal digitalisierte Signale im PCM-Demodulator wieder zu analogisieren, mit den Eingangsverstärkern des Analogrechners neu zu konditionieren (± 100 -Volt-Bereich), sie wiederum zu digitalisieren und dann endlich mit der eigentlichen Auswertung zu beginnen. Es muss damit gerechnet werden, dass die tatsächlich gemessenen Signale bei jeder A/D- oder D/A-Wandlung und bei jeder analogen Verstärkung oder Abschwächung verändert werden.

Im weiteren soll nur noch von den auf der Eclipse durchgeführten Auswertungen die Re-

de sein. Nach der Auslieferung des Rechners Ende 1979 wurden der Multiplexer und die für den Datentransfer notwendige, von John + Reilhofer gelieferte Hard- und Software installiert. Die Eclipse war zwar ursprünglich nur für die Behandlung von Problemen der Akustik vorgesehen gewesen, aber die zuständigen "Beamten" zeigten erfreulicherweise genügend Flexibilität. Während John + Reilhofer heute die Transfer-Infrastruktur auch für DEC-Rechner (Digital Equipment Corporation) liefert, beschränkte sich ihr Angebot zu jener Zeit auf zu DG-Rechnern passende Hard- und Software. Die Uebernahmeprogramme liefen dabei nur auf Anlagen, die mit dem Single-User-Betriebssystem RDOS ausgerüstet waren. Da die Eclipse aber unter dem Multi-User-System AOS betrieben wurde, musste die RDOS-Software umgeschrieben werden. Dieser Aufgabe unterzog sich ein EMPA-externer Spezialist.

In ihrem ursprünglichen Zustand war die Eclipse mit je einem festen und einem auswechselbaren 10-MB-Harddisk ausgerüstet. Da der feste Disk mit System-Routinen prak-

Bandspur	Kanal	Fahrachse A	Fahrachse K	Bandspur	Kanal	Fahrachsen A und K
1	1	WG	82	1	1	WG 82
	2	WG	84		2	WG 84
	3	WG	01		3	WG 01
	4	WG	02		4	WG 02
	5	WG	04		5	WG 04
	6	WG	05		6	WG 05
	7	WG	22		7	WG 22
	8	WG	24		8	WG 24
2	9	WG	112	2	9	WG 112
	10	DMS 32	WG 111		10	DMS 32
	11	DMS 42	WG 101		11	DMS 42
	12	DMS 52	WG 102		12	DMS 52
	13	DMS 50	DMS 22		13	DMS 50
	14	DMS 41	DMS 21		14	DMS 41
	15	DMS 51	DMS 20		15	DMS 51
	16	Kontaktschwellen			16	Kontaktschwellen
3	17	Kamera 1 hinten links		3	17	DMS 31
	18	Kamera 2 rechts			18	WG 111
	19	Kamera 3 vorne links			19	WG 101
	20	Kamera 4 rechts			20	WG 102
	21	Geschwindigkeitssignal			21	DMS 22
	22 - 24	leer			22	DMS 21
				23	DMS 20	
				24	Kontaktschwellen	

Bild 148: Auflistung der PCM-Kanalbelegung für die verschiedenen Versuchsreihen.

tisch belegt war, ergaben sich auf dem mobilen Disk bald Platzprobleme. Sie führten dazu, dass für die Auswertung der PCM-Daten ein spezieller Disk bereitgestellt werden musste. Da die Akustiker bei der Benützung der Eclipse natürlich priorisiert waren, wurden die Deibüel-Versuche zum grössten Teil ausserhalb der üblichen Arbeitszeiten ausgewertet. Seit der Beschaffung eines 147-MB-Winchester-Disks im Jahr 1982 sind diese Probleme gelöst. Die einzige geringfügige Widerwärtigkeit, die heute noch besteht, ist die Tatsache, dass während des Transfers von PCM-Daten in den Rechner alle anderen Benutzer blockiert werden. Nur so ist eine maximale Durchsatzrate von 40 KW/s möglich, und auch dies nur dann, wenn auf ein vorbereitetes kompaktes File geschrieben wird. Diese Rate erlaubt es immerhin, dass zum Beispiel 24 mit der üblichen Bandgeschwindigkeit von 3.75 ips aufgenommene Kanäle beim Transfer problemlos mit der doppelten Geschwindigkeit abgespielt werden können.

Das "sync-loss"-Problem beschäftigte die Gemüter während recht langer Zeit. Bei der Aufzeichnung digitaler Daten auf ein Magnetband ist damit zu rechnen, dass in gewissen Abständen Magnetisierungsfehler vorkommen und deshalb die Synchronisation ausfällt (sync loss). Tritt ein solcher undefinierter Zustand ein, gehen alle bit auf Null, oder, analog betrachtet, geht die Signalspannung zum Beispiel auf - 10 Volt. Wertet man solcherart gestörte Signale mit dem Rechner aus, erhält man je nach der Lage der Störung möglicherweise falsche Resultate. Die Uebernahmesoftware stellt es dem Benutzer frei, ob er sync-loss-behaftete Puffer übernehmen will oder nicht. Bei der Auswertung im Zeitbereich spielt es meist keine Rolle, ob der Datenstrom ein Loch, das bei Ablehnung solcher Puffer auftritt, aufweist oder nicht. Dies ist jedoch bei der Auswertung im Frequenzbereich nicht der Fall. Hier müssen auf jeden Fall sämtliche Daten übernommen und allfällige sync-losses geglättet werden. Diese Glättung, bei der über die gestörten Samples linear verbunden wird, ist ein ausgesprochen zeitaufwendiger Prozess. Zudem wird dabei ein zweites Rohdatenfile geschrieben, so dass sie bei Platzmangel auf dem Disk gar nicht durchführbar ist. Da mehr als die Hälfte der für eine Auswertung im Frequenzbereich vorgesehenen Datenfiles mindestens einen sync-loss aufwiesen, konnte diese Auswertung erst nach der Beschaffung des grossen Disks begonnen werden. Ende 1985 brachte John + Reilhofer als zusätzliche

Ausrüstung für die Demulatoren eine hardwaremässige sync-loss-Unterdrückung auf den Markt. Diese hält bei Auftreten einer Störung das letzte ordentliche Sample, bis die Synchronisation wieder hergestellt ist. Damit ist das sync-loss-Problem im wesentlichen gelöst; denn diese Signalausfälle halten meist nur über Bruchteile von Sekunden an, so dass die Stufe, die das Signal dann beim Uebergang "gestört/wieder synchronisiert" möglicherweise aufweist, in den meisten Fällen verschmerzt werden kann.

Die Entwicklung der für die Auswertung der Deibüel-Versuche notwendigen Programme wurde unter Anleitung von Sachverständigen vom Verfasser durchgeführt und nahm gut ein Jahr in Anspruch. Eine erste kleine Denksportaufgabe ergab sich aus der Tatsache, dass die Reihenfolge, in der die Samples auf dem Disk stehen, von der Anzahl gleichzeitig überspielter Bandspuren abhängig ist. Bezeichnet man den Vektor der in einem bestimmten Zeitpunkt erfassten Samples aller beteiligten Kanäle als "Rahmen", sind die zu den einzelnen Kanälen gehörigen Samples wie folgt im Rahmen untergebracht: Bei einer Spur: 1,2,3,4,5,6,7,8; bei zwei Spuren: 1,9,2,10,3,11,4,12 usw.; bei drei Spuren: 1,9,17,2,10,18,3,11,19 usw.

Für die Auswertung der gemessenen Signale wurde eine Reihe von Programmen erstellt, mit denen folgende Aufgaben gelöst werden können:

- Herstellung eines Parameter-Files, das ausser der Einstellung der Messverstärker alle einen bestimmten Kanal charakterisierenden Angaben enthält. Alle weiteren Programme lesen vor der Auswertung diese Daten ab Disk (P-File, Bild 149).
- Auswertung von Eichsignalen, die das effektive Uebertragungsverhalten der Messverstärker wiedergeben (E-File, Bild 150). Da dieses Verhalten zeit- und temperaturabhängig ist, wurde mindestens am Anfang und am Ende jedes Messhalbtages eine Eichung durchgeführt. Zusätzliche Eichungen ergaben sich, wenn die Fahrspur und damit die Instrumentierung gewechselt wurden.
- Kombination von Eichsignalen. Für die Auswertung der innerhalb einer bestimmten Messperiode erfolgten Versuche wurden die Ergebnisse der an ihrem Anfang und an ihrem Ende durchgeführten Eichungen arithmetisch gemittelt und in einem EK-File auf Disk abgelegt (Bild 151). Da die Stabilität der HBM-Messverstärker sehr gut ist,

erscheint dieses Vorgehen als gerechtfertigt.

- Bestimmung von Signal-Extremwerten und der Fahrgeschwindigkeit v.
- Digitale Filterung von Signalen.
- Bestimmung der dynamischen Inkremente ϕ in Funktion der Fahrgeschwindigkeit v.
- Grafische Ausgabe von gemessenen Signalen und der Funktion $\phi(v)$ auf einen Plotter.
- Bestimmung von Frequenz f und Dämpfung δ von einfachen, exponentiell abklingenden harmonischen Signalen.
- Umarbeitung von Signalen, so dass sie in den 2-Kanal-Fourier-Analysator Nicolet 660A transferiert und mit diesem im Frequenzbereich untersucht werden können.

Es ist nicht nur sehr unpraktisch, sondern wahrscheinlich auch nicht empfehlenswert, im Rechner gespeicherte Signale blind auszuwerten. Alle aufgeführten Programme, die sich mit der Bearbeitung von PCM-Rohdaten beschäftigen, sind daher nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Aus der grossen Menge gespeicherter Daten kann der Benutzer eine ihm vernünftig erscheinende Auswahl treffen und diese auf eine grafische Konsole vom Typ Tektronix 4012 ausgeben. Auf dem Bildschirm dieser Konsole mit einer Auflösung von 1K x 1K Punkten können dann in maximal acht Zeilen je maximal 1024 Signalpunkte dargestellt werden. Da die originale Abtastrate mit 370 Hz viel höher ist, als sie für die Darstellung von Signalen mit einer hier interessanten oberen Grenzfrequenz von einigen Hertz notwendig ist, stellt im allgemeinen jeder auf den Bildschirm projizierte Punkt den Mittelwert über eine frei wählbare Anzahl Samples dar. Ein Cross-Hair-Cursor erlaubt die Eingabe von maximal zehn Punkten, die

E M P A ABTEILUNG 116 MASSIVBAU AUFTRAG NR.: 10'784

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL

AUSGABE DES PCM-GRUNDPARAMETER-FILES : P.12.16

KANAL	NAME	DIMENSION	EICHKONST.	EXT.KORRFK.	EING.SPANNG.
1	WG 82	MM	1.961	1.006	10.000
2	WG 84	MM	1.923	1.006	10.000
3	WG 01	MM	2.000	1.025	10.000
4	WG 02	MM	1.979	1.015	10.000
5	WG 04	MM	1.963	1.014	10.000
6	WG 05	MM	2.000	1.022	10.000
7	WG 22	MM	1.968	1.038	10.000
8	WG 24	MM	2.032	1.033	10.000
9	WG 112	MM	1.970	1.021	10.000
10	DMS 32	MIKROD.	23.923	1.000	10.000
11	DMS 42	MIKROD.	23.923	1.000	10.000
12	DMS 52	MIKROD.	23.923	1.000	10.000
13	DMS 50	MIKROD.	23.923	1.000	10.000
14	DMS 41	MIKROD.	23.923	1.000	10.000
15	DMS 51	MIKROD.	23.923	1.000	10.000

Bild 149: Beispiel eines P-Files (PCM-Grundparameter).

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL
EICHUNG 176

AUSWERTUNG VON NULL - EICH - NULL - SIGNALEN
ALLE MESSWERTE IN VOLT. NUR PCMV IN DIGITALISIERUNGS-STUFEN

PCM-GRUNDPARAMETER-FILE : P.12.16

PARKFILE DER EICHSPANNUNGEN : E176.DR

DRIFT-PARAMETER : IMOD1 = 11 IMOD2 = 31 IMOD3 = 21
IENR = 176 FZEIT = .985

AUSGEWERTETER BEREICH :

NULLPEL ANFANG : ERSTER PUNKT : 1809 LETZTER PUNKT : 4169
EICHPEL : ERSTER PUNKT : 8945 LETZTER PUNKT : 11081
NULLPEL ENDE : ERSTER PUNKT : 13921 LETZTER PUNKT : 15961

KANAL	NAME	NULLANF/SIGMA	EICH/SIGMA	NULLEND/SIGMA	EICHSP	PCMV
1	WG 82	-.557 .008	9.478 .002	-.542 .002	10.029	2054
2	WG 84	-.557 .008	9.541 .001	-.537 .002	10.088	2066
3	WG 01	-.615 .008	9.438 .002	-.649 .002	10.073	2063
4	WG 02	-.625 .005	9.448 .003	-.654 .002	10.088	2066
5	WG 04	-.625 .005	9.438 .003	-.654 .002	10.078	2064
6	WG 05	-.669 .006	9.292 .002	-.752 .014	10.005	2049
7	WG 22	-.645 .003	9.399 .004	-.615 .002	10.029	2054
8	WG 24	-.654 .002	9.395 .004	-.625 .002	10.034	2055
9	WG 112	-.713 .004	9.233 .001	-.742 .002	9.961	2040
10	DMS 32	-.186 .010	7.725 .009	-.220 .009	7.930	1624
11	DMS 42	-.127 .009	7.788 .009	-.122 .009	7.915	1621
12	DMS 52	-.020 .009	7.930 .009	-.005 .009	7.939	1626
13	DMS 50	-.044 .009	7.964 .009	-.000 .009	7.988	1636
14	DMS 41	.059 .010	8.018 .009	-.107 .009	7.935	1625
15	DMS 51	.059 .010	8.003 .009	-.103 .009	7.925	1623

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL
EICHUNG 177

AUSWERTUNG VON NULL - EICH - NULL - SIGNALEN
ALLE MESSWERTE IN VOLT. NUR PCMV IN DIGITALISIERUNGS-STUFEN

PCM-GRUNDPARAMETER-FILE : P.12.16

PARKFILE DER EICHSPANNUNGEN : E177.DR

DRIFT-PARAMETER : IMOD1 = 11 IMOD2 = 31 IMOD3 = 21
IENR = 177 FZEIT = .986

AUSGEWERTETER BEREICH :

NULLPEL ANFANG : ERSTER PUNKT : 3161 LETZTER PUNKT : 5937
EICHPEL : ERSTER PUNKT : 10401 LETZTER PUNKT : 12849
NULLPEL ENDE : ERSTER PUNKT : 15385 LETZTER PUNKT : 16289

KANAL	NAME	NULLANF/SIGMA	EICH/SIGMA	NULLEND/SIGMA	EICHSP	PCMV
1	WG 82	-.586 .002	9.497 .001	-.557 .002	10.068	2062
2	WG 84	-.547 .002	9.590 .001	-.518 .002	10.122	2073
3	WG 01	-.605 .002	9.390 .002	-.649 .002	10.020	2052
4	WG 02	-.591 .003	9.443 .002	-.630 .002	10.059	2060
5	WG 04	-.591 .002	9.434 .002	-.630 .002	10.049	2058
6	WG 05	-.566 .003	9.263 .002	-.630 .002	9.863	2020
7	WG 22	-.640 .003	9.478 .004	-.562 .002	10.083	2065
8	WG 24	-.659 .003	9.453 .005	-.586 .001	10.078	2064
9	WG 112	-.698 .002	9.214 .002	-.728 .001	9.932	2034
10	DMS 32	-.864 .009	7.065 .010	-.879 .009	7.939	1626
11	DMS 42	-.024 .009	7.910 .009	-.015 .009	7.935	1625
12	DMS 52	-.034 .009	7.876 .009	-.088 .009	7.939	1626
13	DMS 50	-.103 .009	7.886 .009	-.112 .009	7.998	1638
14	DMS 41	.146 .009	8.096 .009	-.171 .009	7.939	1626
15	DMS 51	-.054 .010	7.847 .011	-.083 .010	7.920	1622

Bild 150: Beispiele von E-Files (Resultate der Eichungen 176 und 177).

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL
EICHKOMBINATION 176 177

BERECHNUNG VON EICH-KOMBINATIONS-SPANNUNGEN UND -KOEFFIZIENTEN

EICH - FILE : E176.DR FAKTOR : .50
EICH - FILE : E177.DR FAKTOR : .50

PCM-GRUNDPARAMETER-FILE : P.12.16

PARKFILE DER KOMBINIERTEN EICHKOEFFIZIENTEN : EK.176.177

KANAL	NAME	EICHSPANNUNG	EICHKOEFF.	DIMENSION
1	WG 82	10.049	.1951	MM /VOLT
2	WG 84	10.103	.1903	MM /VOLT
3	WG 01	10.044	.1991	MM /VOLT
4	WG 02	10.073	.1965	MM /VOLT
5	WG 04	10.063	.1951	MM /VOLT
6	WG 05	9.932	.2014	MM /VOLT
7	WG 22	10.054	.1957	MM /VOLT
8	WG 24	10.054	.2021	MM /VOLT
9	WG 112	9.946	.1981	MM /VOLT
10	DMS 32	7.935	3.0150	MIKROD. /VOLT
11	DMS 42	7.925	3.0187	MIKROD. /VOLT
12	DMS 52	7.939	3.0132	MIKROD. /VOLT
13	DMS 50	7.993	2.9929	MIKROD. /VOLT
14	DMS 41	7.935	3.0150	MIKROD. /VOLT
15	DMS 51	7.920	3.0206	MIKROD. /VOLT

Bild 151: Beispiel eines EK-Files (Kombination der Eichungen 176 und 177).

für den weiteren Ablauf des Programmes wesentlich sind. Der Rechner übernimmt dabei sowohl die Nummer des Punktes als auch die Nummer des Samples innerhalb der Gesamtzahl der pro Kanal überspielten Werte. Beim Extremwertprogramm bestimmt zum Beispiel die Strecke zwischen den Punkten 0 und 1 den Bereich "Nullpegel Anfang", d.h. einen Bereich, in dem sich das Fahrzeug in der Anfahrt zur Brücke befindet und in dem die Nullpegel aller Messsignale durch Mittelwertbildung über den Bereich bestimmt werden. Die weitere Auswertearbeit dieses Programmes wird dann in der gleichen Art gesteuert.

Leider war es nicht möglich, alle Auswerteprogramme zu einer Bibliothek zusammenzufassen. Die Eclipse ist ein 16-bit-Rechner, so dass die Grösse eines Programmes auf 32K beschränkt ist. Davon braucht allein der Array für die Ausgabe auf den Tektronix-Schirm 8K, so dass es bei allen Programmen notwendig war, diese einzeln zu laden und dabei möglichst raffiniert von der Overlay-Technik Gebrauch zu machen. Nach dem geplanten Ersatz der Eclipse durch einen 32-bit-Rechner dürften auch diese Probleme gelöst sein.

3.52 Im Zeitbereich

Die Grössen, die durch eine Analyse im Zeitbereich bestenfalls aus den aufgezeichneten Signalen bestimmt werden können, sind in Bild 2 definiert: Das dynamische Inkrement ϕ sowie Frequenz f und Dämpfung δ der im Ausschwingen dominierenden Brückenschwingung. Die Parameter f und δ können nur bestimmt werden, wenn der Ausschwingvorgang eine einfache, exponentiell abklingende harmonische Schwingung ist. Da eine Untersuchung der Signale im Frequenzbereich vorgesehen war, beschränkte sich die Auswertung im Zeitbereich in den weitaus meisten Fällen auf die Bestimmung von ϕ und der effektiven Fahrgeschwindigkeit v .

Als Standardprogramm für die Ermittlung von ϕ und v soll zunächst etwas näher auf das Extremwertprogramm PEAK eingegangen werden. Grundvoraussetzung ist die Existenz eines P- und eines EK-Files (s. Abschnitt 3.51). Die Angabe der Kanäle, die ausgewertet werden sollen, sowie die Einstellungen der Messverstärker gestalten sich relativ einfach, indem die entsprechenden Arrays auf dem Disk stehen (K-File, AMP-File) und bei Änderungen laufend aufdatiert werden, so dass das Programm immer die letzte gültigen

Angaben als Default-Werte vorschlägt. Es empfiehlt sich, vor der eigentlichen Auswertung diese Werte am Bildschirm zu kontrollieren und sie jeweils nach erfolgten Änderungen auch auf den Printer auszugeben (Bild 152). In einem nächsten Schritt hat man sich zu entscheiden, welche Signale für die Eingabe der Auswertebereiche auf den Bildschirm geholt werden sollen. Im Minimum sollten ein Brückensignal und das Kontaktschwellensignal gewählt werden.

Am Beispiel des Versuches 3097 (13R6AoA) sind in Bild 153 die Cross-Hair-Cursor-Eingaben angegeben, die das Extremwertprogramm PEAK erwartet:

```
0 - 1   Nullpegel Anfang,
2 - 3   Extremwerte,
4 - 5   Nullpegel Ende,
6 - 7   Fahrgeschwindigkeit   aus   Kontakt-
        schwellenimpulsen.
```

Grundsätzlich könnten diese Eingaben auch lediglich anhand des Kontaktschwellensignals vorgenommen werden. Es ist jedoch durchaus möglich, dass eine oder sogar mehrere der Kontaktschwellen gerade nicht ordnungsgemäss funktioniert hatten, oder dass die Brückensignale an einer kritischen Stelle einen sync-loss aufweisen. Im Mehrspur-Betrieb sind selten alle Spuren gleichzeitig von einem bestimmten sync-loss betroffen, so dass aus einem guten Kontaktschwellensignal nicht geschlossen werden kann, die auf anderen Spuren aufgezeichneten Signale seien ebenfalls gut.

Zuerst berechnet das Programm die Nullpegel der Signale vor und nach der Ueberfahrt und

E M P A ABTEILUNG 116 MASSIVBAU AUFTRAG NR.: 10'784

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL
VERSUCH 3097

AUSGABE DES PCM-GRUNDPARAMETER -FILES : P.12.16
DES EICH-KOEFFIZIENTEN -FILES : EK.176.177
UND EINES VERSTAERKUNGSFAKTOREN-FILES

KAN	NAME	DIMENSION	E-KONST. [DIM]	EXT.F.	PCM-IN [VOLT]	E-KOEFF [DIM/V]	AMP.F.
1	WG 82	MM	1.961	1.006	10.000	.1951	1.00
2	WG 84	MM	1.923	1.006	10.000	.1903	1.00
3	WG 01	MM	2.000	1.025	10.000	.1991	1.00
4	WG 02	MM	1.979	1.015	10.000	.1965	1.00
5	WG 04	MM	1.963	1.014	10.000	.1951	1.00
6	WG 05	MM	2.000	1.022	10.000	.2014	1.00
7	WG 22	MM	1.968	1.038	10.000	.1957	1.00
8	WG 24	MM	2.032	1.033	10.000	.2021	1.00
9	WG 112	MM	1.970	1.021	10.000	.1981	1.00
10	DMS 32	MIKROD.	23.923	1.000	10.000	3.0150	1.00
11	DMS 42	MIKROD.	23.923	1.000	10.000	3.0187	1.00
12	DMS 52	MIKROD.	23.923	1.000	10.000	3.0132	1.00
13	DMS 50	MIKROD.	23.923	1.000	10.000	2.9929	1.00
14	DMS 41	MIKROD.	23.923	1.000	10.000	3.0150	1.00
15	DMS 51	MIKROD.	23.923	1.000	10.000	3.0206	1.00

Bild 152: Beispiel der von einem Auswerteprogramm benützten Parameter.

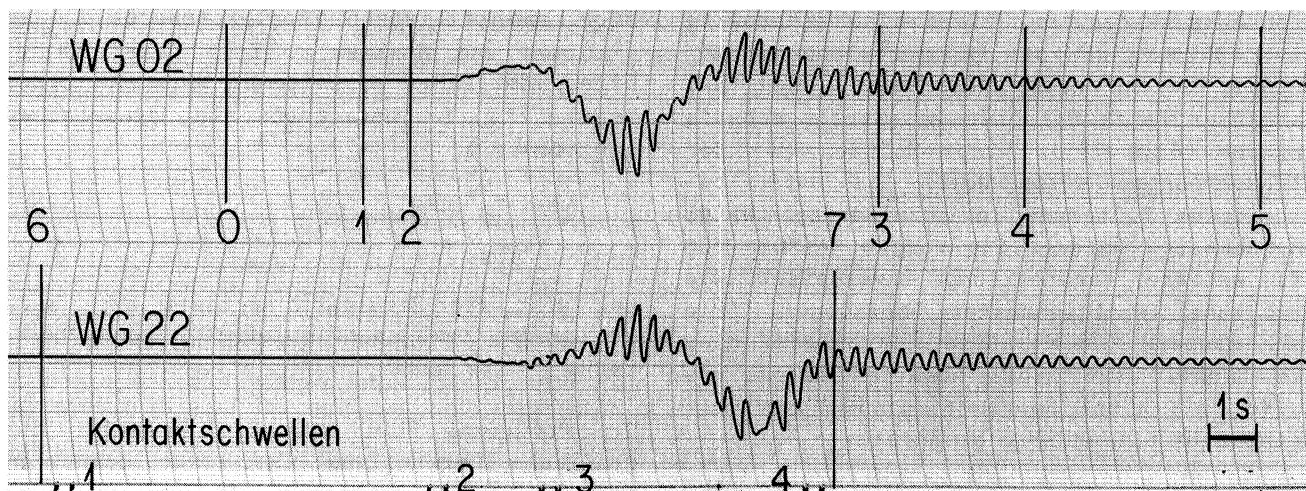


Bild 153: Die beim Versuch Nr. 3097 auf den Schreiber registrierten Zeitsignale und die Cursoreingaben, die das Programm PEAK erwartet.

bestimmt ihren Mittelwert. In einem zweiten Schritt werden die Maximal- und die Minimalwerte gesucht. Zuletzt wird die effektive Fahrgeschwindigkeit aufgrund der registrierten Kontaktpulse berechnet, wobei der Mittelwert aus den bei jeder Ueberquerung einer Kontaktschwelle bestimmbaren momentanen Geschwindigkeiten gebildet wird. Dieses Vorgehen hat die Vorteile, dass es auch bei Ausfall einer oder mehrerer der vier Kontaktschwellen noch funktioniert, und dass auch Informationen über die Gleichmässigkeit der Geschwindigkeit anfallen. Die zeitliche Lage der Impulse wird derart bestimmt, dass auf einem bestimmten, aber frei wählbaren Niveau eine Gerade durch das Signal gelegt und dann die Schnittpunkte dieser Geraden mit der auf- und der absteigenden Flanke jedes Impulses bestimmt werden. Es zeigte sich, dass bei hohen Fahrgeschwindigkeiten die Abtastrate von 370 Hz gerade noch ausreichte, um die Impulse aufzulösen. In einigen wenigen Fällen waren die Impulse von so schlechter Qualität, oder so schwach, dass das Verfahren versagte. Für diese Fälle wurde das Programm PEAKM geschrieben, das eine manuelle Eingabe von Impulsen mit Hilfe des Cross-Hair-Cursors gestattet. Ein gewisses Minimum an Impulsintensität muss dabei natürlich vorhanden sein. Die Resultate, Extremwerte und mittlere Fahrgeschwindigkeit, werden sowohl auf einen Printer ausgegeben (Bild 154) als auch auf den Disk abgelegt (V-File).

Die Vorzeichen der dimensionierten Messwerte sind so gewählt, dass eine Verschiebung nach unten sowie eine Stauchung negativ, eine Verschiebung nach oben sowie eine Dehnung positiv sind.

E M P A ABTEILUNG 116 MASSIVBAU

AUFTRAG NR.: 10'784

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL

VERSUCH 3097

BESTIMMUNG VON SIGNAL-SPITZENWERTEN UND FAHRGESCHWINDIGKEIT (AUTOM.)

FOLGENDE PARAMETER-FILES SIND VERWENDET WORDEN :

PCM-GRUNDPARAMETER : P.12.16
EICH-KOEFFIZIENTEN : EK.176.177

DRIFT-PARAMETER : IMOD1 = 11 IMOD2 = 31 IMOD3 = 21
IENR = 176 FZEIT = .985

DIE RESULTATE SIND AUF DEM FILE : V3097 GESPEICHERT

DIE MITTLERE FAHRGESCHWINDIGKEIT BETRUG : 53.28 KM/H

AUSGEWERTETER BEREICH : ERSTER PUNKT : 2311
LETZTER PUNKT : 7877

KAN	NAME	DIMENS.	E-KOEFF.	AMP.F.	MAXIMUM	BEI	MINIMUM	BEI
			[DIM/V]		[DIM]		[DIM]	
1	WG 82	MM	.1951	1.00	.41	4197	-.79	3298
2	WG 84	MM	.1903	1.00	.39	4197	-.78	3299
3	WG 01	MM	.1991	1.00	.85	5095	-1.57	4191
4	WG 02	MM	.1965	1.00	.80	5092	-1.52	4320
5	WG 04	MM	.1951	1.00	.83	5092	-1.57	4318
6	WG 05	MM	.2014	1.00	.89	5093	-1.60	4320
7	WG 22	MM	.1957	1.00	.93	4323	-1.38	5094
8	WG 24	MM	.2021	1.00	.95	4325	-1.41	5094
9	WG 112	MM	.1981	1.00	.70	5094	-1.14	4320
10	DMS 32	MIKROD.	3.0150	1.00	6.83	4280	-.72	5093
11	DMS 42	MIKROD.	3.0187	1.00	7.00	4280	-.32	5091
12	DMS 52	MIKROD.	3.0132	1.00	18.27	4268	-20.66	4314
13	DMS 50	MIKROD.	2.9929	1.00	12.30	4727	-15.53	4685
14	DMS 41	MIKROD.	3.0150	1.00	19.21	4523	-.88	5094
15	DMS 51	MIKROD.	3.0206	1.00	22.24	4519	-13.42	4468

Bild 154: Resultate, wie sie das Spitzenwertprogramm PEAK liefert.

Damit die dynamischen Inkremente berechnet werden können, müssen noch die statischen Vergleichswerte bestimmt werden. Zu diesem Zweck waren zu Beginn jeder Versuchsserie mit einem bestimmten Fahrzeug und Fahrt auf einer bestimmten Achse drei sogenannte "quasi-statische" Fahrten durchgeführt worden, wobei die Fahrgeschwindigkeit rund 2 km/h betragen hatte. Die von diesen Fahrten bestimmten Extremwerte sind als statische Vergleichswerte meist nicht brauchbar, da die Brücke auch bei langsamer Ueberfahrt des Fahrzeuges mehr oder weniger stark schwingt. Die Ausnahme betrifft die Signale der in Brückenlängsrichtung angebrachten

Dehnungsmessstreifen. Diese sind einerseits zwar abhängig von den Längsschwingungen der Brücke, zeigen aber andererseits auch bei langsamer Fahrt über die Messstelle scharfe Spitzen (Bild 155). Diese Spitzenwerte der Längsdehnungen wären durch die unten beschriebene Filterung in unzulässiger Weise abgeschwächt worden. Sie wurden deshalb für die weitere Verarbeitung unverändert als statische Vergleichswerte übernommen. (Die ganz saubere Lösung hätte darin bestanden, die Signale mit einem scharfen Bandsperrfilter mit einem Sperrbereich von zum Beispiel 2 Hz bis 4 Hz zu behandeln.)

Alle anderen Signale behandelte man jedoch mit einem digitalen Filter derart, dass alle störenden Brückenschwingungen unterdrückt wurden. Dieser Filterungsprozess ist relativ aufwendig, denn ausgehend von einer Abtastrate von 370 Hz war ein Tiefpassfilter zu konstruieren, das einen Übergangsbereich von 0.2 Hz bis 1.2 Hz aufweist. Unter Anleitung von Fachleuten der Abteilung Elektrotechnik der ETH konnte mit Hilfe des Programmes PARKS ein adäquates Filter erarbeitet werden. Es handelt sich um ein zweistufiges, nicht-rekursives Filter mit zweimal 128 Koeffizienten, das im Sperrbereich eine Dämpfung von - 80 dB und im Durchlassbereich eine Welligkeit von 0.005 dB aufweist. Die bei quasi-statischen Versuchen registrierten Signale weisen meist eine Dauer von mehreren Minuten auf, so dass der Filterungsprozess für 24 Kanäle eine recht lange Zeit in Anspruch nimmt. Die von den quasi-statischen Versuchen bestimmten V-Files wurden nach durchgeführter Filterung sinngemäss editiert.

Für die Bestimmung der dynamischen Inkremente ϕ in Funktion der Fahrgeschwindigkeit v wurde das Programm PHI geschrieben. Es liest zunächst die V-Files der quasi-statischen Versuche vom Disk, berechnet pro Kanal die

mittleren statischen Vergleichswerte A_{stat} (Minimum und Maximum), liest dann die V-Files sämtlicher dynamischer Versuche einer Serie (A_{dyn}), berechnet die dynamischen Inkremente ϕ

$$\phi = \frac{A_{\text{dyn}} - A_{\text{stat}}}{A_{\text{stat}}} \cdot 100 [\%]$$

und gibt die Resultate sortiert nach aufsteigender Fahrgeschwindigkeit v auf Printer und Disk aus.

Die Programme PLOT und MPlot erlauben die grafische Darstellung von einer oder von mehreren $\phi(v)$ -Funktionen (Bilder 156 und 157).

Die Möglichkeiten, eine Dämpfungsanalyse im Frequenzbereich durchzuführen, können bisher noch nicht genutzt werden. Da es jedoch vorkam, dass auch die Deibüel-Brücke einfach harmonisch ausschlag, wurde ein Programm DAMP geschrieben, das aus einem solchen Vorgang die Frequenz f und das logarithmische Dämpfungsdekrement δ sowie den prozentualen Anteil an kritischer Dämpfung ζ bestimmt. Das Vorgehen ist dabei gleich, wie es bei der Handauswertung üblich ist (Bild 2). Zuerst wird eine mittlere Gerade, die Symmetrieachse des Vorganges, bestimmt. Aus den Extremwerten sämtlicher Halbwellen und ihrer zeitlichen Lage werden dann f , δ und ζ berechnet, wobei die Anzahl Perioden, über die sich die Auswertung erstrecken soll, sowie ihre Lage innerhalb des Ausschlagvorganges frei wählbar sind (Bild 158). So kann zum Beispiel untersucht werden, ob f und δ amplitudenabhängig sind. Die hohe Abtastrate von 370 Hz erweist sich bei der Auswertung mit dem Programm DAMP wiederum als absolut notwendig. Da die Grösse eines Programmes auf 32K begrenzt ist, kann in einem Arbeitsgang nur ein einzelner Kanal ausgewertet werden.

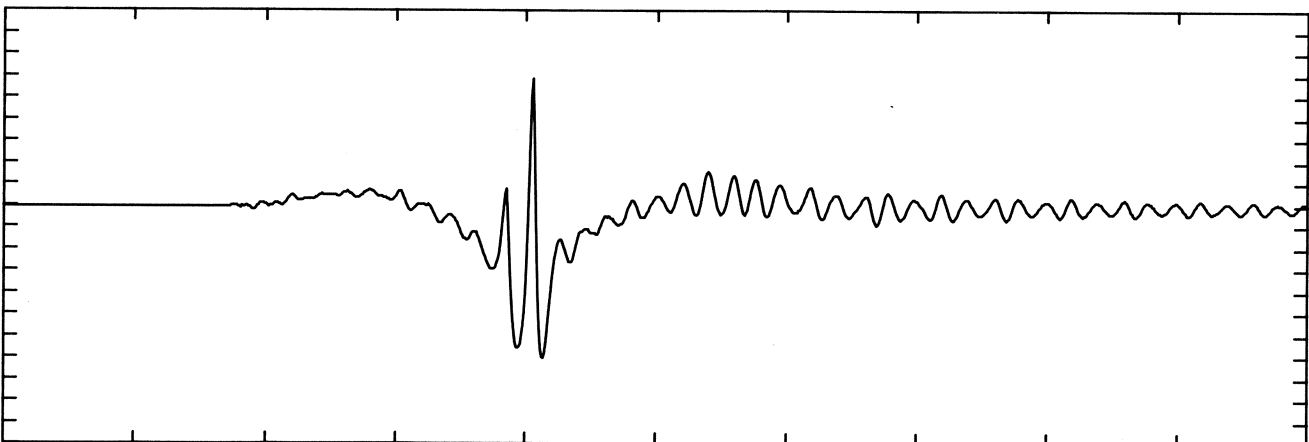


Bild 155: Zeitsignal, wie es von der Messstelle DMS 52 geliefert wurde (Versuch Nr. 3097).

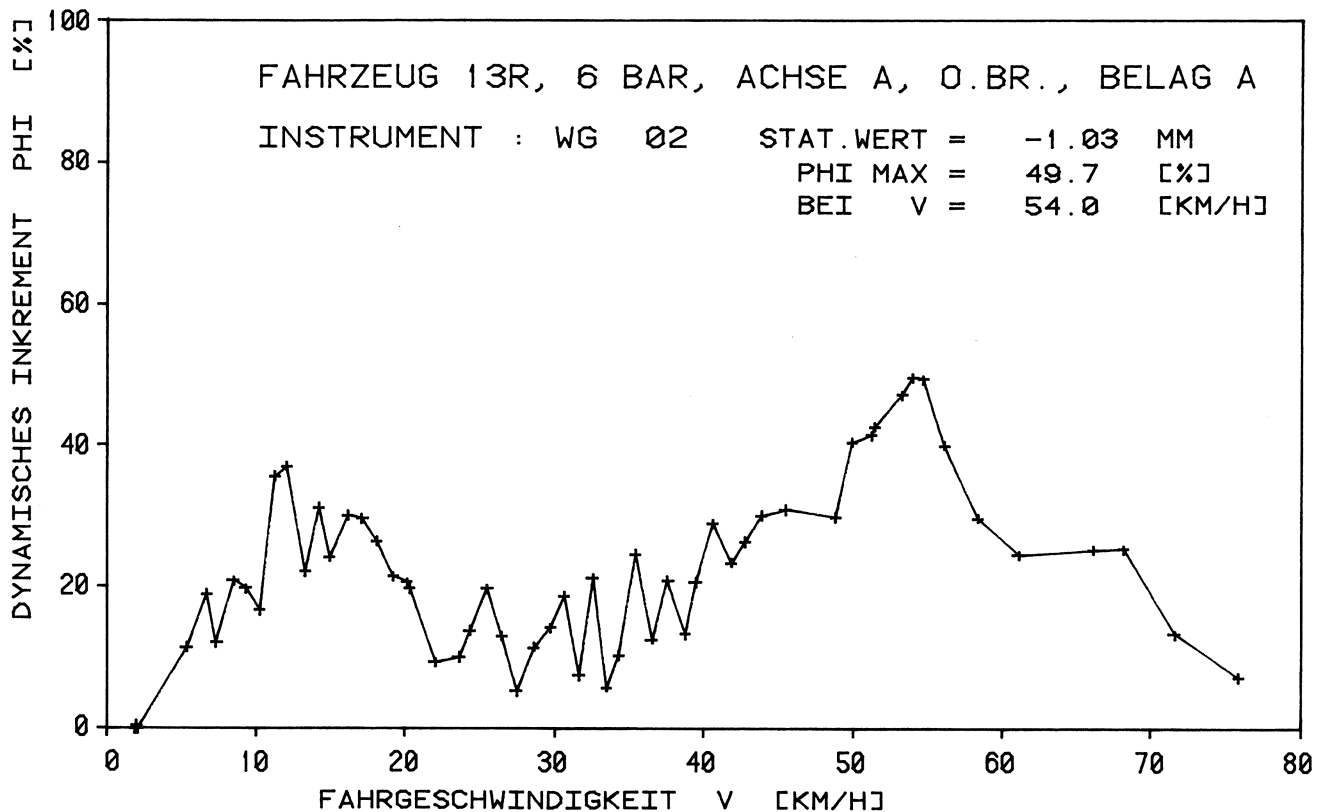


Bild 156: Beispiel der Darstellung dynamischer Inkremente in Funktion der Fahrgeschwindigkeit ($\phi(v)$ -Funktion, später auch mit DI-Verlauf bezeichnet).

EMPA, ABTEILUNG MASSIVBAU
 DYNAMISCHE VERSUCHE BERGSPURBRUECKE DEIBUEL

MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 02

	INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	WG 02	20R 10 AoA	-1.75 MM	42.42	53.7
+—+	WG 02	21R 10 AoA	-1.68 MM	75.14	78.2
—+—	WG 02	24R 10 AoA	-1.88 MM	56.79	52.6
▲—▲	WG 02	25R 10 AoA	-1.76 MM	73.71	51.7

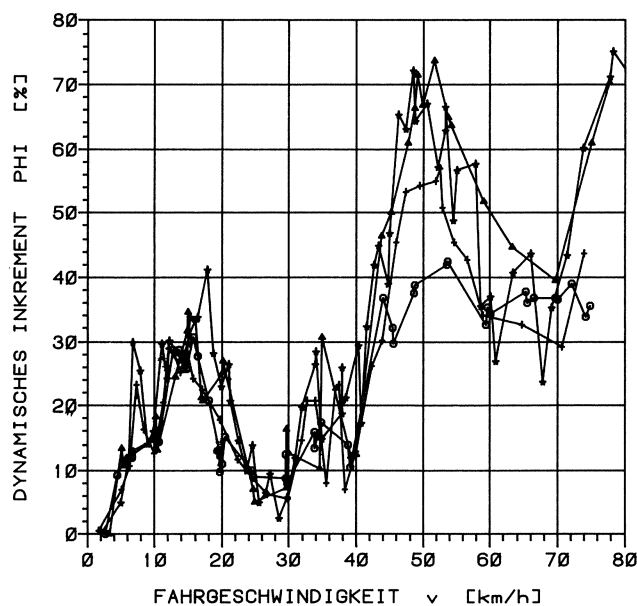


Bild 157: Beispiel der Darstellung mehrerer $\phi(v)$ -Funktionen zu Vergleichszwecken.

DYNAMISCHE VERSUCHE 1978 AN DER BERGSPURBRUECKE DEIBUEL
 VERSUCH 3097, AUSSCHWINGEN

SCHWINGUNGS- UND DAEMPFUNGSPARAMETER

AUSGEWERTETER ZEITBEREICH :					NR. DER ERSTEN AMPLITUDE :	1
ANZAHL PERIODEN :					NR. DER LETZTEN AMPLITUDE :	11
KANAL	FREQUENZ [HZ]	PERIODE [S]	LOG. DEKR.	C/C.CR [%]		
4	3.036	.329	.071	1.12		
AUSGEWERTETER ZEITBEREICH :					NR. DER ERSTEN AMPLITUDE :	11
ANZAHL PERIODEN :					NR. DER LETZTEN AMPLITUDE :	21
KANAL	FREQUENZ [HZ]	PERIODE [S]	LOG. DEKR.	C/C.CR [%]		
4	3.038	.329	.057	.91		
AUSGEWERTETER ZEITBEREICH :					NR. DER ERSTEN AMPLITUDE :	21
ANZAHL PERIODEN :					NR. DER LETZTEN AMPLITUDE :	31
KANAL	FREQUENZ [HZ]	PERIODE [S]	LOG. DEKR.	C/C.CR [%]		
4	3.041	.329	.039	.62		
AUSGEWERTETER ZEITBEREICH :					NR. DER ERSTEN AMPLITUDE :	31
ANZAHL PERIODEN :					NR. DER LETZTEN AMPLITUDE :	41
KANAL	FREQUENZ [HZ]	PERIODE [S]	LOG. DEKR.	C/C.CR [%]		
4	3.056	.327	.032	.51		
AUSGEWERTETER ZEITBEREICH :					NR. DER ERSTEN AMPLITUDE :	41
ANZAHL PERIODEN :					NR. DER LETZTEN AMPLITUDE :	51
KANAL	FREQUENZ [HZ]	PERIODE [S]	LOG. DEKR.	C/C.CR [%]		
4	3.061	.327	.032	.51		
AUSGEWERTETER ZEITBEREICH :					NR. DER ERSTEN AMPLITUDE :	51
ANZAHL PERIODEN :					NR. DER LETZTEN AMPLITUDE :	61
KANAL	FREQUENZ [HZ]	PERIODE [S]	LOG. DEKR.	C/C.CR [%]		
4	3.084	.324	.030	.48		

Bild 158: Ausgabe, wie sie vom Programm DAMP geliefert wird.

3.53 Im Frequenzbereich

Die zentrale Operation für digitale Signalanalysen im Frequenzbereich ist die schnelle Fourier-Transformation oder FFT (= Fast Fourier Transform) bzw. DFT (= Discrete Fourier Transform), die von Cooley und Tukey im Jahr 1965 entwickelt worden ist [61], [62]. Mit dieser Transformation kann aus N äquidistant mit einer Rate s abgetasteten Samples eines Zeitsignals ein Frequenzspektrum mit höchstens $N/2$ wiederum äquidistanten Frequenzlinien (im Bereich positiver Frequenzen) berechnet werden. Je nachdem, ob die spektrale Dichte aus den Amplituden oder den Amplitudenquadraten berechnet wird, erhält man ein RMS-(Amplituden-)Spektrum oder ein Power-(Varianz-)Spektrum. Normiert man die spektrale Dichte auf eine Bandbreite von 1 Hz, ergeben sich sogenannte Density-Spektren, die als RSD- bzw. PSD-Spektren bezeichnet werden.

Die Distanz zwischen zwei Frequenzlinien, d.h. die Auflösung Δf eines Spektrums, ergibt sich direkt aus der Länge T des transformierten Zeitfensters zu $\Delta f = 1/T$ [Hz]. Ein weiterer wichtiger Wert ist die obere Grenzfrequenz f_c eines Spektrums. Sie kann nicht grösser sein als $f_c = (N/2) \cdot \Delta f = N/2T$, beträgt im allgemeinen aber rund $f_c = 0.4 \cdot N \cdot \Delta f$. Diese Tatsache hängt mit dem Aliasing-Effekt zusammen bzw. damit, dass gemäss dem Abtasttheorem von Shannon dafür gesorgt werden muss, dass das zu transformierende Zeitsignal sicher keine Frequenzkomponenten enthält, die höher sind als $f = 1/2 s$. Die Steilheit der Anti-Aliasing-Filter, mit denen deshalb ein Zeitsignal vor der Transformation behandelt werden muss, kann nicht unendlich gross sein, weshalb meist auf die höchsten Frequenzlinien verzichtet und f_c zum letztgenannten Wert gewählt wird.

Die Durchführung einer Fourier-Transformation kann entweder mit entsprechender Software oder mit einem der Geräte geschehen, die speziell zu diesem Zweck entwickelt worden und auf dem Markt erhältlich sind. Es handelt sich dabei um sogenannte FFT-Analysatoren. Die elegante Lösung, dass zwar das Datenhandling softwaremässig geschieht, der Rechner für die Durchführung der eigentlichen Transformation aber mit einer FFT-Platine bestückt wird, hat sich erst in jüngster Zeit durchzusetzen vermocht. Zwar war für die Eclipse eine FFT-Software-Routine vorhanden, aber sie hätte noch von RDOS auf AOS umgeschrieben werden müssen, so dass be-

schlossen wurde, das Problem hardwaremässig zu lösen. Dieser Entscheid wurde auch dadurch erleichtert, dass ein FFT-Analysator für die Transformation von zum Beispiel 1K Samples wesentlich weniger als eine Sekunde benötigt, während die Lösung des gleichen Problems mit einem Programm den Rechner während rund einer halben Minute beschäftigt. In der Folge wurde ein bereits vorhandener zweikanaliger Analysator vom Typ Nicolet 660A an die Eclipse angeschlossen. Leider war das von den Gerätespezifikationen versprochene 16-bit-parallel-Interface nicht existent, so dass man zur Anwendung eines Kunstgriffes gezwungen war: Der Transfer der Zeitsignale Eclipse-Nicolet geschieht über ein RS-232-Interface, für die umgekehrte Richtung wird ein IEEE-Interface benutzt. Im heutigen Zustand können zwar Cursor-Ablesungen, nicht aber Spektren oder Transferfunktionen vom Nicolet zur Eclipse geschickt werden.

Bedient man sich der beiden Analog-Eingänge des Nicolet, sorgt das Gerät selbst dafür, dass Abtastrate und Filterung den Erfordernissen entsprechen. Sobald man aber die Zeitsignale in digitaler Form transferiert, müssen diese zweckmässig präpariert werden. Für ein PCM-Rohdatenfile bedeutet dies, dass es zunächst gefiltert werden muss. Dann ist die Abtastrate von den ursprünglichen 370 Hz auf einen gewünschten Wert zu bringen, und schliesslich sind die 12-bit-Samples zu dimensionieren und in für den Nicolet verständliche 16-bit-Samples umzuwandeln. Dies tönt recht kompliziert, kann aber mit Hilfe entsprechender Programme ohne Informationsverlust und rasch geschehen. Einzig die digitale Tiefpassfilterung, hier mit einstufigen, nicht-rekursiven Filtern mit wiederum 128 Koeffizienten und einem Übergangsbereich von 20 Hz bis 26 Hz, 30 Hz bis 36 Hz oder 40 Hz bis 46 Hz, nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch. Während dieser Konditionierung der PCM-Rohdaten werden nebenbei Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der originalen Signale ermittelt. Diese Grössen sind insbesondere bei den Radlastsignalen von einigem Interesse.

Ein zentraler Vorteil des beschriebenen Vorgehens soll nicht unerwähnt bleiben: Es war vorgesehen, Amplituden- und Phasenbeziehungen nicht nur zwischen zwei, sondern zwischen bis zu sieben verschiedenen, synchron erfassten Signalen zu untersuchen. Eine grundlegende Voraussetzung dazu ist, dass die Zeitfenster aller Signale exakt den gleichen Zeitbereich umfassen. Mangels der

dazu notwendigen Triggersignale wäre es praktisch nicht möglich gewesen, diese Anforderung bei zweikanaligem, und deshalb mehrfach zu wiederholendem, analogem Ansteuern des Nicolet zu erfüllen. Dagegen bereitet es keine Probleme, bei der Filterung, d.h. beim ersten Präparationsschritt für die PCM-Rohdaten, das Zeitfenster mit Hilfe des Cursors auf dem Tektronix-Schirm exakt zu definieren und es dann für eine beliebige Anzahl Kanäle auch exakt konstant zu halten. Auf der Arbeitsquittung, die nach jeder Filterung auf ein Diskfile geschrieben wird, sind Anfangs- und Endpunkt des Zeitfensters vermerkt, so dass es sogar möglich ist, nachträglich aus einem Rohdatenfile ein exakt synchrones Zeitfenster irgendeines Kanales herauszuholen.

Neben den erwähnten technischen waren auch taktische Probleme zu lösen. Aus den vorgeannten Randbedingungen bezüglich Auflösung und Grenzfrequenz eines Spektrums geht hervor, dass von der FFT nicht erwartet werden kann, sie sei in jedem Fall ein Werkzeug mit durchschlagender Wirkung: Verfügt man zum Beispiel über ein zwei Sekunden langes Zeitsignal, ist es leider nicht möglich, daraus ein 20-Hz-Spektrum mit einer Auflösung von $\Delta f = 0.05$ Hz zu berechnen (das zudem auch noch zuverlässig sein sollte). Die praktische Anwendung der FFT auf die vorliegenden Probleme zeitigte zunächst das ernüchternde Resultat, dass die aufgezeichneten Zeitsignale teilweise von so kurzer Dauer waren, dass das Ergebnis der FFT den Erwartungen nicht entsprechen konnte. Geht man von einer erwünschten Auflösung des Spektrums von $\Delta f = 0.05$ Hz aus, ergibt sich eine minimale erforderliche Länge des Zeitfensters von $T = 20$ s. Um die Zuverlässigkeit des Spektrums auf ein einigermaßen akzeptables Mass anzuheben, sollte es über mindestens drei Fenster gemittelt werden. Bei einem Overlap von 50%, wie ihn der Nicolet verwendet, benötigt man dazu ein Signal von $T = 40$ s Länge. Berücksichtigt man die Länge der Versuchsstrecke von 115 m, ergibt sich eine maximale Fahrgeschwindigkeit von $v = 2.88$ m/s oder $v = 10.35$ km/h, für die ein genügend langes Signal vorhanden ist. Reduziert man die Ansprüche an die Auflösung auf $\Delta f = 0.125$ Hz, findet man eine maximale Geschwindigkeit von $v = 25.88$ km/h, für $\Delta f = 0.25$ Hz ergibt sich $v = 51.75$ km/h.

In Diskussionen mit Fachleuten an der ETH stellte sich heraus, dass alle Tricks, die akute Datenknappheit zu umgehen, die Lage nur verschlechtert hätten. So führt zum Bei-

spiel das künstliche Verlängern eines Zeitfensters durch Auffüllen mit Dummy-Daten, zum Beispiel mit Nullen, nicht nur zum Erscheinen faktisch gar nicht existenter Komponenten im Spektrum, sondern die tatsächlich vorhandenen Spektrallinien werden in ihrem Wert auch noch verfälscht. Nach eingehenden Voruntersuchungen wurde deshalb der Wunsch aufgegeben, von allen Signalen Spektren mit wenigstens gleicher Auflösung Δf zu berechnen. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeuges wurden für die Auswertung im Frequenzbereich folgende Randbedingungen gewählt:

Brückensignale

Geschwindigkeit v [km/h]	Abtastrate s [Hz]
5.00 - 9.99	51.2
10.00 - 29.99	128.0
≥ 30.00	256.0

Grenzfrequenz f_c [Hz]	Auflösung Δf [Hz]
20	0.05
50	0.125
100	0.25

Fahrzeugsignale

Geschwindigkeit v [km/h]	Abtastrate s [Hz]
5.00 - 29.99	128.0
≥ 30.00	256.0

Grenzfrequenz f_c [Hz]	Auflösung Δf [Hz]
50	0.125
100	0.25

Dass für die Untersuchung der Brückensignale bei kleinen Geschwindigkeiten der höheren Auflösung der Vorzug vor der höheren Anzahl Mittelungen gegeben wurde, ist wie folgt zu begründen: Die Anforderungen an die Auflösung sind hoch, weil die Eigenfrequenzen der Brücke und die Störfrequenzen der Fahrzeuge sehr dicht beieinanderliegen. Zudem zeigten sich die Spektren der Brückensignale allgemein weniger empfindlich auf die Anzahl Mittelungen als die der Fahrzeugsignale. (Dass aber ausgerechnet die Deibüel-Brücke eine Struktur ist, die zum Teil ein nichtstationäres Ausschwingverhalten zeigt, wurde erst bei der Beobachtung ungewöhnlicher Veränderungen in den Spektren aus mehreren aufeinanderfolgenden Zeitfenstern von Ausschwingvorgängen erkannt.)

Für Geschwindigkeiten $v > 69$ km/h sind die Zeitsignale so kurz, dass auch für das 100-

Hz-Spektrum keine Mittelung mehr möglich ist. Die Grenzfrequenz f_c konnte aber nicht mehr weiter erhöht werden, da die erforderliche Abtastrate sonst höher gewesen wäre als die originale Rate $s = 370$ Hz. Mit der Wahl einer höheren Bandgeschwindigkeit bei der Aufzeichnung hätte dieses Problem vermieden werden können.

Für den grössten Teil der Versuchsfahrten mit allen 2D-Fahrzeugen und mit dem Lastenzug Nr. 42 in der Fahrachse A und ohne Brett auf der Fahrbahn wurden folgende Signale im Frequenzbereich untersucht:

Brückensignale : WG 02, WG 22, WG 82

Fahrzeugsignale : K1, K2, K3, K4

Dabei wurde das während der Fahrt erfasste Signal in drei Teilbereiche unterteilt:

Versuchsstrecke vor der Brücke : Index V

Versuchsstrecke auf der Brücke : Index W

Versuchsstrecke nach der Brücke : Index N

Die Fahrzeugsignale wurden in den Teilbereichen V und W, die Brückensignale in den Bereichen W und N ausgewertet. Das für den Bereich W gewählte Zeitfenster war für Fahrzeug und Brücke jeweils identisch. Pro Versuchsfahrt resultierten demnach 14 RSD-Spektren, die abgekürzt wie folgt bezeichnet werden:

K1V K2V K3V K4V

K1W K2W K3W K4W

02W 22W 82W

02N 22N 82N

Die Berechnung von Amplituden-Spektren wurde derjenigen von Varianz-Spektren vorgezogen, weil im vorliegenden Fall das Interesse auf die Durchbiegungs- und die Radlast-Amplituden gerichtet ist und nicht auf deren Quadrate (wie dies bei Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik häufig der Fall ist). Bei den im jeweils gleichen Zeitabschnitt erfassten Signalen konnten mit Hilfe der ebenfalls vom Nicolet berechneten Transferfunktion die Phasen- und Amplitudenbeziehungen zwischen jeweils zwei Signalen untersucht werden. Als Qualitätsmass für die Zuverlässigkeit der ermittelten Beziehungen kann die Kohärenz, wie Phasen- und Amplitudenverhältnis eine Funktion der Frequenz, herangezogen werden. Für aus ungemittelten Spektren berechnete Transferfunktionen trifft dies jedoch nicht zu, da die Kohärenz in diesem Fall keine aussagekräftigen Werte zu liefern vermag.

3.6 Resultate: Die dynamischen Radlasten

3.61 Im Zeitbereich

Als Beispiele für die aufgezeichneten Radlastsignale zeigen die Bilder 159 bis 162 die während der Versuche Nr. 4089, 14R10AoA, $v = 67.50$ km/h, und Nr. 4099, 14R10AmA, $v = 69.49$ km/h, registrierten Signale. Dabei handelt es sich um rohe Opto-Signale in Volt bzw. in Digitalisierungsstufen, die für die weitere Verarbeitung mit der jeweils gültigen LSK-Kurve in Radlastsignale in kN umgewandelt wurden (s. dazu auch Abschnitt 3.22, "Messung der dynamischen Radlasten").

Von den während der Fahrten ohne Brett auf der Fahrbahn gemessenen Radlasten wurde im Zuge dieser Umwandlung die Standardabweichung σ_F getrennt für die Bereiche V und W, d.h. für die Phasen "Fahrzeug auf dem Versuchsbelag vor der Brücke" und "Fahrzeug auf der Brücke" berechnet. In den folgenden Diskussionen wird als Mass für die dynamische Einwirkung eines Fahrzeuges auf seine Unterlage immer diese Standardabweichung der Radlasten benützt. Der Vollständigkeit halber enthalten Bild 163 und einige der grafischen Darstellungen neben σ_F ebenfalls Angaben über die statischen Radlasten und über den Variationskoeffizienten V_F der Radlasten, d.h. den Quotienten aus der Standardabweichung und der statischen Radlast. Diese Werte werden aber nicht weiter diskutiert.

Der Zusammenhang zwischen der Radlast σ_F und der Fahrgeschwindigkeit v ist im Anhang 2 für alle untersuchten Versuchsserien grafisch dargestellt (A2.1 bis A2.11). Die Ergebnisse für die beiden Räder jeder Achse wurden dabei der Einfachheit halber gemittelt. Die entsprechende Bezeichnung, V für Vorderachse und H für Hinterachse, wird dem Fahrzeugcode beigelegt (z.B. 11R10V und 11R10H). Beim vierachsigen Lastenzug 42R war pro Achse nur an einem Rad gemessen worden. Von vorne nach hinten werden die Achsen mit VV, VH, HV und HH bezeichnet.

Das für die Erstellung der Grafiken benützte Computer-Programm SAS erlaubt die Berechnung einer Regressionskurve für die Abhängigkeit der Radlasten σ_F von der Fahrgeschwindigkeit v . Die Koeffizienten des quadratischen Modelles, das sich für die Regression aufdrängte, sind (ebenso wie die statischen Radlasten) in A2.1 bis A2.11 ebenfalls eingetragen. Die Tatsache, dass

einer Fahrgeschwindigkeit Null natürlich ein σ_F von ebenfalls Null entspricht, konnte bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden.

Obschon eine rein auf den Zeitbereich konzentrierte Diskussion der dynamischen Radlasten nicht besonders ergiebig sein kann, sollen hier einige Zusammenhänge und Abhängigkeiten untersucht werden. Ohne Informationen aus dem Frequenzbereich können jedoch die Resultate der Abklärungen, die sich meist auf die Phase V konzentrieren, nicht interpretiert werden. Dies wird im Rahmen eines anderen Berichtes geschehen [65].

Braun weist in [49] für lineare Fahrzeugmodelle und Fahrbahnen, deren Unebenheiten eine geschwindigkeitsproportionale Anregungsdichte erzeugen, nach, dass unter anderem die Standardabweichung der Radlast mit der Quadratwurzel aus der Fahrgeschwindigkeit ansteigt. Die Gelegenheit soll benützt werden, um zu untersuchen, ob diese theoretisch begründete Aussage auch zutrefte, wenn zwar die Anforderungen an die Fahrbahnoberfläche, nicht aber diejenigen an das Fahrzeugmodell erfüllt sind. Dazu sollen in der Folge die für die Phasen V ermittelten Resultate diskutiert werden.

Für die $\sigma_F(v)$ -Kurven müsste also zumindest gelten, dass sie konkav sind, d.h. dass ihre Steigung mit zunehmendem v abnimmt, bzw. dass der Koeffizient des quadratischen Gliedes negativ ist. Eine Ueberprüfung zeigt, dass dies für Fahrten auf dem Belag A, nicht aber für solche auf dem Belag B der Fall ist (A2.1 bis A2.11).

Im weiteren wurden mit Hilfe der Regressionskurven die σ_F -Werte für die Geschwindigkeiten $v = 15$ km/h und $v = 60$ km/h berechnet. Diese beiden Werte wurden einigermaßen willkürlich für tiefere bzw. höhere Geschwindigkeiten als charakteristisch ausgewählt und werden auch weiter unten wieder benützt. Theoretisch müsste $\sigma_F(60)/\sigma_F(15) = \lambda = 2.0$ sein. Bild 163 zeigt unter anderem die gefundenen Zahlenwerte für λ , wobei vereinfachende Bezeichnungen für die σ_F -Werte verwendet werden: σ_{15} anstelle von $\sigma_F(15)$ usw. Eine erste Untersuchung zeigt, dass λ zwischen $\lambda_{\min.} = 1.48$ und $\lambda_{\max.} = 2.48$ streut, wobei der Mittelwert $\lambda_m = 1.78$ und die Standardabweichung $\sigma_\lambda = 0.26$ betragen. Beschränkt man sich auf die jeweils für einen bestimmten Belag ermittelten λ -Werte, ergeben sich folgende Zahlen:

- Belag A: $\lambda_{\min.} = 1.55$, $\lambda_{\max.} = 2.48$,
 $\lambda_m = 1.86 \pm 0.25$,
- Belag B: $\lambda_{\min.} = 1.48$, $\lambda_{\max.} = 1.78$,
 $\lambda_m = 1.57 \pm 0.11$.

Zusammenfassend ist demnach festzustellen, dass die Abhängigkeit der Standardabweichung der Radlasten σ_F von der Fahrgeschwindigkeit v für Fahrten auf dem Belag A formal mit den theoretischen Ergebnissen von Braun übereinstimmt, dass die Zunahme von σ_F mit steigendem v jedoch im Mittel etwas schwächer ist, als aus der Theorie hervorgeht. Für Fahrten auf dem Belag B liegt diese formale Uebereinstimmung zwischen Theorie und Experiment nicht vor, und die Zunahme von σ_F mit steigendem v ist noch geringer als für den Belag A. Es bleibt darauf hinzuweisen, dass die experimentelle Untersuchung sich auf einen Geschwindigkeitsbereich zwischen $v = 5$ km/h und $v = 70 \dots 80$ km/h beschränkt.

Ob zwischen den während der Phasen V und W gemessenen Radlasten ein wesentlicher Unterschied bestehe, wurde wiederum anhand der charakteristischen Werte $\sigma_F(15)$ und $\sigma_F(60)$ überprüft. Aus den entsprechenden Zahlen, die ebenfalls in Bild 163 zusammengestellt sind, lässt sich kein allgemein gültiger Schluss in der Art "die während der Phasen V beobachteten dynamischen Radlasten sind grösser/kleiner als die für die Phasen W gültigen Werte" ziehen. Das Verhältnis $\epsilon = \sigma_F(W)/\sigma_F(V)$ beträgt im Mittel über alle bestimmten Werte $\epsilon_m = 1.02 \pm 0.056$ für $v = 15$ km/h und $\epsilon_m = 0.95 \pm 0.062$ für $v = 60$ km/h. Unterscheidet man auch hier wieder nach Belagszustand, ergeben sich jedoch folgende Werte:

- Belag A: $\epsilon_m(15) = 0.994 \pm 0.032$,
 $\epsilon_m(60) = 0.956 \pm 0.068$,
- Belag B: $\epsilon_m(15) = 1.090 \pm 0.044$,
 $\epsilon_m(60) = 0.930 \pm 0.044$.

Auch wenn die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte eine tiefergehende statistische Untersuchung (z.B. Signifikanztest) nicht zulässt, darf hier wohl geschlossen werden, dass für Fahrt auf dem Belag A die dynamischen Radlasten für die Phasen V und W praktisch gleich gross sind. Für Fahrt auf dem Belag B sind die bei der Ueberquerung der Brücke auftretenden dynamischen Radlasten (Phase W) bei tiefer Geschwindigkeit etwas grösser, bei hoher Geschwindigkeit aber etwas kleiner als bei Fahrt über eine starre Oberfläche (Phase V).

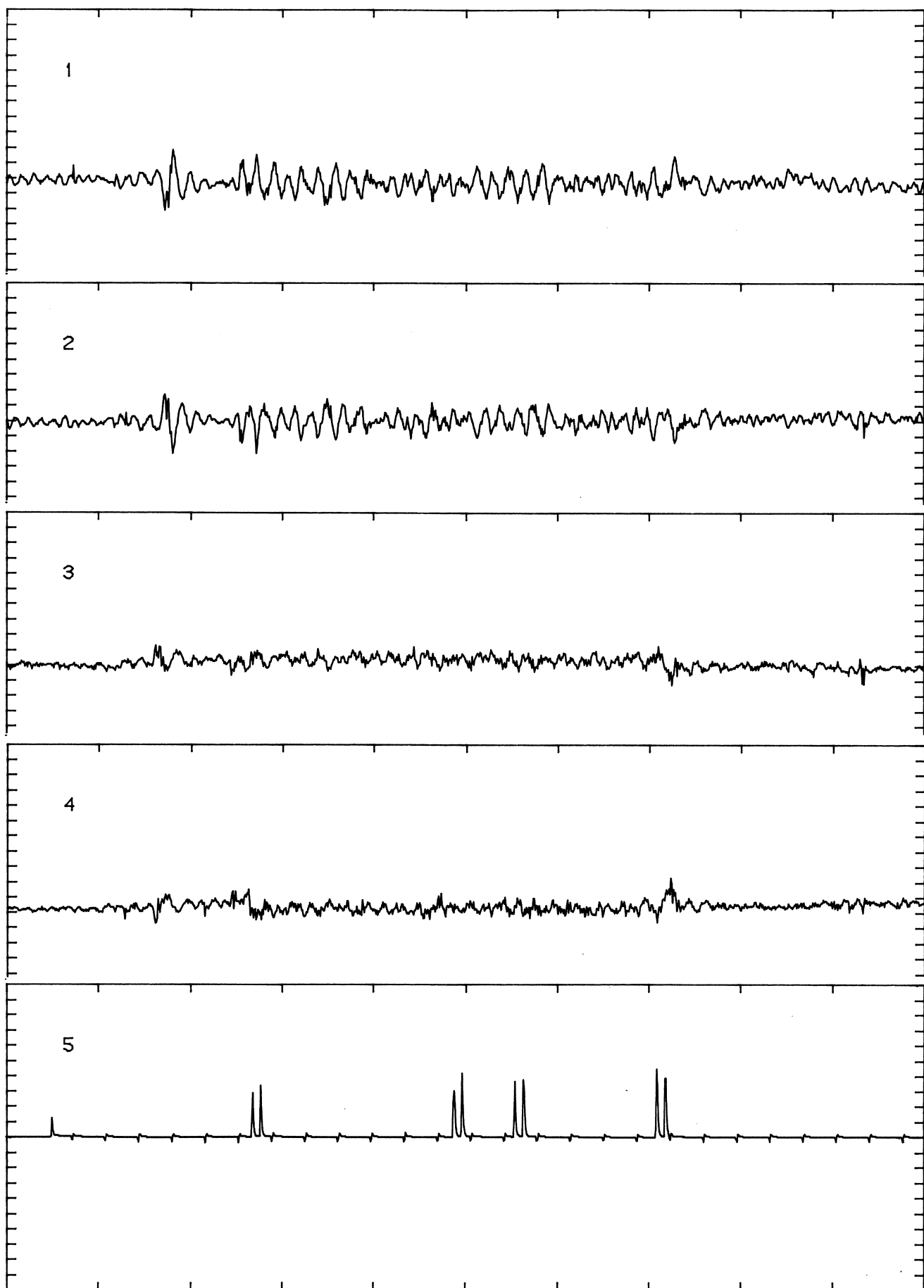


Bild 159: Beispiele von registrierten Radlastsignalen (Optospannungen) für eine Fahrt ohne Brett. Von oben nach unten: K1 bis K4, ganz unten die Signale der Kontaktschwellen. Skalierung horizontal: 2.765 s/div, vertikal: 0.5 V/div.

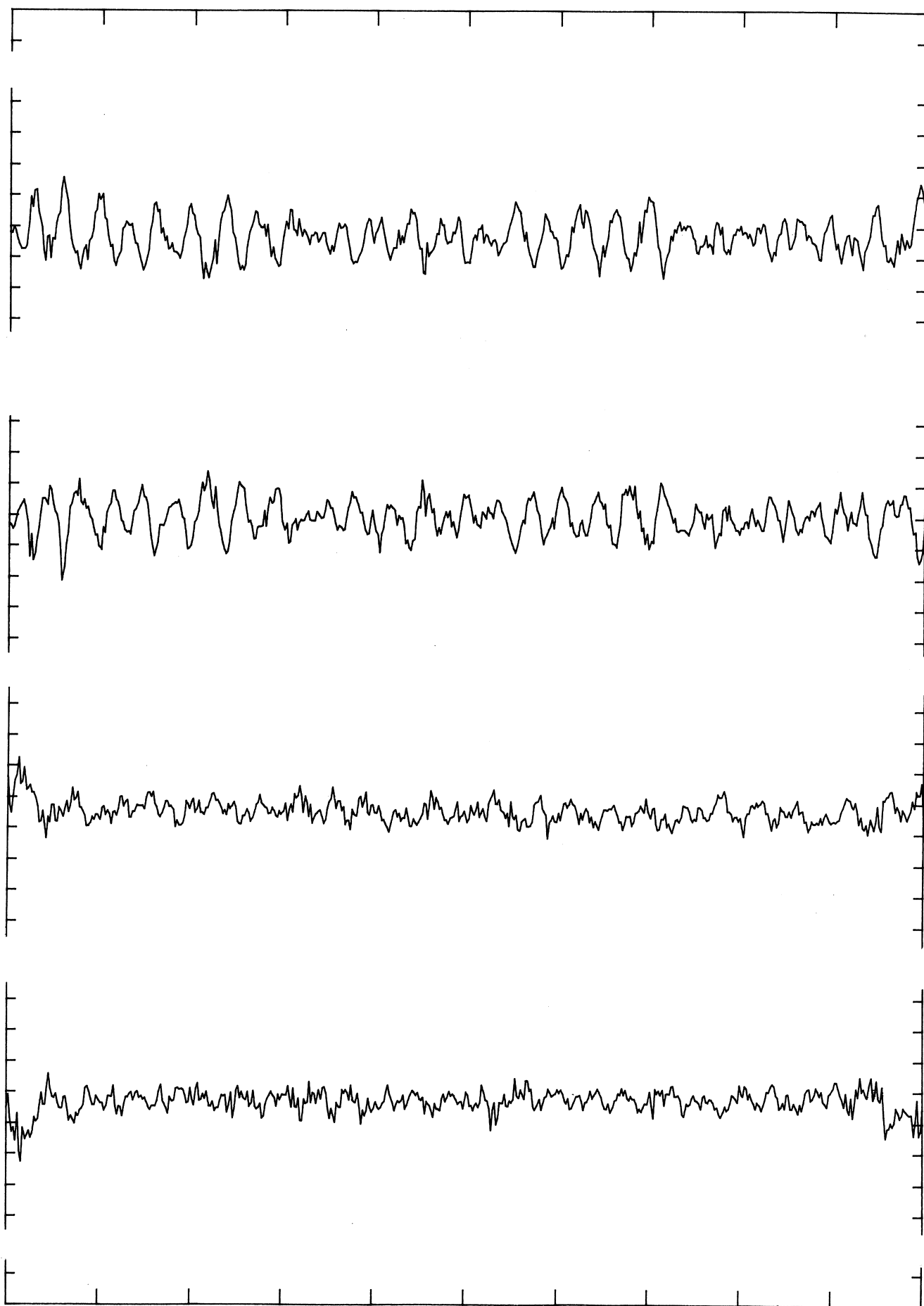


Bild 160: Vergrößerte Ausschnitte aus den Radlastsignalen von Bild 159. Skalierung horizontal: 1.350 s/div, vertikal: 0.5 V/div.

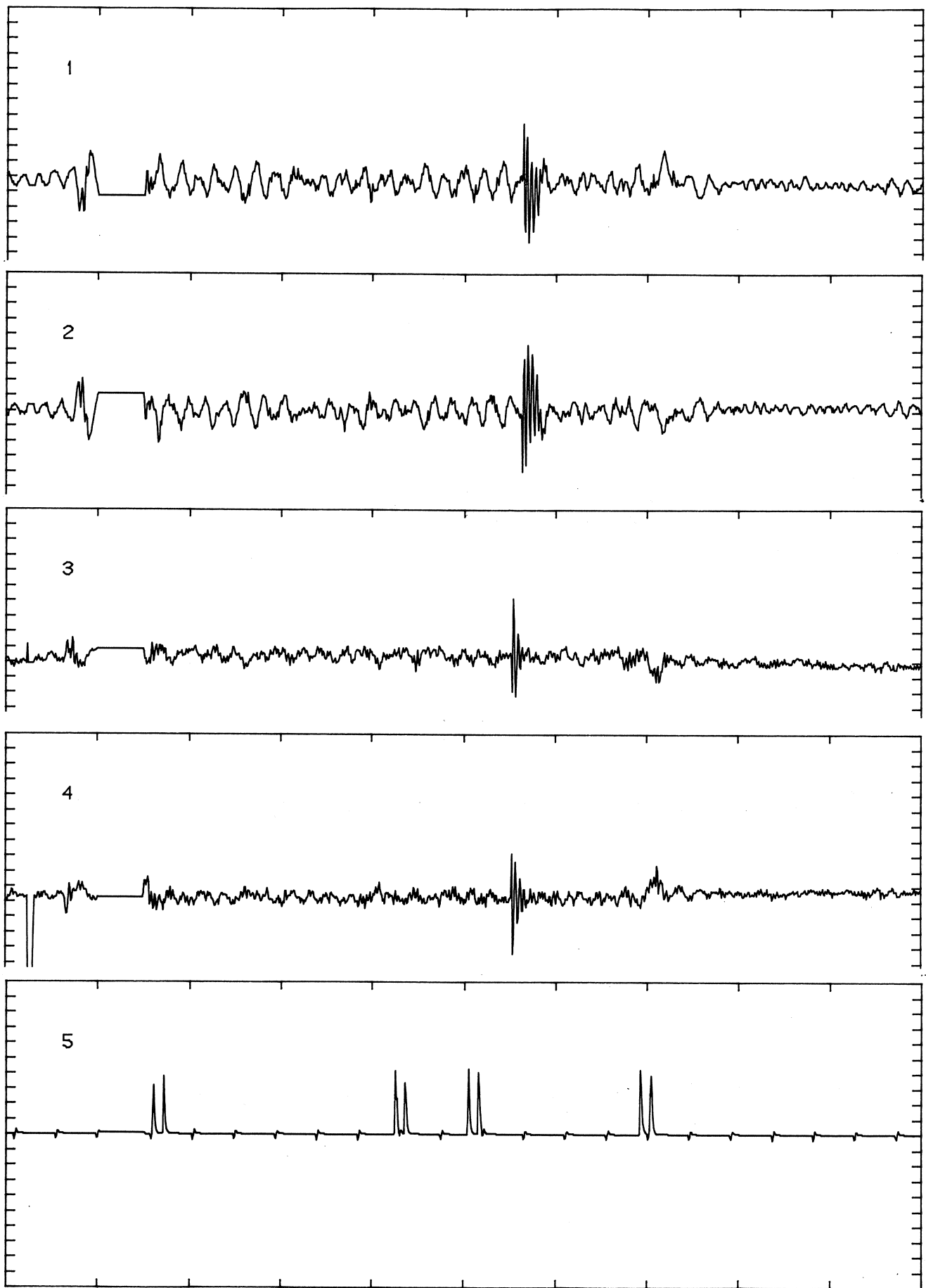


Bild 161: Beispiele von registrierten Radlastsignalen (Optospannungen) für eine Fahrt über das Brett.
 Von oben nach unten: K1 bis K4, ganz unten die Signale der Kontaktschwellen. Skalierung
 horizontal: 2.212 s/div, vertikal: 0.5 V/div.

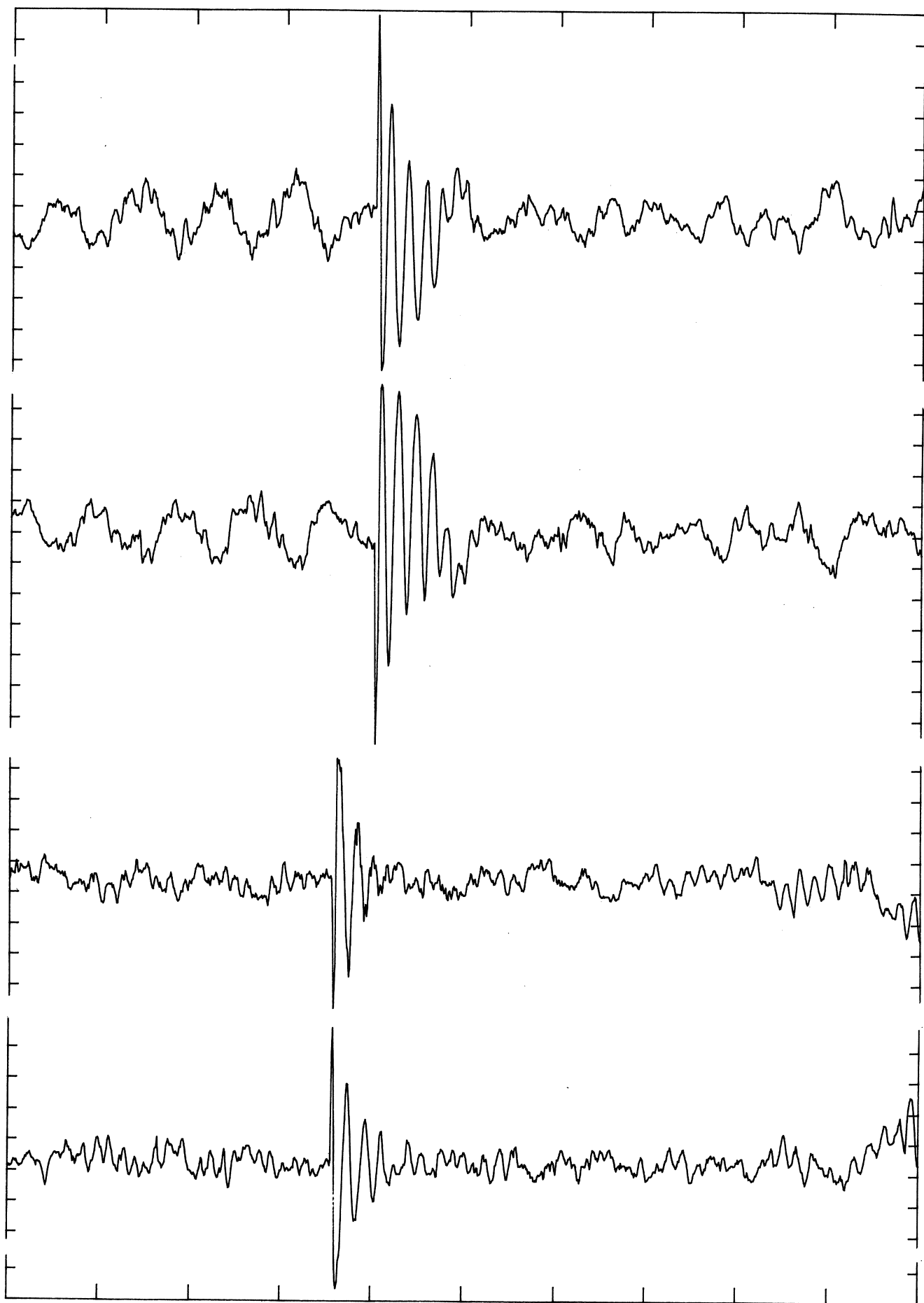


Bild 162: Vergrößerte Ausschnitte aus den Radlastsignalen von Bild 161. Skalierung horizontal: 0.553 s/div, vertikal: 0.5 V/div.

Fahrzeug F_{stat} [kN]	Belag	Phase	σ_{15} [kN]	σ_{60} [kN]	v_{15} [%]	v_{60} [%]	$\frac{\sigma_{60}}{\sigma_{15}}$	$\frac{\sigma_{15}(W)}{\sigma_{15}(V)}$	$\frac{\sigma_{60}(W)}{\sigma_{60}(V)}$	$\frac{\sigma_{15}(i)}{\sigma_{15}(10)}$	$\frac{\sigma_{60}(i)}{\sigma_{60}(10)}$
11R10V 29.20	A	V W	2.20 2.09	3.83 3.92	7.5 7.2	13.1 13.4	1.74 1.88	0.95	1.02	1.0	1.0
11R10H 53.85	A	V W	4.25 4.17	7.52 7.18	7.9 7.7	14.0 13.3	1.77 1.72	0.98	0.95	1.0	1.0
11R8V 29.20	A	V W	2.04 1.98	3.90 3.84	7.0 6.8	13.4 13.2	1.91 1.94	0.97	0.98	0.93 0.95	1.02 0.98
11R8H 53.85	A	V W	3.89 3.93	7.93 7.11	7.2 7.3	14.7 13.2	2.04 1.81	1.01	0.90	0.92 0.94	1.05 0.99
11R6V 29.20	A	V W	1.89 1.87	3.65 3.57	6.5 6.4	12.5 12.2	1.93 1.91	0.99	0.98	0.86 0.89	0.95 0.91
11R6H 53.85	A	V W	3.67 3.71	7.12 6.57	6.8 6.9	13.2 12.2	1.94 1.77	1.01	0.92	0.86 0.89	0.95 0.92
12R10V 22.10	A	V W	1.83 1.75	3.36 3.25	8.3 7.9	15.2 14.7	1.84 1.86	0.96	0.97	$\frac{\sigma_{15}(B)}{\sigma_{15}(A)}$ 0.70 0.81 0.74 0.80	$\frac{\sigma_{60}(B)}{\sigma_{60}(A)}$ 0.68 0.61 0.64 0.65
12R10H 60.20	A	V W	4.27 4.26	7.45 6.56	7.1 7.1	12.4 10.9	1.74 1.54	1.00	0.88		
12R10V 21.80	B	V W	1.28 1.42	2.28 1.97	5.9 6.5	10.5 9.0	1.78 1.39	1.11	0.86		
12R10H 60.70	B	V W	3.17 3.42	4.78 4.25	5.2 5.6	7.9 7.0	1.51 1.24	1.08	0.89		
13R10V 22.00	A	V W	2.14 2.07	3.31 3.39	9.7 9.4	15.0 15.4	1.55 1.64	0.97	1.02		
13R10H 61.45	A	V W	4.66 4.50	7.40 7.27	7.6 7.3	12.0 11.8	1.59 1.62	0.97	0.98		
13R10V 22.05	B	V W	1.46 1.66	2.23 2.13	6.6 7.5	10.1 9.7	1.53 1.28	1.14	0.96	0.68 0.80	0.67 0.63
13R10H 61.35	B	V W	3.07 3.35	4.88 4.67	5.0 5.5	8.0 7.6	1.59 1.39	1.09	0.96	0.66 0.74	0.66 0.64
14R10V 25.30	A	V W	2.07 2.00	3.38 3.45	8.2 7.9	13.4 13.6	1.63 1.73	0.97	1.02	0.72 0.83 0.74 0.76	0.67 0.63 0.55 0.55
14R10H 54.80	A	V W	4.93 4.86	9.85 9.41	9.0 8.9	18.0 16.2	2.00 1.94	0.99	0.96		
14R10V 25.30	B	V W	1.49 1.66	2.28 2.17	5.9 6.6	9.0 8.6	1.53 1.31	1.11	0.95		
14R10H 54.80	B	V W	3.64 3.69	5.37 5.16	6.6 6.7	9.8 9.4	1.48 1.40	1.01	0.96		
42R10VV 22.00	A	V W	2.22 2.24	3.54 3.82	10.1 10.2	16.1 17.4	1.59 1.71	1.01	1.08		
42R10VH 61.45	A	V W	4.48 4.55	7.72 7.44	7.3 7.4	12.6 12.1	1.72 1.64	1.02	0.96		
42R10HV 29.60	A	V W	2.18 2.36	5.41 4.72	7.4 8.0	18.3 15.9	2.48 2.00	1.08	0.87	1.02	0.81
42R10HH 32.05	A	V W	2.42 2.47	5.49 4.44	7.6 7.7	17.1 13.9	2.27 1.80	1.02	0.81		

Bild 163: Resultate der Auswertung der Radlastsignale im Zeitbereich.

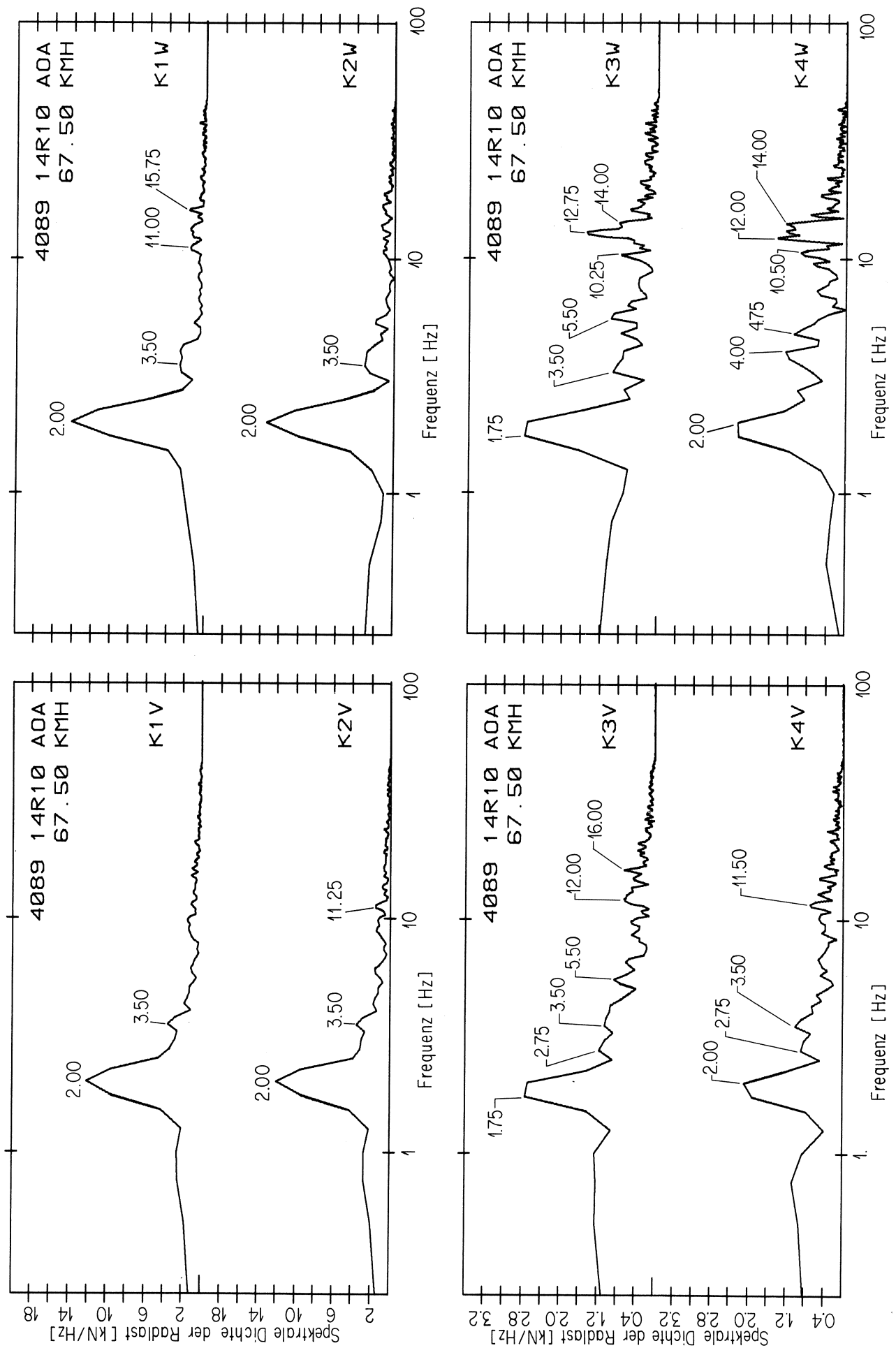


Bild 164: Beispiele von RSD-Frequenzspektren dynamischer Radlasten (Zeitsignale s. Bild 159).

Anhand der für das Fahrzeug 11R gefundenen Resultate kann der Einfluss des Reifendruckes auf die dynamischen Radlasten untersucht werden. Bild 163 gibt die entsprechenden Zahlenwerte für die Geschwindigkeiten $v = 15 \text{ km/h}$ und $v = 60 \text{ km/h}$. Die grafischen Darstellungen der kompletten $\sigma_F(v)$ -Funktionen für die Phase V (Anhang A2.12) zeigen, dass die Radlasten für einen Druck von 6 bar im allgemeinen kleiner sind als für höhere Reifendrücke. Beim Vergleich 8 bar/10 bar muss wiederum zwischen höheren und tieferen Geschwindigkeiten unterschieden werden, wobei die Grenze bei $v = 30 \dots 40 \text{ km/h}$ liegt: Während für tiefe Geschwindigkeiten ein höherer Reifendruck auch zu höheren Radlastamplituden führt, gilt für hohe Geschwindigkeiten das Gegenteil. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass für Fahrt über die Brücke (Phase W, Anhang A2.13) die dynamischen Radlasten im allgemeinen mit steigendem Reifendruck zunehmen. Wie schon beim Vergleich "Phasen V/W" ist jedoch auch hier keine einfache Gesetzmässigkeit festzustellen.

Der Einfluss der Ebenheit der Fahrbahnoberfläche auf die Radlastamplituden kann zahlenmässig wiederum anhand des Vergleiches der charakteristischen Werte $\sigma_F(15)$ und $\sigma_F(60)$ dem Bild 163 entnommen werden. Die $\sigma_F(v)$ -Funktionen für die Phase V und die drei vergleichbaren Zweiachser mit einem Reifendruck von 10 bar sind für die Vorderachsen im Anhang A2.14, für die Hinterachsen im Anhang A2.15 grafisch dargestellt. Für die Vorderachsen aller drei Fahrzeuge und die Hinterachsen der Fahrzeuge 12R10 und 13R10 ergibt sich ein qualitativ praktisch identisches Bild: Die dynamischen Radlasten sind in jedem untersuchten Fall für den Belag B kleiner als für den Belag A. Der Unterschied ist am grössten für $v = 40 \dots 50 \text{ km/h}$ und nimmt auf beiden Seiten des Geschwindigkeitsspektrums ab. $\sigma_F(60)$ beträgt für den Belag B noch 64...68% des für den Belag A gültigen Wertes. Aus der Reihe tanzt dagegen die Hinterachse des Fahrzeuges 14R10, deren dynamische Radlasten für den Belag A im untersuchten Bereich von $v = 5 \dots 74 \text{ km/h}$ praktisch linear mit der Geschwindigkeit ansteigen, so dass der Unterschied zu den Werten für den Belag B mit steigender Geschwindigkeit ebenfalls zunimmt. $\sigma_F(60)$ für den Belag B beträgt hier nur 55% des für den Belag A gültigen Wertes.

Abschliessend sollen nun noch die für den Belag A, einen Reifendruck von 10 bar und die Phase V gültigen Radlastamplituden der

vier untersuchten Zweiachser einander gegenüber gestellt werden (Anhang A2.16). Bei den Vorderachsen fällt das Fahrzeug 11R auf, indem es spürbar grössere dynamische Radlasten erzeugt als die anderen, mehr oder weniger gleichwertigen Fahrzeuge. Bei den Hinterachsen gilt das gleiche für das Fahrzeug 14R. Die aussergewöhnliche qualitative Abhängigkeit dieser dynamischen Radlasten von der Geschwindigkeit ist bereits erwähnt worden.

3.62 Im Frequenzbereich

Die Auswertung der dynamischen Radlastsignale im Frequenzbereich umfasste die Berechnung von Amplitudenspektren und die Bestimmung der Amplituden- und Phasenbeziehungen zwischen den jeweils vier an einem Fahrzeug gemessenen Signalen mittels Berechnung der Transferfunktionen. Infolge des beträchtlichen Zeitaufwandes, den eine solche Auswertung erfordert, erstreckte sie sich lediglich auf Versuchsserien vom Typ Ao, d.h. auf Fahrten in der Achse A und ohne Brett auf der Fahrbahn. Die Auswertung erfolgte getrennt für die Bereiche V und W, d.h. für die Phasen "Fahrzeug auf dem Versuchsbelag vor der Brücke" und "Fahrzeug auf der Brücke".

In Bild 164 sind die Frequenzspektren dargestellt, die aus den im vorangehenden Abschnitt (Bild 159) abgebildeten Zeitsignalen berechnet worden sind. Die Diskussion dieser und der anderen ermittelten Radlastspektren ist Gegenstand eines anderen Berichtes [65].

3.7 Resultate: Die Reaktion der Brücke

3.71 Beispiele von Zeitsignalen und $\phi(v)$ -Funktionen

Bevor auf den zentralen Punkt dieses Abschnittes, die Diskussion des Einflusses einiger Parameter auf die dynamischen Inkremente ϕ bzw. auf die $\phi(v)$ -Funktionen, eingegangen wird, sollen der Zeitverlauf der registrierten Brückensignale sowie der Informationsgehalt der daraus berechneten dynamischen Inkremente an einem Beispiel untersucht werden. Im Anhang 3 sind einerseits die bei vier Fahrten des Fahrzeuges 21R10 auf dem Belag B registrierten Zeitsignale dargestellt (je eine Fahrt in den Achsen A und K, ohne und mit Brett). Andererseits sind für alle Instrumente und die vier kompletten entsprechenden Versuchsserien die

$\phi(v)$ -Funktionen angegeben. Diese Versuchsserien wurden ausgewählt, weil in keinem anderen Fall 23 verschiedene Brückensignale aufgezeichnet worden waren. Bei den üblichen Serien ohne Messung der dynamischen Radlasten wurden maximal 22 Messstellen beobachtet (ohne DMS 40, aber statt eines zwei Kanäle mit Kontaktschwellen-Signalen belegt).

Die Darstellungen der Zeitsignale geben jeweils zuerst einen Ueberblick über den Verlauf aller registrierten Verschiebungen und Dehnungen und anschliessend vergrösserte Ausschnitte von einigen charakteristischen Signalen. Für alle Signale ist der vertikale Massstab in Form des Full-Scale-Bereiches der Darstellung angegeben: ± 1.95 mm bedeutet demnach, dass für dieses Instrument maximal je 1.95 mm von der gestrichelten Nulllinie aus nach oben und nach unten dargestellt werden können, ohne dass der Bereich benachbarter Signale tangiert wird. Bei den vergrösserten Darstellungen ist die Nulllinie nicht angegeben, dafür ist der Full-Scale-Bereich mit Hilfe eines Bildrahmens exakt ersichtlich. Die Masseinheit der Dehnungen ist mit "MD", andernorts auch mit "MI" oder "MIKROD." bezeichnet: Dies bedeutet Mikrodehnungen oder Tausendstel Promille bzw. 10^{-6} . Als Anhaltspunkt: Bei einem Elastizitätsmodul für Stahl von $E = 210 \text{ kN/mm}^2$ entspricht eine Dehnung von $\epsilon = 20 \cdot 10^{-6}$ einer Spannung von $\sigma = 4.2 \text{ N/mm}^2$ bzw. knapp einem Prozent der Fließgrenze eines Betonstahles S 500.

Im allgemeinen wurde darauf geachtet, die Signale so gut wie möglich auszusteuern. Wenn dies bei Dehnungssignalen oft als nicht gelungen erscheint, so ist dies darauf zurückzuführen, dass die Empfindlichkeit der Messverstärker nicht weiter erhöht werden konnte. Es wurde darauf verzichtet, die Aussteuerung künstlich zu verschönern: Bei allen Signalen ist der dargestellte Full-Scale-Bereich mit ± 2048 Stufen digitalisiert worden.

Die Darstellungen geben ebenfalls die Signale der Kontaktschwellen 2, am Anfang der Brücke, 3, zu Beginn des 41-m-Feldes, und 4, am Ende der Brücke, wieder. Diese wurden, zusammen mit einem Sekundentakt, auf einem separaten Messkanal aufgezeichnet. Dadurch können die registrierten Brückensignale und die Position des Versuchsfahrzeuges jederzeit in Zusammenhang gebracht werden.

Das dynamische Inkrement, im folgenden abgekürzt auch mit DI bezeichnet, wurde für alle Signale nach der folgenden Formel berechnet:

$$\phi = DI = \frac{(A_{\text{dyn}} - A_{\text{stat}})}{A_{\text{stat}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Dabei sind A_{stat} der mittlere statische Vergleichswert und A_{dyn} der Extremwert des Signals, der unter dynamischer Beanspruchung, aber sonst gleichen Randbedingungen festgestellt wurde (s. auch Abschnitt 3.52, "Auswertemethoden im Zeitbereich"). Die Auswertung mit einem Computer lieferte in jedem Fall die dynamischen Inkremente sowohl für den grössten positiven als auch den grössten negativen Signalwert. Die Diskussion beschränkt sich im allgemeinen auf die für den absolut grössten statischen Vergleichswert A_{stat} ermittelten DI. Ausnahmen von dieser Regel werden im folgenden diskutiert, wobei dann die verwendeten Abkürzungen mit einem Vorzeichen ergänzt werden: DI+, DI-, A_{stat} +, A_{stat} - und für Instrumente zum Beispiel WG 01+, WG 01-.

Die $\phi(v)$ -Funktionen, im Anhang 3 jeweils direkt anschliessend an die zugehörigen Zeitsignale dargestellt, geben nicht nur den Verlauf der DI über die Fahrgeschwindigkeit, sondern auch die statischen Vergleichswerte und den Grösstwert des dynamischen Inkrementes. Diese wichtigen Werte können damit direkt zahlenmässig verglichen werden. Aus technischen Gründen ist der Grösstwert des DI in den Darstellungen mit "PHI MAX" bezeichnet. Die $\phi(v)$ -Funktionen beginnen jeweils bei den Werten für die quasistatischen Versuche. Die zugehörigen DI sind dabei durch Mittelwertbildung auf den Wert $\phi = 0$ zentriert worden, so dass die Streuung der Ergebnisse für die verschiedenen quasistatischen Versuche ersichtlich ist.

Im folgenden wird auf die Bedeutung der Messsignale und der daraus ermittelten dynamischen Inkremente eingegangen. Die wichtigsten Messstellen sind WG 82/84, 02/04 und 22/24. Diese an den Kastenstegen angebrachten Wegaufnehmer erfassten das globale Längsbiege- und Torsionsverhalten des Ueberbaus in den Schnitten 8, 0 (= 12) und 2, d.h. in der Mitte des 32-m-, des 41-m- und des 37-m-Feldes. Ebenso liefern WG 112 und WG 102 Informationen über das globale Verhalten in einem Viertelpunkt und am Ende des 41-m-Feldes (Schnitte 11 und 10). Die am Konsolkopf angebrachten Messinstrumente WG 01/05, 111 und 101 erlauben in den drei betroffenen Messschnitten des 41-m-Feldes einen Vergleich zwischen den Reaktionen am Hauptträger und am Konsolkopf.

Für alle diese Durchbiegungssignale sind die dynamischen Inkremente für die grösste Einsenkung massgebend, da diese hier auch der absolut grössten Verschiebung der Brücke im jeweiligen Messpunkt in vertikaler Richtung entspricht. Da die entsprechenden Signalspannungen negativ sind (die Ausschläge weisen dann nach unten), sind die Angaben in den später diskutierten Tabellen (Anhang 4) unter WG 82- usw. bis WG 24- aufgeführt. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden hier für alle Wegaufnehmer auch die DI+ für die grösste Hebung angegeben (Anhang 3). Naturgemäss tritt diese grösste Hebung dann auf, wenn sich das Versuchsfahrzeug in einem dem Messfeld benachbarten Feld befindet.

Die Dehnungssignale sind für Messstellen an der Quer- und an der Längsbewehrung recht unterschiedlich und nicht immer einfach zu interpretieren. Während die Durchbiegungssignale nur die Wirkung des Fahrzeuges als eine einzelne Punktmasse auf das globale und allenfalls auf das lokale (Querbiege-) Verhalten des Ueberbaus reflektieren, muss hier zwischen drei verschiedenen, sich überlagernden Wirkungen unterschieden werden:

- WA: Fahrzeug als einzelne Punktmasse, Ueberbau global,
- WB: Fahrzeug als einzelne Punktmasse, Fahrbahnplatte global,
- WE: Fahrzeug als (hier) sechs Einzelmassen, lokale Längs- und Querbiegung der Fahrbahnplatte unter den einzelnen Rädern.

Querdehnungen der Fahrbahnplattenbewehrung zwischen den Stegen werden praktisch nur von WB beeinflusst (DMS 32/42, 31/41, 40). Querdehnungen der oberen Bewehrung der Fahrbahnplatte im Einspannquerschnitt der Konsole zeigen neben WB auch gewisse Einflüsse von WA (DMS 22, 21, 20). Von Querdehnungssignalen werden nur die DI+ für den maximalen positiven Ausschlag diskutiert (DMS 20+ bis DMS 42+). Die einzige Ausnahme betrifft DMS 40, eine Messtelle, die nur für die Serien 21R10 auf dem Belag B beobachtet wurde (s. weiter hinten).

Längsdehnungen der unteren Bewehrung der Fahrbahnplatte zwischen den Stegen, und dies wird sich als unerwartetes Problem bei der Interpretation der dynamischen Inkremente erweisen, werden von allen drei Wirkungen in vergleichbar starkem Mass beeinflusst. Von Längsdehnungen werden in der Folge die DI sowohl für den negativen als auch für den

positiven maximalen Ausschlag angegeben (DMS 50-, DMS 50+ usw.).

Im folgenden wird auf einige Details eingegangen, die sich aus der Lage der Fahrachse und der Lage des Brettes auf der Fahrbahn ergeben.

- a) Fahrachse A, ohne Brett (Versuch Nr. 5335, 21R10AoB, $v = 33.20 \text{ km/h}$)
- a1) Anhang A3.1 bis A3.8, 12 Durchbiegungen

Bei zentrischer Fahrt über die Brücke sollten die WG 82/84, 02/04 und 22/24 jeweils paarweise identische Resultate liefern; denn es kann erwartet werden, dass die Brücke zwar zu Biege-, nicht aber zu Torsionsschwingungen angeregt wird. Dass dies der Fall ist, zeigt bereits ein Vergleich der Zeitsignale (A3.1), aber auch die $\phi(v)$ -Funktionen für die grössten Einsenkungen verlaufen zwar für jedes Messfeld signifikant anders, für die beiden Messpunkte eines Feldes aber sehr ähnlich (A3.3 und 4). Etwas Überraschend ist festzustellen, dass die grösste Durchbiegung der Brücke unter quasistatischer Last nicht im 41-m-Feld, sondern im 37-m-Feld auftritt. Die einseitige Einspannung des 41-m-Feldes in das 32-m-Feld und in die kurze Stütze scheint doch recht starr zu sein.

Für den Messschnitt 0 kann auch bestätigt werden, dass zwischen dem Verhalten am Steg und an den Konsolen keine wesentlichen Unterschiede festzustellen sind.

Das 32-m-Feld, WG 82/84, fällt durch relativ geringe dynamische Amplituden und entsprechend kleine DI- auf.

In den beiden zusätzlichen Messschnitten im 41-m-Feld ist der Zeitverlauf der Durchbiegungen ähnlich wie in der Mitte dieses Feldes. Das gleiche gilt für die $\phi(v)$ -Funktionen, mit der Einschränkung, dass die Konsolmessstellen WG 101 und 102 für $v > 50 \text{ km/h}$ eine zusätzliche, markante Zunahme der DI aufweisen (A3.5). Es ist zu vermuten, dass hier Querbiegeschwingungen ihren Einfluss ausüben.

Für den grössten positiven Signalwert liegen die Verhältnisse, verglichen mit jenen für den negativen Wert, wie folgt: Der statische Vergleichswert beläuft sich auf 37% bis 38% für die acht Messstellen in den drei Feldmitten und auf rund 50% für die vier anderen Punkte. Der Maximalwert des dynami-

schen Inkrementes $DI+$ liegt zwischen zweimal (WG 22/24) und viermal (WG 01/05) höher als jener des $DI-$. Die Konsequenzen dieses Phänomens, das offenbar nicht allgemein gültig ist [66], können hier nicht im Detail diskutiert werden.

a2) Anhang A3.9 bis A3.15, 11 Dehnungen

Die Querdehnungen in den Schnitten 12 und 11, DMS 32/42 und DMS 31/41, liefern problemlose Zeitsignale: Die Durchfahrt des Fahrzeuges erzeugt einen einfachen Ausschlag auf die (positive) Zug-Seite (WB). Die Vergrößerungen zeigen, dass die Einflüsse WA und WE schwach erkennbar sind (A3.10). Die Signale sind allgemein klein; es fällt auf, dass DMS 41 einen wesentlich grösseren Wert erreicht als DMS 42. Die Querdehnung DMS 40 im Schnitt 10 liefert ein schwaches und schwer interpretierbares Signal: Die untere Bewehrung der Fahrbahnplatte in der Mitte zwischen den Stegen (in Stütznähe) gerät zuerst in den Zug-, dann aber auch in den Druckbereich. Im Einspannquerschnitt der Konsole, DMS 22/21/20, fallen bei zentrischer Fahrt (verglichen mit exzentrischer Fahrt) relativ schwache Signale an. Die entsprechenden Messergebnisse werden hier zwar noch mitgeführt, später aber nicht mehr behandelt.

Für Dehnungen im allgemeinen, insbesondere aber für Querdehnungen mit vergleichsweise kleinen A_{stat} -Werten, streuen die DI wesentlich stärker als für Durchbiegungen und erreichen auch oft negative Werte. Dies dürfte auf die hohe Empfindlichkeit dieser Dehnungen auf die effektive Lage des Fahrzeuges im Brückenquerschnitt zurückzuführen sein. Diese Lage ist trotz aller Gegenmassnahmen gewissen Streuungen ausgesetzt, die den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit bzw. der damit korrelierten Parameter auf das DI teilweise vollständig überdecken.

Die Längsdehnungen der Fahrbahnplatte in den Schnitten 12, 11 und 10 (DMS 52/51/50) ergeben untereinander vergleichbare Signale: Eine Wirkung des Fahrzeuges ist bereits festzustellen, wenn sich dieses in den Randfeldern befindet (WA). Die Annäherung an den Messquerschnitt erzeugt einen klaren Ausschlag auf die Druckseite (WB). Die Fahrt über die Messstelle selbst führt zu zwei deutlichen Zug-Spitzen, wobei die zweite entsprechend der Wirkung der beim Fahrzeug 21R vorhandenen Doppelachse bei DMS 52/51 deutlich erkennbar zweigipflig ist (WE).

Der Grund für die oben angedeuteten Probleme mit der Aussagekraft der auf übliche Art und Weise berechneten dynamischen Inkremente ist aus der Aufzeichnung für DMS 52 und den zugehörigen $\phi(v)$ -Funktionen ersichtlich: Der positive statische Vergleichswert A_{stat+} ist (besonders für kurze, schwere Fahrzeuge) fast gleich Null, weil sich die Wirkungen WA, WB und WE für den quasistatischen Fall praktisch aufheben. Sobald die Wirkung WE und damit der positive Spitzenwert stärker als die beiden anderen Wirkungen zunimmt, werden grosse dynamische Inkremente erreicht, die die dynamische Wirkung des Fahrzeuges nicht korrekt wiedergeben. Dieses Problem, das sich in besonders ausgeprägtem Mass bei DMS 52 zeigt, wird später zu diskutieren sein. Es scheint jedoch klar, dass das übliche Verfahren zur Bestimmung der DI auf solch komplexe Signale, wie sie die Längsdehnungen liefern (Anhang A3.10), nicht ohne Modifikation angewandt werden sollte.

- b) Fahrachse K, ohne Brett (Versuch Nr. 5210, 21R10KoB, $v = 35.34$ km/h)
- b1) Anhang A3.16 bis A3.28, 12 Durchbiegungen

Bei exzentrischer Fahrt über die Brücke verdreht sich der Ueberbau, so dass die quasistatische Brückenreaktion über den Querschnitt nicht konstant ist. Abgesehen vom Auftreten einer Oberschwingung der Brücke während der Fahrt über das 37-m-Feld ist der Signalverlauf ähnlich wie für die zentrische Fahrt.

Für die sowohl am Kastensteg als auch im Bereich des Fahrzeuges angeordneten Messstellen WG 82, 02, 112, 102 und 22 werden nicht nur grössere quasistatische Werte, sondern auch grössere $DI-$ als für zentrische Fahrten erreicht. Für alle diese Messstellen und, was natürlich den Erwartungen entspricht, auch für die Konsolmessstellen WG 01, 111 und 101, ist demnach die Fahrt in der Achse K gegenüber der Fahrt in der Achse A massgebend. Es wird sich jedoch zeigen, dass dies nicht allgemein gilt.

Die positiven A_{stat} -Werte der Durchbiegungen sind wesentlich gleichmässiger über den Brückenquerschnitt verteilt als die negativen. Meist ist A_{stat+} kleiner und $DI+$ grösser als für Fahrt in der Achse A. Bei WG 101 führt dieser Trend zur extremen Situation, dass A_{stat+} fast gleich Null ist und $DI+$ deshalb ausserordentlich grosse Werte annimmt.

b2) Anhang A3.24 bis A3.28, 11 Dehnungen

Die Dehnungen im Einspannquerschnitt der Konsole werden offensichtlich von der Wirkung WB dominiert, und ihre Zeitsignale sind deshalb einfacher Natur. Die Vergrößerungen zeigen einen geringfügigen Einfluss der Wirkungen WA und WE, der von der Feldmitte (DMS 22) gegen die Stütze hin (DMS 20) abnimmt. A_{stat+} ist für alle drei Messstellen praktisch gleich gross.

Die Querdehnungen der Fahrbahnplatte zwischen den Stegen liefern erwartungsgemäss nur sehr schwache Signale, die im folgenden nicht weiter behandelt werden (DMS 32, 42, 31, 41, 40).

Die Zeitsignale der Längsdehnungen DMS 52 bis DMS 50 zeigen sehr schön die Folgen des Ausbleibens der Wirkung WE: Da die eigentliche Messstelle bei exzentrischer Fahrt nicht direkt belastet wird, sind auch die von den einzelnen Rädern erzeugten scharfen Zugspitzen verschwunden. Auf den Wert A_{stat+} von DMS 52 sei speziell hingewiesen: Er ist praktisch gleich wie für zentrische Fahrt, obschon dies für den Verlauf des Zeitsignals ganz und gar nicht zutrifft. Im übrigen ist für DMS 50 im Gegensatz zur zentrischen Fahrt A_{stat+} jetzt grösser als A_{stat-} .

c) Fahrachse A, mit Brett (Versuch Nr. 5122, 21R10AmB, $v = 11.82$ km/h)

c1) Anhang A3.29 bis A3.36, 12 Durchbiegungen

Grundsätzlich sollten hier nur die Ergebnisse der im Brettschnitt 0 (= 12) angeordneten Instrumente diskutiert werden (WG 01/02/04/05). Anhang A3.30 zeigt jedoch, dass die Untersuchung der in den Schnitten 11 und 10, d.h. ebenfalls im Feld mit dem Brett, ermittelten Signale als durchaus sinnvoll erscheint (WG 111/112/101/102). Der Verlauf der $\phi(v)$ -Funktionen und die maximalen DI - sind für alle Messstellen im 41-m-Feld praktisch gleich.

Für die in den Nachbarfeldern angeordneten Aufnehmer, WG 82/84 und WG 22/24, kommt die Wirkung des Brettes im Moment der grössten Hebung. Die Ausschläge in den negativen Bereich erreichen dabei aber ungefähr den Wert, der beim Befahren des Messfeldes ohne Brett auftritt. Rein vom DI - her betrachtet, ergibt sich für diese Messstellen kein wesentlicher Unterschied zu den Fahrten ohne Brett.

Bezüglich der auf A_{stat+} bezogenen DI gilt das Umgekehrte: Für Messstellen im Brettschnitt sind die Auswirkungen des Brettes viel geringer als für jene in den Nachbarfeldern, wo ja die Brettwirkung jetzt voll zum Tragen kommt.

c2) Anhang A3.37 bis A3.43, 11 Dehnungen

Die Wirkung des Brettes beschränkt sich hier im wesentlichen auf den Brettschnitt (DMS 32/42/52, DMS 22; A3.37). Dass andere Querdehnungen von der Brettwirkung praktisch nicht berührt werden, erscheint verständlich; denn der Einfluss des Brettes auf die Wirkung WB klingt mit der Distanz vom Brett rasch ab (DMS 31/41, 40, 21/20). Etwas Überraschend ist der Bretteinfluss auch für die Längsdehnungen ausserhalb des Brettschnittes nicht mehr massgebend (DMS 51, 50): Daraus ist zu schliessen, dass hier die Wirkungen WB und vor allem WE gegenüber WA dominieren. Die Interpretation der für eine bestimmte, hier relativ geringe, Fahrgeschwindigkeit gültigen Verhältnisse kann zuweilen nur die halbe Wahrheit liefern: Wie ein Blick auf die entsprechenden $\phi(v)$ -Funktionen (A3.41 und 42) zeigt, geraten die Schnitte 11 und 10 für Geschwindigkeiten $v > 50$ km/h ebenfalls in den Wirkungsbereich der vom Brett ausgelösten dynamischen Radlasten. Die Wirkung WB wird dabei zwar nicht zeitlich, aber räumlich ausgedehnt.

Da die dynamischen Inkremente relativ schwach streuen, geben die $\phi(v)$ -Funktionen für die Messstellen im Brettschnitt den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit eindeutiger wieder als für Fahrt ohne Brett.

Das grösste DI + für DMS 52 erreicht einen beinahe astronomischen Wert.

d) Fahrachse K, mit Brett (Versuch Nr. 5252, 21R10KMB, $v = 12.73$ km/h)

d1) Anhang A3.44 bis A3.51, 12 Durchbiegungen

Betreffend die Zeitsignale ist hier als einziger Unterschied zur zentrischen Fahrt über das Brett anzuführen, dass nicht mehr alle im Brett-Feld angeordneten Instrumente massgebende Werte liefern. Dies trifft in besonderem Mass für WG 101 zu, wo eine Verschiebung des Brettes in den Schnitt 10 mit Sicherheit wesentlich höhere DI - zur Folge hätte (A3.45).

Die Frage, ob für die sowohl am Kastensteg als auch im Einflussbereich des Fahrzeuges und im Brett-Feld angeordneten WG 02, 112 und 102 wie für Fahrt ohne Brett die Achse K gegenüber der Achse A massgebend sei, lässt sich nicht mehr ohne rechnerische Ueberprüfung beantworten; denn die Werte A_{stat} sind zwar für die Achse K grösser, nicht aber die dynamischen Inkremente. Es zeigt sich, dass die Vermutung nicht nur für die erwähnten WG, sondern auch für die Konsolmessstellen WG 01, 111 und 101 zutrifft.

d2) Anhang A3.52 bis A3.56, 11 Dehnungen

Von den Querdehnungen sind hier lediglich DMS 22 und, wiederum für Geschwindigkeiten $v > 50$ km/h, auch DMS 21 (nicht aber DMS 20) von der Wirkung des Brettes massgebend betroffen. Die anderen Querdehnungen zeigen eine gegenüber der Fahrt ohne Brett nur unwesentlich stärkere Reaktion.

Bezüglich der Längsdehnungen, die hier bei der exzentrischen Fahrt der lokalen Wirkung der Räder nicht ausgesetzt sind, ist festzustellen, dass der Bretteinfluss für DMS 52/51 gut spürbar, für DMS 50 aber vernachlässigbar ist.

Diese generellen Betrachtungen, angestellt anhand einiger "repräsentativer" Zeitsignale und $\phi(v)$ -Funktionen, sollen als illustrative Basis für die folgenden Abschnitte dienen, wo auf diese Zusammenhänge nicht mehr im Detail eingegangen werden kann. Es ging darum zu zeigen, dass ein dynamisches Inkrement eine Zahl ist, die, allein für sich stehend, wenig Aussagekraft hat. Damit ihre Bedeutung richtig eingeschätzt werden kann, sind zusätzliche Informationen erforderlich, zum Beispiel über Art und Lage des Messinstrumentes, Lage der Fahrachse in bezug auf die Messstelle, Zustand der Fahrbahnoberfläche, Fahrgeschwindigkeit und nicht zuletzt auch über die absolute und die relative Grösse des statischen Vergleichswertes.

3.72 Die Maximalwerte der dynamischen Inkremente in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp

a) Allgemeines

Die grössten dynamischen Inkremente (DI), die zugehörige Fahrgeschwindigkeit und die statischen Vergleichswerte sind für jede

durchgeführte Versuchsserie, alle Messinstrumente und allenfalls für beide Signalvorzeichen im Anhang 4 tabellarisch zusammengestellt. Die Tabellen geben ebenfalls pro Messpunkt das jeweils absolut grösste DI für Fahrt ohne und mit Brett an sowie das zugehörige Fahrzeug, seine Konfiguration und die kritische Geschwindigkeit.

Wo die Tabellen nicht vollständig sind, wurden entweder entsprechende Versuche nicht durchgeführt, oder das betreffende Messsignal konnte nicht aufgezeichnet werden, weil die notwendige Kapazität fehlte. Falls technische Probleme für das Fehlen von Resultaten verantwortlich sind, ist dies in den Tabellen angegeben. Hier ist auf eine einzige wesentliche Störung hinzuweisen. Neben der Instabilität der ADC der PCM-Anlage, die jedoch nachträglich korrigiert werden konnte, zeigte sich bei dieser Anlage ein weiterer Fehler: Zwischen den Kanälen 13 und 14 trat ein sogenanntes Uebersprechen auf, d.h. auf Kanal 14 wurden bis auf einen gewissen DC-Offset die gleichen Signale aufgezeichnet wie auf Kanal 13, wobei die effektive Information des Kanals 14 verloren ging. Unglücklicherweise betraf diese Erscheinung zwei Kanäle von sekundärer Wichtigkeit, die zwar periodisch am KO, nicht aber mit Hilfe des Papierschreibers kontinuierlich und gleichzeitig überwacht wurden. So wurde der Fehler erst nach relativ langer Zeit und nur durch Zufall entdeckt: Dem zuständigen Messtechniker war aufgefallen, dass die optische Uebersteuerungsanzeige immer für die beiden Kanäle gleichzeitig ansprach, obschon dazu eigentlich kein Grund bestand.

Der Anhang 4 ist wie folgt aufgebaut: Zunächst werden die Wegaufnehmer (WG), dann die Dehnungsmessstreifen (DMS) behandelt. Die Reihenfolge der WG ist dabei so, wie die Aufnehmer primär in Fahrrichtung, sekundär von links nach rechts an der Brücke angetroffen werden. Für die DMS gilt das gleiche, mit dem Unterschied, dass zuerst alle zwischen den Stegen und dann alle an der Konsole angeordneten Instrumente an die Reihe kommen. Falls ein Instrument für beide Fahrachsen ausgewertet wurde, folgt zuerst die Information für die Achse A, dann für die Achse K. Diese Hierarchie gilt auch für die folgenden Abschnitte, in denen dynamische Inkremente diskutiert werden.

Für die DMS 52/51/50, die Längsdehnungen der unteren Bewehrung der Fahrbahnplatte, geben die Tabellen im Anhang 4 die Resultate für die DI- und die DI+ separat, d.h.

so, wie sie aus der Computerauswertung hervorgingen. Wie im vorangehenden Abschnitt, 3.71, erwähnt, sind diese dynamischen Inkremente wegen der besonderen Form der zugehörigen Zeitsignale nicht mit den übrigen DI vergleichbar. Es erweist sich als sinnvoll, für vergleichende Betrachtungen die DI- und die DI+ wie folgt zu einem gesamten DI zusammenzufassen:

$$DI = \frac{A_{dyn}' - A_{stat}'}{A_{stat}'} \cdot 100 [\%] \quad \text{wobei}$$

$$A_{stat}' = (A_{stat+}) - (A_{stat-}) \quad \text{und}$$

$$A_{dyn}' = (A_{stat+} \cdot (DI+/100 + 1)) - (A_{stat-} \cdot (DI-/100 + 1))$$

Damit werden als statischer Vergleichswert die totale statische und als Spitzenwert die totale dynamische Signalamplitude für die Berechnung des DI benützt. Für die folgenden Betrachtungen wurde dementsprechend vorgegangen.

Die wichtigsten der im Anhang 4 tabellierten Ergebnisse werden im Anhang 5 grafisch präsentiert. Jede der Darstellungen enthält Informationen für ein bestimmtes Instrument, allenfalls nur für das angegebene Signalvorzeichen und meist auch nur für eine der beiden Fahrachsen. Wo dies sinnvoll ist, d.h. für die Durchbiegungen der in Fahrrichtung linksseitigen Kastenstege, sind Resultate für Fahrten in beiden Fahrachsen gegeben. Anschliessend an die Resultate für Fahrten ohne Brett (A5.1 bis A5.18) werden jene für Fahrten über das Brett (A5.19 bis A5.27) präsentiert.

Auf der Abszisse der Darstellungen ist der Fahrzeugtyp bzw. der Code für die Fahrten mit mehreren Fahrzeugen angegeben. Die Fahrzeuge sind dabei in vier Gruppen eingeteilt: Die Zweiachser (2D), die mehrachsigen Solofahrzeuge (MD), die zusammengesetzten Fahrzeuge (LS) und die Versuche mit mehreren Fahrzeugen (MF). Auf der Ordinate sind die maximal gemessenen dynamischen Inkremente aufgetragen. Andere als die obengenannten Parameter, d.h. insbesondere Reifendruck und Belagszustand, sind dabei nicht berücksichtigt.

Ein detaillierter Vergleich der im folgenden dargelegten Ergebnisse mit den Resultaten von EMPA-Standardversuchen wird, soweit sinnvoll, erst im nächsten Abschnitt, 3.73,

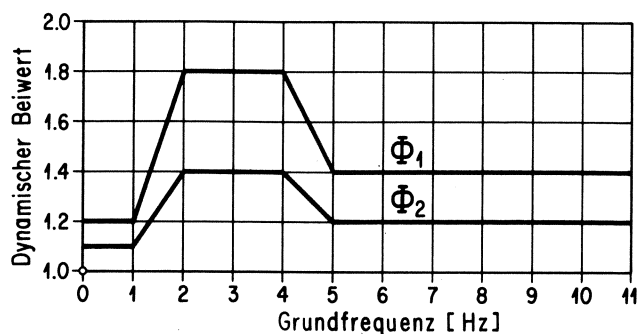


Bild 165: Abhängigkeit des dynamischen Beiwertes für Strassenlasten von der Grundfrequenz einer Brücke [13].

durchgeführt. Dagegen soll hier kurz auf die Angaben im Vorschlag für eine neue SIA-Belastungsnorm [13] eingegangen werden. Der dynamische Beiwert für Strassenlasten wird dort in Abhängigkeit von der Grundfrequenz der Brücke definiert. Bei einer Grundfrequenz von rund 2.5 Hz, wie sie die Deibüel-Brücke aufweist, betragen die dynamischen Beiwerte $\Phi_1 = 1.8$ für das Lastmodell 1 bzw. $\Phi_2 = 1.4$ für das Lastmodell 2 (Bild 165). Dies entspricht Werten von $\phi_1 = 80\%$ bzw. $\phi_2 = 40\%$ für das dynamische Inkrement (DI), wie es hier verwendet wird. Das Lastmodell 1 repräsentiert dabei ein einzelnes, schweres Fahrzeug, das Lastmodell 2 eine langsam fahrende Kolonne schwerer Fahrzeuge. Die Werte ϕ_1 bzw. ϕ_2 werden im folgenden als "Normwerte" bezeichnet.

b) Fahrten ohne Brett, Durchbiegungen

Die Diskussion soll mit den DI- für die Durchbiegungen begonnen werden (A5.1 bis A5.8). Von den bezüglich der Fahrachse A theoretisch jeweils äquivalenten Paaren WG 82/84, 02/04 und 22/24 sind im Anhang 5 nur Resultate für die WG 82, 02 und 22 dargestellt. Der Vollständigkeit halber werden hier aber die Ergebnisse für alle diese WG mitgeführt.

Wie die folgende Tabelle der pro Messstelle grössten DI zeigt, wurden diese Maximalwerte in praktisch jedem Fall von einem MD-Fahrzeug erzielt (in Klammern die gültige Fahrachse).

WG 82-	(A): 54%	Serie 21R10AoA
	(K) 45%	21R10KoA + 25R10KoA
WG 84-	(A): 54%	21R10AoA
WG 01-	(K): 50%	25R6KoA

WG 02- (A): 75%	21R10AoA
(K) 60%	25R10KoA
WG 04- (A): 78%	21R10AoA
WG 111- (K): 47%	21R10KoA + 25R10KoA
WG 112- (A): 77%	25R6AoA
(K) 63%	21R10KoA
WG 101- (K): 62%	24R10KoA
WG 102- (A): 79%	25R10AoA
(K) 61%	21R10KoA + 14R10KoA
WG 22- (A): 84%	21R10AoA
(K) 80%	25R10KoA
WG 24- (A): 88%	21R10AoA

Mit zwei Ausnahmen liegen alle diese Spitzenwerte nicht über dem Normwert ϕ_1 . Der Belag B ist nie massgebend, dagegen kann bezüglich des Reifendruckes keine eindeutige Aussage gemacht werden. In der Mehrheit der Fälle ist der Reifendruck 10 bar massgebend.

In einem nächsten Schritt werden die pro Fahrzeuggruppe grössten DI miteinander verglichen. In Bild 166 sind einerseits diese Maximalwerte (Gruppenmaxima), andererseits aber auch die Mittel dieser Maxima über eine Fahrzeuggruppe (Gruppenmittel) angegeben. Die Reihenfolge, in der die Gruppen aufgeführt sind, entspricht derjenigen, wie sie in den Darstellungen des Anhanges 5 gewählt wurde.

Für die drei Gruppen von Einzelfahrzeugen, 2D, MD und LS, liegt nur ein einziges Gruppenmaximum über dem entsprechenden Normwert $\phi_1 = 80\%$. In der Kolonne MF liegen vier Werte höher als der hier anwendbare Normwert $\phi_2 = 40\%$. Für Einzelfahrzeuge und Messstellen am Kastensteg ist festzustellen, dass Fahrten in der Achse A grössere, wenn auch zum Teil nur unwesentlich grössere, DI erzeugen als solche in der Achse K. (Für die im Abschnitt 3.71 angegebenen Resultate für das Fahrzeug 21R10 auf dem Belag B trifft das Umgekehrte zu.)

Bezüglich der mittleren dynamischen Wirksamkeit der verschiedenen Fahrzeuggruppen (Gruppenmittel) ist wie für die Gruppenmaxima der DI festzustellen, dass meist die Rangordnung MD-2D-LS-MF gilt. Bei den zwei Ausnahmefällen liegen die mittleren DI für die 2D-Fahrzeuge nur geringfügig höher als jene für die MD-Fahrzeuge.

c) Fahrten ohne Brett, Dehnungen

Als nächstes werden die DI für die Dehnungen der Bewehrung der Fahrbahnplatte zwischen den Kastenstegen besprochen (A5.9 bis A5.15). Bezüglich der Zuverlässigkeit der Resultate ist hier anzumerken, dass die Querdehnungen ausserordentlich empfindlich auf Abweichungen des Versuchsfahrzeuges von der theoretischen Fahrachse sind. Die entsprechenden Werte müssen deshalb mit einer gewissen Vorsicht beurteilt werden. Da sie für unnatürlich kleine statische Vergleichswerte gültig sind, wurden die extrem hohen DI für DMS 42+ bzw. DMS 31+ und für die Serie 12R10AoA bzw. 21R10AoA als Ausreisser behandelt und von der Diskussion ausgeschlossen (A4.30 und A4.35; vgl. jeweils Astat für die anderen, ähnlichen Fahrzeuge!). Die grössten DI resultieren aus Fahrten mit einem MD- oder einem LS-Fahrzeug:

DMS 32+ (A): 87%	Serie 21R10AoA
DMS 42+ (A): 76%	42R10AoA
DMS 52 (A): 74%	21R10AoA
DMS 31+ (A): 82%	74R10AoA
DMS 41+ (A): 29%	25R10AoA
DMS 51 (A): 57%	20R10AoA
DMS 50 (A): 30%	74R10AoA

Ein Vergleich mit den für die WG 82- bis WG 22- erhaltenen Resultaten zeigt, dass die Maximalwerte der DI für die Dehnungen von der gleichen Grössenordnung sind. Der direkte Vergleich mit den Angaben in [13] ist hier nicht mehr ganz stichhaltig, weil die Normwerte nur auf DI aus Durchbiegungsmessungen beruhen. Trotzdem kann festgestellt werden, dass für die beiden Querdehnungen in Stegnähe (DMS 31/32) die 80%-Grenze überschritten wird. In allen Fällen ist der Belag A und der Reifendruck 10 bar massgebend. Die weiter hinten durchgeführte, detaillierte Diskussion wird aber zeigen, dass der Einfluss insbesondere des Reifendruckes differenzierter beurteilt werden muss.

In der Tabelle der Gruppenmaxima und -mittel (Bild 166) ist zu berücksichtigen, dass nicht für alle Instrumente Resultate aus allen Serien vorhanden sind. Details hierzu gehen aus dem Anhang 4 hervor (A4.35 bis A4.44).

Bezüglich der Gruppenmaxima fallen die DMS 31/32 dadurch auf, dass bei ihnen nicht nur der Normwert ϕ_1 , sondern auch ϕ_2 überschritten werden. Für die anderen Messstellen liegen die entsprechenden Werte zum Teil nur knapp unterhalb dieser Grenzen.

Eine in den meisten Fällen gültige Reihenfolge der mittleren dynamischen Wirksamkeit der Fahrzeuggruppen, wie sie für Durchbiegungen mit MD-2D-LS-MF gilt, ist für die hier betrachteten Dehnungen nicht festzustellen. Es fällt dagegen auf, dass die MF-Fahrzeuge in vier von sechs Fällen grössere Gruppenmittel erzeugen als die 2D-Fahrzeuge.

Als letzte Instrumentengruppe werden die drei Dehnungen im Einspannquerschnitt der Konsole besprochen (A5.16 bis A5.18). Die maximalen DI werden meist von MD- oder LS-Fahrzeugen erzeugt und sind alle von einer ähnlichen, vergleichsweise moderaten Grössenordnung. Für DMS 20 wurde das maximal festgestellte DI auch bei der Ueberfahrt einer Gruppe von vier Fahrzeugen erzielt!

DMS 22+ (K): 38% Serie 25R6KoA

DMS 21+ (K): 37% 71R10KoA

DMS 20+ (K): 32% 25R10KoA + 4MN

Auch über die verschiedenen Fahrzeuggruppen streuen die Maximalwerte relativ schwach und liegen sowohl für Einzelfahrzeuge tiefer als 80% als auch für die MF-Gruppen tiefer als 40% (Bild 166). Die MD-Fahrzeuge erzielen im Mittel die grösste dynamische Wirkung.

d) Fahrten mit Brett, Durchbiegungen

Hier werden nur Resultate für Messstellen besprochen, die im Brettschnitt 0 bzw. 12 angeordnet waren, sowie für solche aus dem benachbarten Schnitt 11. Vergleiche mit Angaben im Normvorschlag [13] sind nicht möglich, da dort Belagszustände, wie sie durch ein Brett auf der Fahrbahn simuliert werden, nicht erfasst bzw. explizit ausgeschlossen sind. Für Vergleiche sei auf den nächsten Abschnitt, 3.73, verwiesen.

Wiederum wird mit den DI- für die Durchbiegungen begonnen (A5.19 bis A5.22). Die pro Messstelle grössten DI und die zugehörige Serie sind:

WG 01- (K): 152% Serie 21R10KmA

WG 02- (A): 212% 21R10AmA
(K) 190% 21R10KmA

WG 04- (A): 221% 21R10AmA

WG 111- (K): 135% 21R10KmA

WG 112- (A): 224% 21R10AmA
(K) 194% 21R10KmA

Wie schon bei den Fahrten ohne Brett gehen auch hier alle Maximalwerte der DI auf die Einwirkung eines MD-Fahrzeuges zurück. Für Fahrten über das Brett sind sogar immer das Fahrzeug 21R und der Reifendruck 10 bar sowie meist der Belag A massgebend. Die MD-Fahrzeuge liefern ebenfalls bei den Gruppenmaxima und -mitteln die grössten Werte (Bild 167). Anders als bei den Fahrten ohne Brett ist die dynamische Wirksamkeit der LS-Fahrzeuge hier meist grösser als die der 2D-Fahrzeuge, so dass im allgemeinen die Rangfolge MD-LS-2D-MF gilt (Ausnahme: WG 111). Bezüglich der MF-Fahrzeuge ist zu beachten, dass lediglich für eine Serie (2MH) Fahrten über das Brett durchgeführt wurden.

Wie bei den Fahrten ohne Brett ist auch hier die eindeutige Tendenz festzustellen, dass für Messstellen am Kastensteg Fahrten von Einzelfahrzeugen in der Achse A höhere DI bewirken als solche in der Achse K.

e) Fahrten mit Brett, Dehnungen

Mit Ausnahme der Messstelle DMS 41 liegen die Maximalwerte der DI für die Dehnungen der Plattenbewehrung zwischen den Kastenstegen in der gleichen Grössenordnung, wie sie für die Durchbiegungen gefunden wurde (A5.23 bis A5.26):

DMS 32+ (A): 191% Serie 13R10AmA

DMS 42+ (A): 237% 14R10AmB

DMS 52 (A): 232% 21R10AmB

DMS 31+ (A): 172% 21R10AmB

DMS 41+ (A): 53% 20R10AmB

DMS 51 (A): 159% 20R10AmA

Während wiederum der Reifendruck 10 bar immer massgebend ist, stammen die Maximalwerte jeweils in vier von sechs Fällen von MD-

Fahrzeugen bzw. von Fahrten auf dem Belag B. Bei den im Brettquerschnitt angeordneten Querdehnungen erzeugt ein 2D-Fahrzeug das maximale DI.

Für die Dehnungen im Brettquerschnitt (DMS 32/42/52) liegen die DI höher als für die entsprechenden Messstellen im Schnitt 11 (DMS 31/41/51). Besonders stark ausgeprägt ist diese Erscheinung für DMS 42/41.

Es erweist sich wiederum als nicht möglich, aus den Tabellen der Gruppenmaxima bzw. -mittel eine allgemein gültige Rangordnung der Fahrzeuggruppen abzuleiten (Bild 167). Die grössten DI werden von 2D- oder MD-Fahrzeugen erzeugt, wobei aber die LS-Fahrzeuge gegenüber der Gruppe mit dem jeweils gültigen Maximum nur unwesentlich abfallen. Dagegen erzeugen die MF-Gruppen, verglichen mit den Ergebnissen für Fahrten ohne Brett, doch deutlich kleinere dynamische Inkremente.

Abschliessend folgen die Ergebnisse für zwei Dehnungen im Einspannquerschnitt der Konsole (A5.27). Die Maximalwerte lauten:

DMS 22+ (K): 156% Serie 14R10KmB

DMS 21+ (K): 100% 20R10KmA + 24R10KmA

Die Beurteilung fällt gleich aus wie für die oben besprochenen Dehnungen: In jedem Fall massgebend ist lediglich der Reifendruck 10 bar. Im Übrigen sind sowohl ein 2D- als auch MD-Fahrzeuge sowie beide Belagszustände für Maximalwerte verantwortlich. Das 2D-Fahrzeug ist dabei wiederum für die im Brettquerschnitt angeordnete Dehnung massgebend.

Aus der Tabelle der Gruppenmaxima bzw. -mittel ist wiederum zu entnehmen, dass eine eindeutige Rangordnung der dynamischen Wirksamkeit der verschiedenen Fahrzeuggruppen nicht existiert.

f) Zusammenfassung

Beschränkt man sich bezüglich der Fahrten mit Brett auf die effektiv im Brettquerschnitt montierten Instrumente, ergeben sich die folgenden Bereiche der maximalen beobachteten dynamischen Inkremente:

- Fahrten ohne Brett:
 - Durchbiegungen : 45% - 88%
 - Dehnungen zwischen den Stegen : 29% - 87%

- Dehnungen an der Konsole: 32% - 38%
- Fahrten mit Brett:
 - Durchbiegungen : 152% - 221%
 - Dehnungen zwischen den Stegen : 191% - 237%
 - Dehnungen an der Konsole: 156%

Die oberen Grenzen dieser Bereiche sind für Durchbiegungen und Dehnungen der Plattenbewehrung zwischen den Stegen etwa gleich. Für Dehnungen der Einspannbewehrung der Konsole gelten kleinere obere Grenzwerte als für die anderen Messstellen.

Es gibt keine Parameterkombination Fahrzeug/Reifendruck/Belag, die in allen Fällen massgebend wäre. Für Fahrten ohne Brett stammen die Maximalwerte von neun verschiedenen Fahrzeugen und zwei verschiedenen Reifendrücken. Der Belag A ist dagegen immer massgebend. Für Fahrten mit Brett stammen die Maximalwerte von vier verschiedenen Fahrzeugen und beiden Belägen. Hier ist der Reifendruck 10 bar immer massgebend.

In der Rangordnung der dynamischen Wirksamkeit ist die Gruppe der MD-Fahrzeuge eindeutig führend:

- MD-Fahrzeuge: 29 Maximalwerte
- LS-Fahrzeuge: 4 Maximalwerte
- 2D-Fahrzeuge: 4 Maximalwerte
- MF-Gruppen : 1 Maximalwert

Von den MD-Fahrzeugen wies das Fahrzeug 21R mit 16 Maximalwerten, gefolgt vom Fahrzeug 25R mit 11 Werten die grösste dynamische Wirksamkeit auf. Die anderen Fahrzeuge folgen weit abgeschlagen.

Bis auf drei Fälle, wo der Reifendruck 6 bar massgebend ist, wurden alle Maximalwerte mit einem Reifendruck von 10 bar erzielt (35 Fälle).

Alle 30 Maximalwerte für Fahrten ohne Brett und die Hälfte der acht Werte für Fahrten mit Brett wurden erzielt, als der Belag A auf der Brücke eingebaut war.

Mit einigen nicht sehr bedeutenden Ausnahmen gilt die Feststellung, dass für Durchbiegungen am Kastensteg bei Fahrten in der Achse A etwas grössere dynamische Inkremente erzeugt wurden als bei Fahrten in der Achse K.

	2D		MD		LS		MF	
	max	avg	max	avg	max	avg	max	avg
WG 82- (A):	32	28	54	41	35	25	17	11
(K)	30	27	45	40	33	23	27	16
WG 84- (A):	32	29	54	42	30	23	21	12
WG 01- (K):	44	39	50	40	36	29	28	17
WG 02- (A):	61	51	75	62	48	35	24	16
(K)	57	50	60	50	43	31	34	20
WG 04- (A):	62	51	78	63	45	34	22	17
WG 111- (K):	46	40	47	42	45	31	34	21
WG 112- (A):	70	60	77	67	53	38	28	19
(K)	59	53	63	52	52	31	39	22
WG 101- (K):	51	40	62	50	33	28	42	28
WG 102- (A):	-	-	79	70	55	40	35	27
(K)	61	51	61	50	56	32	36	27
WG 22- (A):	74	61	84	72	66	43	43	30
(K)	62	53	80	61	59	38	43	31
WG 24- (A):	72	61	88	73	65	42	56	35
DMS 32+ (A):	59	41	87	57	80	53	80	41
DMS 42+ (A):	39	35	41	26	76	32	36	28
DMS 52 (A):	32	24	74	62	54	33	30	28
DMS 31+ (A):	-	-	71	55	82	48	49	37
DMS 41+ (A):	12	9	29	19	26	24	21	14
DMS 51 (A):	32	23	57	45	56	35	39	27
DMS 50 (A):	13	10	20	20	30	15	28	19
DMS 22+ (K):	24	20	38	28	30	20	23	17
DMS 21+ (K):	22	20	32	28	37	25	31	21
DMS 20+ (K):	22	13	32	23	27	18	32	18

Alle dynamischen Inkremente in %

Bild 166: Dynamische Inkremente für Fahrten ohne Brett. Maxima und Mittel (avg) pro Fahrzeuggruppe.

Die für schweizerische Verhältnisse beträchtlich zu schweren Fahrzeuge Nr. 52 und Nr. 76 erzeugten keine massgebenden dynamischen Inkremente.

Die für Fahrten ohne Brett beobachteten maximalen DI können mit den Angaben im Normvorschlag [13] verglichen werden. Bei einem beobachteten Maximalwert von 88% für Einzelfahrzeuge wird der entsprechende Normwert $\phi_1 = 80\%$ vereinzelt überschritten. Bezüglich des für Fahrzeugkolonnen gültigen Normwertes $\phi_2 = 40\%$ ist festzustellen, dass er bei einem beobachteten Maximalwert für MF-Grup-

pen von 56% für Durchbiegungen und von 80% für Dehnungen einige wenige Male überschritten wird.

Interessiert man sich für die mittlere dynamische Wirksamkeit der einzelnen Fahrzeuggruppen, zeigt es sich, dass lediglich für die Durchbiegungen relativ eindeutige Verhältnisse herrschen. Für Fahrten ohne Brett gilt hier meist die Rangfolge MD-2D-LS-MF, für solche mit Brett MD-LS-2D-MF. Für Dehnungen ist lediglich festzustellen, dass die Gruppe MD häufiger massgebend ist als jede der anderen Fahrzeuggruppen.

	2D		MD		LS		MF	
	max	avg	max	avg	max	avg	max	avg
WG 01- (K):	102	88	152	130	106	72	--	--
WG 02- (A): (K)	127	94	212	181	141	97	104	--
	113	91	190	158	125	82	--	--
WG 04- (A):	128	95	221	183	143	98	102	--
WG 111- (K):	111	100	135	114	108	75	--	--
WG 112- (A): (K)	137	98	224	190	162	106	97	--
	118	94	194	160	135	87	--	--
DMS 32+ (A):	191	172	182	112	176	126	108	--
DMS 42+ (A):	237	209	157	108	190	123	88	--
DMS 52 (A):	164	149	232	204	231	145	141	--
DMS 31+ (A):	--	--	172	120	107	84	74	--
DMS 41+ (A):	20	18	53	43	52	38	31	--
DMS 51 (A):	54	40	159	119	136	72	80	--
DMS 22+ (K):	156	132	89	80	134	99	--	--
DMS 21+ (K):	68	47	100	78	85	54	--	--

Alle dynamischen Inkremente in %

Bild 167: Dynamische Inkremente für Fahrten mit Brett. Maxima und Mittel (avg) pro Fahrzeuggruppe.

3.73 Vergleich mit den EMPA-Standardversuchen

Von EMPA-Standardversuchen an der Deibüel-Brücke kann angenommen werden, dass mit einem Zweiachser Fahrten ohne und mit Brett in der Achse A durchgeführt worden wären, und dass die Instrumentierung die WG 82/84, 01/02/04/05 und 22/24 umfasst hätte. Die Belagsqualität hätte wohl mindestens derjenigen des Belages B entsprochen. Als massgebende Resultate werden die für alle Zweiachser in beliebigem Zustand maximalen DI- diskutiert. Die dabei verwendeten Beurteilungsgrundlagen können [6] entnommen werden.

Aus Bild 168b geht hervor, dass die Empfindlichkeit der Bergspurbrücke Deibüel auf die dynamischen Wirkungen des Schwerverkehrs für Fahrten ohne Brett feldweise differenziert beurteilt werden muss: Während die Empfindlichkeit sowohl des 41-m- als auch des 37-m-Feldes als hoch zu bewerten ist, ist jene des 32-m-Feldes durchschnittlich. Auf die von einem Brett erzeugten dynamischen Einwirkungen reagiert das 41-m-Feld mit leicht unterdurchschnittlicher Intensität (Bild 170a).

Schliesst man den Belagszustand A in die Diskussion ein, ergibt sich, dass für Fahrten ohne Brett das 37-m-Feld extrem hoch, das 41-m-Feld hoch und das 32-m-Feld durchschnittlich empfindlich sind. Das DI- für die WG 22/24 ist sogar etwas grösser als der bisher bei EMPA-Standardversuchen überhaupt festgestellte Höchstwert (Bild 168a). Für Fahrten mit Brett fällt auf, dass die Brückenreaktion für den Belag A kleiner ist als für den Belag B (Bild 170a).

Berücksichtigt man unter sonst gleichen Voraussetzungen zusätzlich die für andere Fahrzeuge ermittelten Resultate, ergibt sich, dass für den Belag A die Zweiachser nicht massgebend sind. Sowohl für Fahrten ohne als auch für solche mit Brett wurden mit anderen Fahrzeugen höhere, zum Teil sogar wesentlich höhere DI- erreicht (Bilder 168a, 169a, 170). Da Informationen über die dynamischen Radlasten nur für Zweiachser vorliegen, wird dieses Ergebnis nicht fundiert diskutiert werden können. Dagegen werden die für Zweiachser ermittelten Resultate in [65] eingehend untersucht.

Hier ist zunächst noch darauf hinzuweisen, dass die in den Bildern 169 und 170 unter "andere Fahrzeuge" und für Belag A angeführ-

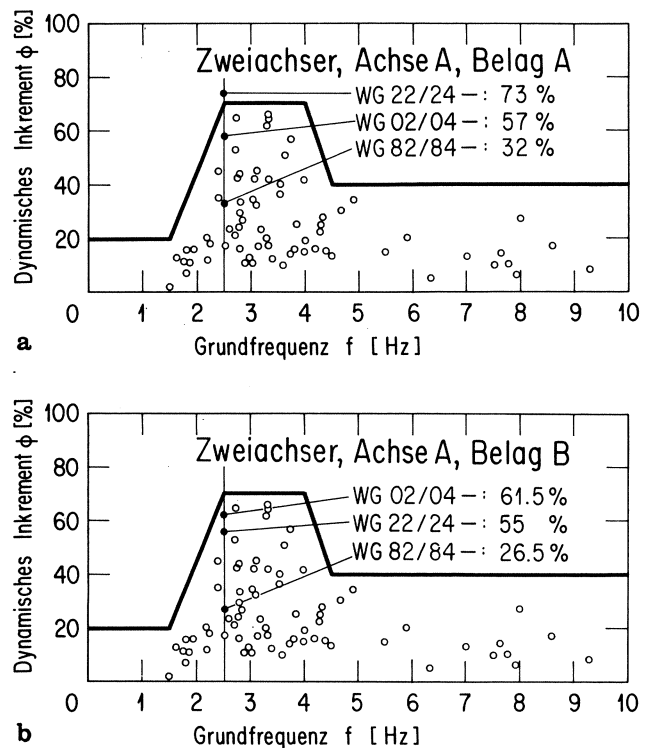


Bild 168: Vergleich der maximalen dynamischen Inkremente für Zweiachser und die Beläge A und B mit den Ergebnissen der EMPA-Standardversuche (Fahrten ohne Brett).

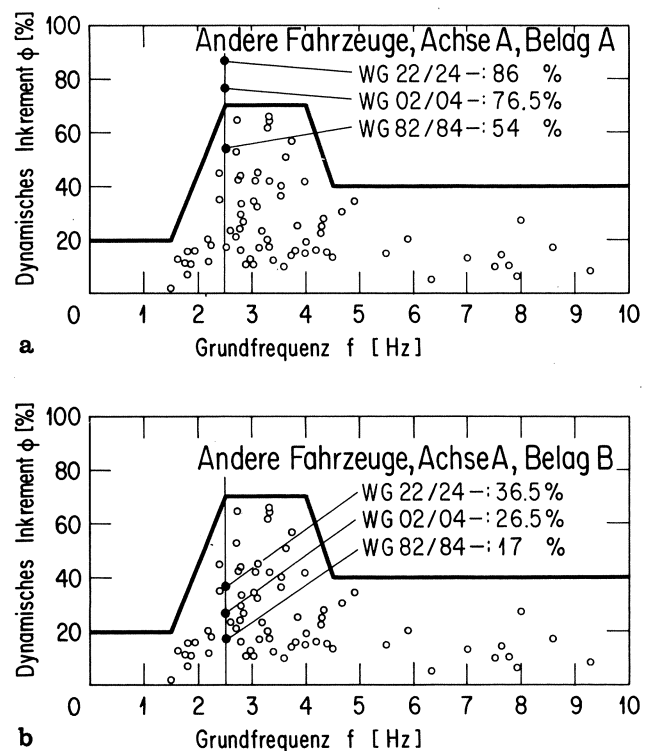


Bild 169: Vergleich der maximalen dynamischen Inkremente für Nicht-Zweiachser und die Beläge A und B mit den Ergebnissen der EMPA-Standardversuche (Fahrten ohne Brett).

ten maximalen DI- immer auf das Konto des Fahrzeuges 21R10 gehen. Es wurde deshalb als sinnvoll erachtet, den Vergleich Zweiachser/"andere Fahrzeuge" auf die für den Belag B ermittelten Resultate auszudehnen, obschon das Fahrzeug 21R10 der einzige Nicht-Zweiachser ist, für den solche Resultate überhaupt existieren. Dieser Vergleich zeigt, dass die Belagsqualität bei Fahrten ohne Brett für das Fahrzeug 21R eine wesentlich grössere Rolle spielt als für die Zweiachser (Bilder 168 und 169). Demgegenüber ist für Fahrten mit Brett ein Einfluss des Belages für das Fahrzeug 21R praktisch nicht, für die Zweiachser aber doch spürbar vorhanden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Empfindlichkeit der Bergspurbrücke Deibüel auf die dynamischen Wirkungen des Schwerverkehrs vergleichsweise hoch ist. Ohne dies in absoluter Weise auslegen zu wollen, sind die Resultate der im vorliegenden Bericht besprochenen Versuche deshalb durchaus geeignet, Informationen über das Verhalten dynamisch kritischer Strassenbrücken zu liefern.

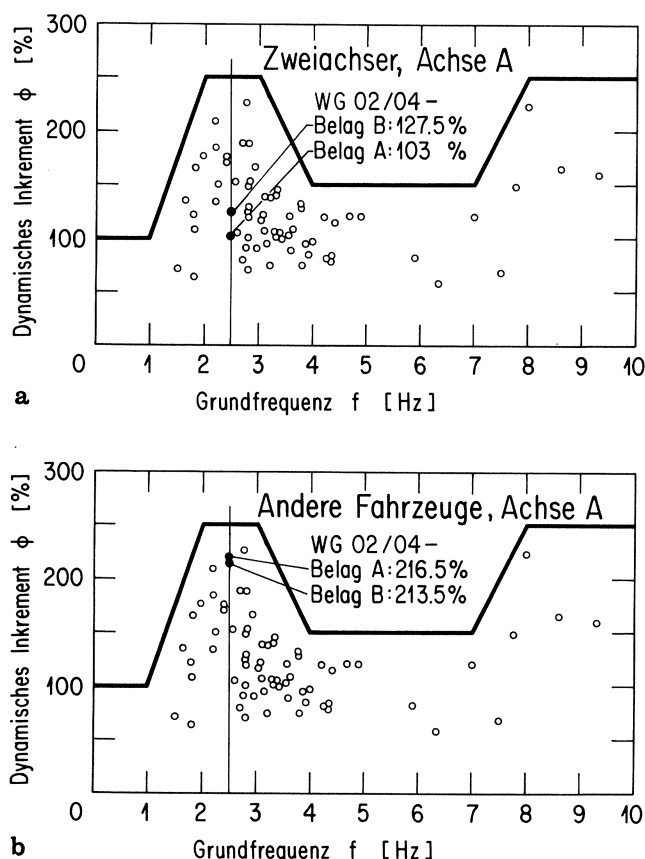


Bild 170: Vergleich der maximalen dynamischen Inkremente für Fahrten mit Brett mit den Ergebnissen der EMPA-Standardversuche.

3.74 Charakterisierung der $\phi(v)$ -Funktionen

In den folgenden drei Abschnitten, 3.75 bis 3.77, wird der Einfluss verschiedener Parameter auf die dynamischen Inkremente ϕ oder DI bzw. auf deren Verlauf über die Fahrgeschwindigkeit v diskutiert. Auf die Maximalwerte der DI wird dabei nicht mehr eingegangen. Diese wurden in den vorangehenden Abschnitten, 3.72 und 3.73, besprochen.

Die Diskussion wird zeigen, dass der Verlauf des DI über die Fahrgeschwindigkeit, im folgenden kurz mit "DI-Verlauf" bezeichnet, gewisse Charakteristika aufweisen kann. Diese werden mit "DI-Struktur" bezeichnet. Meist handelt es sich dabei um wellenartige Berg/Tal-Strukturen, es sind jedoch auch gradlinige Strukturen möglich. Weil der entsprechende Vorgang eher subjektiver Natur ist, kann die Zuteilung einer Struktur zu einem bestimmten DI-Verlauf diskutabel sein. Da es objektivere Zuteilungskriterien bisher nicht gibt, ist dies jedoch nicht zu vermeiden.

a) DI-Strukturen

Bild 171 zeigt schematisch einige der festgestellten charakteristischen DI-Verläufe bzw. die Kurzbezeichnungen der entsprechenden Strukturen. Bei wellenförmigen Strukturen werden die Berge mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit fortlaufend mit A, B, C usw. bezeichnet, während bei den Tälern ein Index AB, BC, CD usw. angibt, zwischen welchen Bergen ein Tal T sich befindet. Täler, die nur auf einer Seite gegen einen Berg abgegrenzt sind, weisen entsprechend nur einen einstelligen Index auf (T_A , T_B usw.). Als "Tal" wird ein Strukturelement nur dann bezeichnet, wenn das DI über einen Geschwindigkeitsabschnitt von mindestens $\Delta v = 8 \dots 10$ km/h einigermaßen konstant bleibt. Ein linear mit der Geschwindigkeit ansteigender DI-Verlauf erhält die Bezeichnung L.

Diese Grobstrukturen können verfeinert werden, indem zum Beispiel angegeben wird, wieviele Gipfel einer der erwähnten Berge A, B, C usw. aufweist, oder indem auf die Streuung der DI um einen mittleren Verlauf eingegangen wird. Im Gegensatz zu dieser "DI-Streuung" wird der Begriff "Strukturstreuung" dann verwendet, wenn verschiedene DI-Verläufe untereinander verglichen werden, die zwar nicht identisch sind, aber die gleiche DI-Struktur aufweisen. Während es sich bei

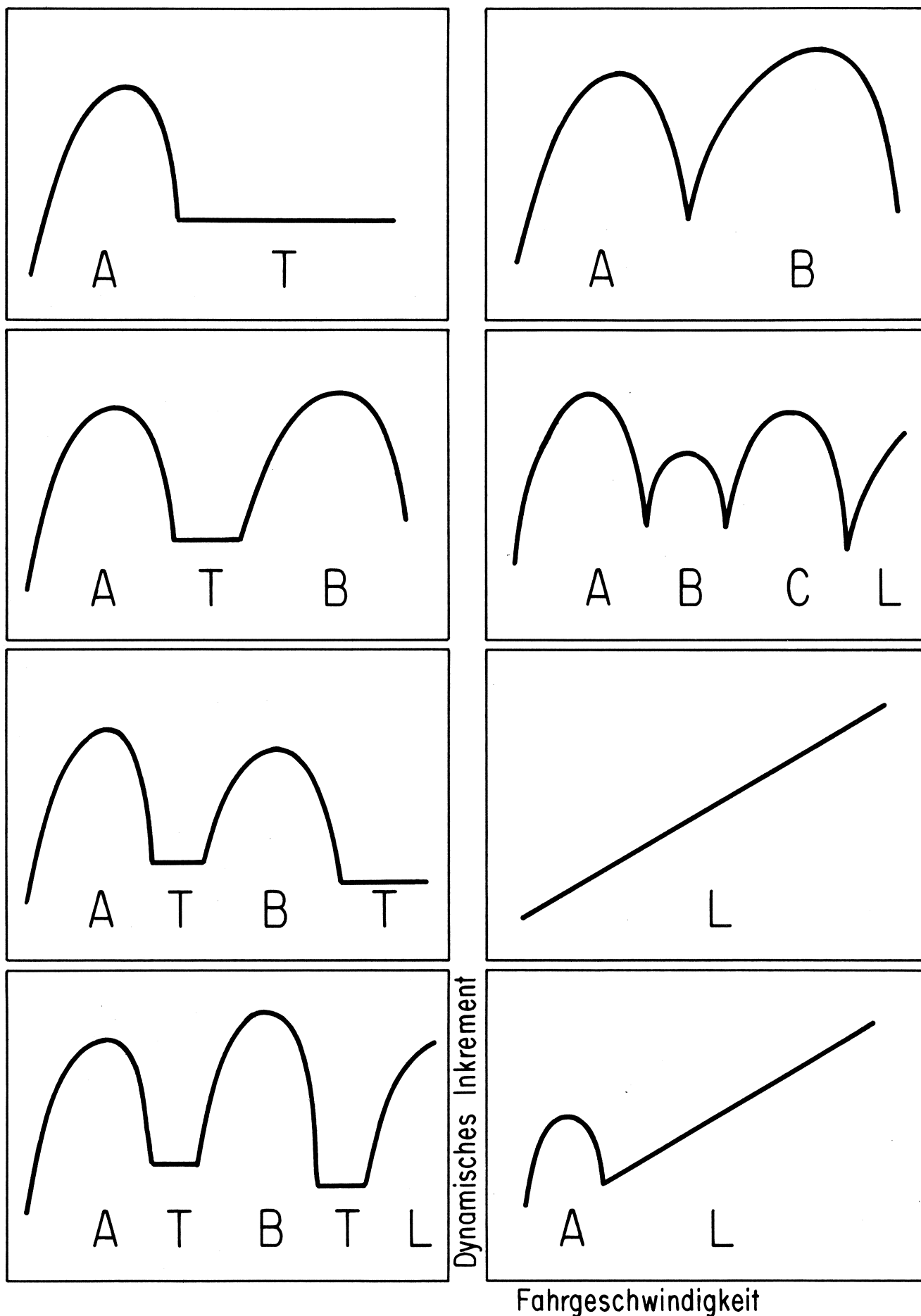


Bild 171: Beispiele von DI-Strukturen.

der DI-Streuung im Prinzip um eine unerwünschte Erscheinung handelt, die weiter hinten diskutiert wird, ist die Strukturstreuung (neben der Struktur selber) das eigentliche Zielobjekt der vorliegenden Untersuchung. Sie gibt Auskunft darüber, in welchem Mass gezielte Änderungen an den Versuchsparametern sich auf den DI-Verlauf bzw. auf die einzelnen Elemente der DI-Struktur auswirken.

b) Strukturstreuung

Bei der Strukturstreuung kann zwischen vertikaler und horizontaler Streuung unterschieden werden. Bei der vertikalen Streuung beeinflusst der Versuchsparameter die Grösse der dynamischen Inkremente innerhalb eines bestimmten Strukturelementes; beispielsweise ist die Spitze eines Berges B für verschiedene Parameterzustände unterschiedlich hoch. Bei der horizontalen Streuung beeinflusst der Versuchsparameter die Lage einer Bergspitze in bezug auf die horizontale Koordinatenachse, die Fahrgeschwindigkeit; beispielsweise tritt die Spitze eines Berges B für verschiedene Parameterzustände bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten auf. Vertikale und horizontale Strukturstreuungen können in reiner oder in überlagerter Form vorkommen.

Die Zuverlässigkeit, mit der das Ausmass einer Strukturstreuung bestimmt werden kann, ist auch von der Grösse des Geschwindigkeitsinkrements abhängig, das bei der Durchführung der Versuche gewählt wurde. Vor allem für die Bestimmung der horizontalen Streuung ist es dabei wichtig, dass, unabhängig von der Struktur selbst und der Grösse der DI-Streuung, das Geschwindigkeitsinkrement nicht grösser als $\Delta v = 2 \text{ km/h}$ ist. Die vertikale Strukturstreuung ist diesbezüglich weniger empfindlich, insbesondere wenn die DI-Struktur gut ausgeprägt und die DI-Streuung nicht allzu gross sind.

c) DI-Streuung

Die Frage nach der Herkunft der DI-Streuungen ist vor allem quantitativ nicht ganz einfach zu beantworten. Qualitativ können verschiedene Streuungsquellen unterschieden werden. Unter üblichen Versuchsbedingungen ist es nicht möglich, die Fahrt eines Lastwagens über eine Brücke exakt zu reproduzieren. Fahrachse und Fahrgeschwindigkeit sind zwei a priori nicht mit der notwendigen Ge-

nauigkeit beherrschbare Grössen, die deshalb während der Ueberfahrt immer mehr oder weniger stark streuen.

In welchem Mass sich diese Streuungen der versuchstechnischen Randbedingungen auf die DI-Streuung auswirken, ist von der Messgrösse und der Lage des Messinstrumentes in bezug auf die Fahrachse, vom Verhältnis zwischen dem maximalen dynamischen Messwert A_{dyn} und dem quasistatischen Vergleichswert A_{stat} (oder auch von der absoluten Grösse des DI) sowie offenbar auch von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Zudem dürfte es eine Rolle spielen, ob ein Brett auf der Fahrbahn liegt oder nicht: Im Gegensatz zu den Versuchen mit einem Brett auf der Fahrbahn, wo im wesentlichen die Verhältnisse im Moment der Brettüberquerung massgebend sind, ist bei den Versuchen ohne Brett die gesamte Geschichte einer Ueberfahrt von Bedeutung (Phasenbeziehungen zwischen Fahrzeug und Brücke).

Am empfindlichsten auf Streuungen der Lage der Fahrachse reagieren offensichtlich Messstellen, die die Dehnung der Querbewehrung der Fahrbahnplatte erfassen (z.B. DMS 32, DMS 42). Für Fahrten ohne Brett ist hier der Einfluss dieser Streuungen so stark, dass eine eigentliche Struktur des DI-Verlaufes oft nicht klar erkennbar ist. Zudem sind negative DI recht häufig, wobei sich diese unschöne Erscheinung praktisch nicht vermeiden lässt. Grundsätzlich wäre es natürlich möglich, vom Verfahren mit den quasistatischen Vergleichsfahrten abzuweichen und alle Signale aller Versuchsfahrten zunächst digital zu filtern. Damit wäre der A_{stat} -Wert einer Messstelle für jede Fahrt anders, Abweichungen der Fahrachse von ihrer Sollage könnten aber berücksichtigt werden. Abgesehen vom beträchtlichen Aufwand, der dafür getrieben werden müsste, ist es gerade bei den zur Diskussion stehenden Dehnungssignalen meist nicht möglich, diese mit einem digitalen Filter zu behandeln, ohne dass der quasistatische Signalverlauf in unzulässiger Weise verändert würde. Es musste deshalb darauf verzichtet werden, hier eine Verbesserung der unbefriedigenden Verhältnisse bezüglich der DI-Streuung anzustreben.

Am wenigsten empfindlich auf Streuungen der versuchstechnischen Randbedingungen sind Messstellen, die die Durchbiegungen in jenen Feldern erfassen, wo die dynamische Reaktion der Brücke verhältnismässig gross ist (WG 02, WG 22). Dies gilt insbesondere auch für die Versuche mit Brett. Bei sol-

chen Versuchen nimmt teilweise sogar die DI-Streuung für Dehnungen ein vernünftiges Ausmass an.

Die DI-Streuung scheint insofern recht direkt geschwindigkeitsabhängig zu sein, als sie offensichtlich in gewissen Geschwindigkeitsbereichen grösser ist als in anderen. Warum dies so ist, kann ohne detaillierte Untersuchung nicht zuverlässig beurteilt werden. Möglicherweise handelt es sich darum, dass die Brückenreaktion in gewissen Geschwindigkeitsbereichen empfindlicher auf Instabilitäten der Fahrgeschwindigkeit und die daraus resultierenden Phasenabweichungen ist.

Spezielle Verhältnisse bezüglich der DI-Streuung herrschen bei den Versuchen, bei denen mehrere Fahrzeuge gleichzeitig über die Brücke fahren. Wie üblich wurden die quasistatischen Vergleichswerte A_{stat} aus den Resultaten von mit sehr kleiner Geschwindigkeit durchgeführten Versuchen bestimmt. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nahm insbesondere der Abstand in Fahrrichtung zwischen den Fahrzeugen zu. Damit ist vor allem bei Messstellen, die die globale Lastwirkung wiedergeben, mit systematischen DI-Streuungen zu rechnen. Sie werden dadurch verursacht, dass der Vergleichswert A_{stat} in Tat und Wahrheit nicht für alle Fahrten gleich ist, wie dies die Auswertemethode voraussetzt. Die ermittelten dynamischen Inkremente sind tendenziell mit zunehmender Geschwindigkeit zu klein. Auf die Bestimmung der korrekten A_{stat} -Werte durch digitale Filterung aller Versuchssignale musste aus Zeitgründen verzichtet werden.

Zu Beginn der dynamischen Versuche an der Bergspurbrücke Deibüel wurde versucht, mittels der Fahrten mit dem Fahrzeug 20R einen Anhaltspunkt über die DI-Streuung zu erhalten. Dazu wurden jeweils drei Versuche nacheinander mit möglichst identischer Geschwindigkeit durchgeführt. Aus Zeitgründen konnte dabei ein Geschwindigkeitsinkrement von $\Delta v = 5 \text{ km/h}$ nicht unterschritten werden. Es zeigte sich jedoch, dass insbesondere infolge der Geschwindigkeitsabhängigkeit der DI-Streuung eine sehr viel grössere Zahl von Versuchen hätte durchgeführt werden müssen, um das Problem seriös untersuchen zu können. Dies war wiederum aus Zeitgründen nicht möglich. Es wurde deshalb lediglich zur Kenntnis genommen, dass die DI-Streuung nicht zu vermeiden ist, und dass sie von den diskutierten Parametern abhängt.

3.75 Die $\phi(v)$ -Funktionen für fünf Gruppen von Fahrzeugen (Reifendruck 10 bar, Belag A)

a) Allgemeines

Für die wichtigsten Instrumente ist im Anhang 6 der Verlauf der dynamischen Inkremente (ϕ oder DI) über die Fahrgeschwindigkeit v dargestellt, wobei die Parameter Reifendruck (10 bar) und Belag (A) konstant gehalten sind. Die Darstellungen sind bezüglich der Fahrzeuge in fünf Gruppen aufgeteilt:

- Die Zweiachser (2D)
Nr. 11R, 12R, 13R, 14R,
- die mehrachsigen Solofahrzeuge (MD)
Nr. 20R, 21R, 24R, 25R,
- die zusammengesetzten Fahrzeuge (LS)
Nr. 42R, 52R, 71R, 74R, 76R,
- die Fahrten mit zwei und vier Fahrzeugen hintereinander 2LH, 2MH, 4MH,
- die Fahrten mit zwei und vier Fahrzeugen paarweise nebeneinander 2MN, 4MN.

Sofern die entsprechenden Resultate existieren, sind in Abhängigkeit vom Versuchsprogramm bezüglich Fahrachse und Brett (Bild 124) für die folgenden Instrumente Darstellungen gegeben:

AoA: WG 82, WG 02, WG 112, WG 102, WG 22;
DMS 32, DMS 42, DMS 52, DMS 41,
DMS 51, DMS 50;

KoA: WG 01, WG 111, WG 101;
DMS 22, DMS 21, DMS 20;

AmA: WG 02; DMS 32, DMS 42, DMS 52;

KmA: WG 01; DMS 22.

Der Anhang 6 ist so gegliedert, dass zunächst die Resultate für Fahrten ohne (A6.1 bis A6.83), dann diejenigen für Fahrten mit Brett (A6.84 bis A6.109) gezeigt werden. Für die erwähnten Messstellen folgen jeweils nacheinander die Darstellungen für die fünf Fahrzeuggruppen. Die Hierarchie in der Reihenfolge der Messstellen ist dabei die gleiche, wie sie im Anhang 4, "Tabellen der maximalen dynamischen Inkremente", verwendet wird. Darstellungen, die keine klaren DI-Strukturen erkennen lassen, werden nicht im einzelnen diskutiert. In Bild 172 sind die besprochenen DI-Strukturen tabellarisch zusammengestellt.

b) Fahrten ohne Brett, Durchbiegungen

WG 82

Für 2D-Fahrzeuge weisen die DI-Strukturen zwar bei $v = 5...35$ km/h einen gemeinsamen, drei- bis viergipflig ausgebildeten Berg A auf, für höhere Geschwindigkeiten ist der DI-Verlauf jedoch recht unterschiedlich (A6.1). Die Strukturen sind ATB für 11R, ABC für 12R, AT für 13R und wiederum ATB für 14R. Im mittleren Geschwindigkeitsbereich $v = 35...55$ km/h ist für die Fahrzeuge 11R und 14R bzw. 13R ein Tal T_{AB} bzw. T_A , für 12R ein nicht sehr markanter Berg B vorhanden. Bei $v = 55...75$ km/h erscheint für die Fahrzeuge 11R und 14R ein Berg B, für 12R ein Berg C. Für das Fahrzeug 11R ist Berg B, für die anderen Fahrzeuge Berg A massgebend.

Die für MD-Fahrzeuge gültigen DI-Strukturen sind im Bereich eines gemeinsamen Berges A bei $v = 5...35$ km/h ähnlich wie für die 2D-Fahrzeuge (A6.2). Für höhere Geschwindigkeiten bestehen jedoch Unterschiede nicht nur gegenüber den Strukturen für 2D-Fahrzeuge, sondern auch innerhalb jener für die MD-Fahrzeuge: ATB (20R), ABL (21R), ABL (24R) und ATBL (25R). Der für alle MD-Fahrzeuge ab $v = 55$ km/h erkennbare Anstieg des DI ist für die Fahrzeuge 21R, 24R und 25R praktisch linear (L), für 20R aber als Berg B ausgebildet. Im Gegensatz zu den anderen Fahrzeugen, für die die Spitze bei hohen Geschwindigkeiten (L) massgebend ist, erreicht das DI für das Fahrzeug 24R sein Maximum im Bereich des Berges A.

Für die aus den Fahrzeugen 24R und 25R zusammengesetzte Serie 2MN weist der DI-Verlauf eine ABTL-Struktur auf, die mit den für diese MD-Fahrzeuge gültigen Strukturen verwandt ist (A6.5, A6.2). Das gleiche trifft aber nicht für die Serie 2MH zu. Dort kann sich die DI-Struktur offenbar nicht ausbilden, weil die beiden Fahrzeuge hintereinander fahren (A6.4).

WG 01

Für alle 2D-Fahrzeuge gilt eine deutlich ausgebildete ATBT-Struktur (A6.6). Ähnlich wie für WG 82 liegt Berg A bei $v = 5...35$ km/h und ist meist dreigipflig ausgebildet. Beim dritten dieser Gipfel ist die Strukturstreuung überdurchschnittlich gross. Verglichen mit den für WG 82 gültigen Strukturen, ist das Tal T_{AB} bei $v = 35$ km/h hier deutlich schmaler. Das gleiche gilt für Berg B

bei $v = 35...55$ km/h, so dass hier für $v > 55$ km/h mit dem Tal T_B noch ein viertes Strukturelement auftritt. Für drei Fahrzeuge ist Berg A massgebend, nur für 13R liegt die Spitze bei Berg B leicht höher als diejenige bei Berg A. Das Fahrzeug 11R fällt durch vergleichsweise kleine DI auf. Dies ist bei Berg B besonders stark ausgeprägt.

Für MD-Fahrzeuge sind die DI-Strukturen uneinheitlich: ATBL für 20R und 24R, ABCL für 21R und 25R (A6.7). Berg A bei $v = 5...25$ km/h ist für alle Fahrzeuge vorhanden und im wesentlichen gleich und dreigipflig ausgebildet. Bei $v = 30...40$ km/h ist für 21R und 25R ein markanter Berg B vorhanden, während für 20R und 24R die DI auf dem relativ tiefen Niveau des Tales T_{AB} bleiben. Der Berg bei $v = 40...60$ km/h ist wiederum für alle vier Fahrzeuge vorhanden, als Berg C für 21R und 25R, als Berg B für 20R und 24R. Der Anstieg L bei $v > 70$ km/h ist für die Fahrzeuge 21R und 25R wesentlich markanter ausgebildet als für 20R und 24R. Für alle vier MD-Fahrzeuge tritt das maximale DI im gleichen Geschwindigkeitsbereich auf: Bei Berg B für 20R und 24R, bei Berg C für 21R und 25R.

Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei WG 82 (Fahrachse A) ist es hier für WG 01 (Fahrachse K) die Serie 2MH, deren DI-Struktur mit ATBT eine recht enge Verwandtschaft mit jener der MD-Fahrzeuge aufweist, während für die Serie 2MN eine klare Struktur nicht vorhanden ist (A6.9, A6.10).

WG 02

Für Zweiachser gilt eine deutlich ausgeprägte ATB-Struktur (A6.11):

- $v = 5...25$ km/h (Berg A):
Hier durchläuft das DI einen Berg, der mehrere Gipfel aufweist. Die DI-Streuung ist im Gipfelbereich relativ gross.
- $v = 25...40$ km/h (Tal T_{AB}):
Das DI bleibt bei vergleichsweise kleinen Werten, wobei die DI-Streuung relativ gross ist.
- $v = 40...80$ km/h (Berg B):
Das DI durchläuft einen zweiten Berg, der einen oder mehrere Gipfel aufweist. Die DI-Streuung ist im Gipfelbereich im Gegensatz zur beträchtlichen Strukturstreuung relativ gering.

In den Bereichen von Berg A und dem relativ breiten Tal T_{AB} sind keine grundsätzli-

chen Unterschiede zwischen den DI-Verläufen für die vier 2D-Fahrzeuge festzustellen. Dagegen resultieren im Bereich von Berg B für die Fahrzeuge 13R und 14R wesentlich höhere DI als für 11R und 12R. Dieser Berg ist denn auch für 13R und 14R massgebend, während für 11R und 12R das maximale DI im Bereich des Berges A liegt.

Für MD-Fahrzeuge sind die DI-Verläufe mit jenen verwandt, wie sie für WG 01 gelten: ATB-Struktur für das Fahrzeug 20R, ATBL für 24R und ABCL für 21R und 25R (A6.12). Der für die Fahrzeuge 21R und 25R bei $v = 30 \dots 40$ km/h vorhandene Berg B ist hier vergleichsweise schwach ausgebildet. Bei Berg C (21R, 25R) bzw. B (20R, 24R), $v = 40 \dots 60$ km/h, ist die Strukturstreuung wie bei WG 01 vergleichsweise gross. Der Anstieg L ist für die Fahrzeuge 21R und 25R wiederum deutlich und für 24R schwach ausgebildet, für 20R aber gar nicht mehr vorhanden. Für 21R ist dieser Anstieg sogar massgebend, für die anderen Fahrzeuge liegt das grösste DI wie für WG 01 im Bereich des Berges C (25R) bzw. B (20R, 24R.).

WG 111

Für 2D-Fahrzeuge und WG 111 (an der Konsole im Viertelspunkt des grössten Feldes angeordnet) gilt mit ABCT eine kompliziertere DI-Struktur als für WG 01, den analogen Messpunkt in Feldmitte (A6.16, A6.6). Berg A liegt wie für WG 01 bei $v = 5 \dots 30$ km/h. Anstelle des bei $v = 30 \dots 40$ km/h für WG 01 vorhandenen Tales T_{AB} durchläuft das DI für WG 111 dort den Berg B und anschliessend bei $v = 45 \dots 60$ km/h den Berg C. Alle drei Berge sind recht deutlich ausgebildet. Für $v > 60$ km/h fällt das DI auf das tiefe Niveau des Tales T_C ab. Für die Fahrzeuge 13R und 14R ist Berg A massgebend, für die Fahrzeuge 11R und 12R Berg B. Berg C ist für das Fahrzeug 14R besonders markant ausgebildet.

Was oben für WG 111/WG 01 und 2D-Fahrzeuge gesagt wurde, gilt nicht für MD-Fahrzeuge: Hier ist der DI-Verlauf für WG 111 jenem für WG 01 sehr ähnlich (A6.17, A6.7). Die Geschwindigkeitsgrenzen der ABCT- bzw. ABCL-Struktur für die Fahrzeuge 20R, 21R und 24R bzw. 25R stimmen fast exakt überein. Mit einer Ausnahme sind auch die DI-Strukturen gleich wie jene für WG 01: Berg B ist jetzt auch für 20R und 24R deutlich erkennbar ausgebildet. Für das Fahrzeug 20R ist Berg A, für 21R Berg B und für 24R und 25R Berg C massgebend.

Ebenfalls gilt für WG 111 wie für WG 01, dass die DI-Struktur für die Serie 2MH wesentlich enger mit jener der MD-Fahrzeuge verwandt ist als die DI-Struktur für 2MN (A6.19, A6.20, A6.17).

WG 112

Die DI-Verläufe und die zugehörigen Strukturen für die Messstellen WG 112 und WG 02 (Anordnung analog zu WG 111 und WG 01, aber am Kastensteg) sind eng miteinander verwandt (A6.21, A6.22, A6.11, A6.12). So gelten für die 2D-Fahrzeuge 11R und 12R eine ATBC-, für 13R und 14R eine ATB-Struktur sowie für die MD-Fahrzeuge eine ATB- (24R), ATBL- (25R), ABCT- (20R) oder ABCL-Struktur (21R).

Für die 2D-Fahrzeuge sind die Berge bei höheren Geschwindigkeiten jetzt etwas schwächer ausgebildet als für WG 02, so dass Berg A für alle vier Fahrzeuge massgebend ist. Für die Fahrzeuge 13R und 14R erreichen die Spitzenwerte des DI bei Berg B aber fast gleich grosse Werte wie bei Berg A. Die Strukturstreuung ist im Bereich des Berges B bzw. C (11R und 12R) grösser als bei Berg A.

Für die MD-Fahrzeuge ist Berg C praktisch identisch mit jenem für WG 02. Die Berge A und B (existiert nur für 20R und 21R) sind vergleichsweise markanter, der Anstieg L (existiert nur für 21R und 25R) aber schwächer ausgebildet. Demzufolge ist für drei Fahrzeuge Berg C massgebend, nur für 20R liegt das grösste DI jetzt im Bereich des Berges A. Die Strukturstreuung ist im Bereich der Berge B und C grösser als bei Berg A.

WG 101

Für MD-Fahrzeuge gilt eine ATBT-Struktur (A6.27). Die Strukturstreuung ist insbesondere im Bereich des Berges B, der für alle Fahrzeuge massgebend ist, recht gross.

Mit ATB gilt eine ähnliche Struktur auch für die Versuche mit mehreren Fahrzeugen 2MN, 2MH und 4MN (A6.29, A6.30).

WG 102

Für die beiden MD-Fahrzeuge, für die Resultate vorliegen, 21R und 25R, gilt eine ATBT-Struktur mit dominantem Berg B (A6.31). Berg A ist wesentlich markanter ausgebildet als

für WG 101. Im Bereich dieses Berges ist die Struktursteuerung geringer als für $v > 30$ km/h.

Für die Versuche mit mehreren Fahrzeugen 2MN und 4MN gilt eine recht deutlich ausgebildete ATB-Struktur mit breitem Tal T_{AB} (A6.34). Für die Versuche 2LH, 2MH und 4MH ist trotz der grossen DI-Streuung eine allerdings wenig prägnante ATBT-Struktur zu erkennen (A6.33).

WG 22

Für 2D-Fahrzeuge gilt eine ABC-Struktur (A6.35). Berg A bei $v = 5...25$ km/h ist drei- bis viergipflig ausgebildet und praktisch identisch mit jenem für WG 02. Wiederrum verglichen mit WG 02 existiert hier das Tal T_{AB} nicht, dafür erfolgt der Aufstieg zum ebenfalls dreigipfligen Berg B ($v = 30...55$ km/h) bei tieferer Geschwindigkeit. Bei Berg C ist die Struktursteuerung vergleichsweise gross: Er ist für die Fahrzeuge 13R und 14R wesentlich markanter ausgebildet als für 12R und 11R. Für alle vier Fahrzeuge ist indessen Berg B massgebend.

Für MD-Fahrzeuge gilt eine AB-Struktur (A6.36). Berg A bei $v = 5...25$ km/h ist deutlich schwächer ausgebildet als der mehrgipflige und auffallend breite, immer massgebende Berg B bei $30...75$ km/h. Der markante Anstieg der DI für $v > 70$ km/h, wie er für die Mitten der beiden anderen Felder zu beobachten ist (WG 82, A6.2 und WG 02, A6.12), fehlt hier.

Bei den Versuchen mit mehreren Fahrzeugen 2MN und 4MN, deren DI-Struktur etwa mit TL umschrieben werden kann, fällt der markante Anstieg L für $v > 50$ km/h auf (A6.39).

c) Fahrten ohne Brett, Dehnungen

Wegen der zum Teil hohen Empfindlichkeit der Messwerte auf Abweichungen der tatsächlichen Fahrspur von ihrer Sollage sind hier die Verhältnisse häufig so unübersichtlich, dass eine detaillierte Diskussion oft nur wenig sinnvoll ist (A6.40 bis A6.83).

DMS 42

Die für 2D-Fahrzeuge nur undeutlich ausgebildeten DI-Strukturen sind mit der ATB-

Struktur für WG 02 nicht verwandt (A6.45, A6.11). Dagegen scheint für die MD-Fahrzeuge durchaus ein Zusammenhang zwischen der hier vorhandenen Struktur und jenen, die für WG 02 gelten, zu bestehen (A6.46, A6.12). Die Struktursteuerung ist nun aber auch im Bereich des Berges A recht beträchtlich. Von den LS-Fahrzeugen fällt Nr. 42 dadurch auf, dass hier die DI für $v > 30$ km/h in einem markanten Anstieg L vergleichsweise grosse Werte erreichen (TL-Struktur, A6.47).

DMS 52+

Von den 2D-Fahrzeugen gilt für 14R eine recht markante ALB-, für die anderen Fahrzeuge aber eine wenig ausgeprägte TA-Struktur mit relativ kleiner Struktursteuerung (A6.50). Gemeinsam ist den beiden unterschiedlichen DI-Verläufen nur, dass das maximale DI im Bereich von $v = 50...55$ km/h, d.h. bei Berg B bzw. A erreicht wird.

Mit AB ist die DI-Struktur für MD-Fahrzeuge einfacher als die für WG 02 gültigen Strukturen (A6.52). Die Struktursteuerung ist hier grösser als für WG 02. Das Fahrzeug 20R fällt dadurch auf, dass es auch im Bereich des Berges A wesentlich tiefere DI erzeugte als die anderen Fahrzeuge. Die DI-Struktur für die Serie 2MH ist praktisch gleich wie für die MD-Fahrzeuge (AB, A6.56). Für die Serien 2MN und 4MN gelten ähnliche AL-Strukturen mit geringer Struktursteuerung (A6.58).

DMS 52-

Für die 2D-Fahrzeuge gilt ähnlich wie für WG 02 eine ATB-Struktur, wobei allerdings die Fahrzeuge 12R und 14R im Bereich des Tales T_{AB} einen recht deutlichen Zwischenberg aufweisen (A6.51, A6.11). Für die MD-Fahrzeuge wird die AB- bzw. ATL-Struktur durch einen deutlichen Berg bzw. Anstieg für $v > 45$ km/h charakterisiert (A6.53).

DMS 51+

Für 2D-Fahrzeuge gilt eine ATL-Struktur (A6.62). Eine Verwandtschaft mit der ATB-Struktur für WG 112 ist vorhanden: Das Tal T_{AB} ist hier aber wesentlich breiter als für WG 112, so dass vom Berg B lediglich der ansteigende Ast L vorhanden ist. Für die Serien 2MN und 4MN gilt eine recht deutliche AL-Struktur (A6.64).

DMS 51-

Für 2D-Fahrzeuge gilt eine ABC-Struktur mit relativ geringer Strukturstreuung (A6.63). Sie weist gewisse Ähnlichkeiten mit den ABCT/ABCL-Strukturen für WG 111 auf, wobei jetzt aber Berg A in drei von vier Fällen dominiert und das vierte Strukturelement T bzw. L fehlt.

DMS 22

Für 2D-Fahrzeuge gilt eine nicht sehr deutlich ausgeprägte ATBT- bzw. ABTCL-Struktur, wobei die Strukturstreuung recht beträchtlich ist (A6.70). Für $v = 20 \dots 65$ km/h besteht eine ziemlich enge Verwandtschaft mit der ATBT-Struktur für WG 01. Ebenfalls mit dieser für WG 01 gültigen Struktur verwandt ist die für MD-Fahrzeuge gültige ATBT-Struktur (A6.71). Allerdings sind die DI-Streuungen hier recht gross.

d) Fahrten mit Brett, Durchbiegungen

WG 01, WG 02

Die Resultate sind hier für die beiden untersuchten Messstellen WG 01 und WG 02 qualitativ gleich. Die eindeutigste Struktur (ATBT) weist der DI-Verlauf für die MD-Fahrzeuge auf: Ein stark ausgeprägter, relativ schmaler ($v = 5 \dots 20$ km/h) und immer massgebender Berg A und ein zweiter, wesentlich schwächer ausgebildeter Berg B bei $v = 40 \dots 55$ km/h (A6.85, A6.88). Die Täler T_{AB} bei $v = 20 \dots 40$ km/h und T_B bei $v = 55 \dots 75$ km/h sind ausgesprochen breit. Etwas aus der Reihe tanzen die Fahrzeuge 25R bei WG 01 und 21R bei WG 02: In beiden Fällen tritt am oberen Ende des Tales T_{AB} eine kleine, aber doch recht markante zusätzliche Spitze auf (ATBCT-Struktur).

Sowohl DI- als auch Strukturstreuung für die verschiedenen MD-Fahrzeuge sind relativ gering. Es fällt auf, dass das Fahrzeug 20R in beiden Berg-Bereichen die kleinsten DI erzeugt.

Entsprechend der Natur der beteiligten Fahrzeuge (24R, 25R) weist der DI-Verlauf für die Serie 2MH und WG 02 eine ähnliche Form auf, wie sie für MD-Fahrzeuge gültig ist (ATB, A6.90, A6.88). Die störenden Einflüsse, die bei den Fahrten ohne Brett eine eindeutige Struktur des DI-Verlaufes verhindern, werden hier offenbar von der konzen-

trierten Wirkung des Brettes übertönt. Verglichen mit den Resultaten für die einzelnen MD-Fahrzeuge, liegen die hier erreichten Spitzenwerte für das DI nur etwa halb so hoch. Daraus ergibt sich (einleuchtend), dass für den Fall 2MH bei rund doppelter quasistatischer Einwirkung die dynamische Einwirkung etwa gleich ist wie für ein einzelnes MD-Fahrzeug.

Formal ähnlich wie für MD-Fahrzeuge, aber wesentlich weniger deutlich ausgeprägt und mit bedeutend grösserer Strukturstreuung, ist der DI-Verlauf für die 2D-Fahrzeuge (A6.84, A6.87). Hier sind ABT-, ATBT-, ATBL- oder ABCT-Strukturen festzustellen. Der Unterschied in der Höhe der beiden Berge A und B/C ist markant geringer als bei den MD-Fahrzeugen. Für WG 01 und die Fahrzeuge 12R und 13R ist Berg B sogar massgebend.

Für die LS-Fahrzeuge ist im Gegensatz zu den Versuchen ohne Brett nun eine gewisse Struktur des DI-Verlaufes erkennbar (A6.86, A6.89). Sie besteht im wesentlichen aus einem nicht besonders prominenten Berg A bei $v = 5 \dots 25$ km/h und einem mehr oder weniger flachen, breiten Tal T_A für $v > 25$ km/h. Berg A ist immer massgebend. Die Strukturstreuung liegt in einem ähnlichen Rahmen wie für die 2D-Fahrzeuge. Es fällt auf, dass Berg A für das Fahrzeug 74R deutlich zweigipflig ist.

e) Fahrten mit Brett, Dehnungen

Die Erscheinung, dass die Wirkung des Brettes jene der DI-Streuungen erzeugenden Faktoren übertönt, ist auch für die Resultate der Dehnungen festzustellen. Lediglich die DI für DMS 32 (A6.91 bis A6.94) bieten immer noch ein relativ wirres Bild.

DMS 42

Für die 2D-Fahrzeuge gilt eine ATBT-Struktur: Berg A bei $v = 5 \dots 12$ km/h, ein schmales Tal T_{AB} bei $v = 18$ km/h, Berg B bei $v = 20 \dots 60$ km/h und Tal T_B bei $v > 60$ km/h (A6.95). Im Gegensatz zum DI-Verlauf bei den Durchbiegungen WG 01/02 ist hier Berg B immer wesentlich höher und auch breiter als Berg A.

Von den MD-Fahrzeugen gilt für 20R und 24R eine ABCL-, für 21R eine ABCT- und für 25R eine ATBL-Struktur. Ausser für das Fahrzeug

25R ist Berg B immer massgebend. Die Strukturstreuungen sind auch für den Bereich des Berges A recht beträchtlich.

Die DI-Struktur für die Serie 2MH ist deutlich ausgebildet und ähnlich wie jene für die MD-Fahrzeuge (A6.98).

DMS 52+

Für DMS 52 fällt auf, dass der DI-Verlauf für DMS+ und DMS- zwar jeweils eine markante Struktur aufweist, dass diese aber für die beiden Fälle überhaupt nicht ähnlich sind. Zwischen den DI-Verläufen für die verschiedenen Fahrzeuggruppen bestehen ebenfalls zum Teil deutliche Unterschiede.

So steigt zum Beispiel das DI+ für alle 2D- und die LS-Fahrzeuge 42R, 74R und 76R in einer L-, TL- oder AL-Struktur ab $v = 20$ km/h praktisch linear mit der Geschwindigkeit an (A6.99, A6.103), während für die MD-Fahrzeuge (und 2MH) sowie die LS-Fahrzeuge 52R und 71R eine ABL(T)-Struktur zu verzeichnen ist (A6.101, A6.105, A6.103). Immerhin scheinen die Berge A und B dieser zuletzt erwähnten Strukturen der vorgenannten L-Struktur überlagert zu sein: Mit steigender Geschwindigkeit nehmen die DI tendenziell zu.

Die Strukturstreuung ist für die 2D-Fahrzeuge relativ gering, und entsprechend der klaren Dominanz des Anstieges L tritt das grösste DI auch bei der höchsten Fahrgeschwindigkeit auf. Bei den MD-Fahrzeugen ist die DI-Streuung vergleichsweise klein, die Strukturstreuung nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit zu. Ausser für das Fahrzeug 24R, wo Berg B massgebend ist, tritt das grösste DI bei maximaler Geschwindigkeit auf. Bei den LS-Fahrzeugen fällt das einzige Fahrzeug mit einer Doppelachse, 52R, deutlich aus dem Rahmen, indem seine DI-Struktur (ABL) einen massgebenden Berg B bei $v = 25...40$ km/h aufweist. Für alle anderen LS-Fahrzeuge tritt das maximale DI entsprechend dem dominanten L-Strukturteil bei der grössten Geschwindigkeit auf.

DMS 52-

Der Verlauf des DI- ist mit einer AT-, ATL-, ABL- oder ABTL-Struktur für alle Fahrzeuggruppen ähnlich (A6.100, A6.102, A6.104, A6.106). Berg A bei $v = 10...20/25$ km/h ist immer vorhanden. Im Bereich von $v = 20/25...$

50 km/h liegt entweder ein Tal T_{AB} oder ein nicht sehr prominenter Berg B und ab $v > 50$ km/h erfolgt ein insbesondere für 2D-Fahrzeuge markanter Anstieg L. Die Strukturstreuung ist für die 2D-Fahrzeuge im Bereich der Berge A und B am grössten, bei den MD-Fahrzeugen im Bereich des Anstieges L.

Mit Ausnahme der Fahrzeuge 11R, 12R, 13R, 42R und 71R, wo das grösste DI im Anstieg L erreicht wird, ist Berg A bei allen Fahrzeugen der 2D-, MD- (auch 2MH) und LS-Gruppe massgebend. Der DI-Verlauf für das Fahrzeug 74R fällt wie schon bei WG 02 durch eine klar zweigipflige Ausbildung des Berges A auf (A6.104).

DMS 22

Die Resultate für DMS 22 können für 2D- und LS-Fahrzeuge am ehesten mit jenen für DMS 52+ verglichen werden: Die DI-Strukturen werden mehr oder weniger deutlich von einem Anstieg L dominiert, wobei die Strukturstreuung für 2D-Fahrzeuge deutlich kleiner ist als für LS-Fahrzeuge (A6.107, A6.109). Ausser für das Fahrzeug 52R, wo Berg B dominiert, treten die grössten DI auch bei diesem Anstieg L auf.

Für MD-Fahrzeuge sind einem einigermaßen linearen Anstieg für $v > 20$ km/h ein markanter Berg A bei $v = 8...20$ km/h und ein schwach ausgebildeter Berg B bei $v = 40...50$ km/h überlagert (A6.108). Berg A ist für die Fahrzeuge 21R und 25R, der Anstieg L für die zwei anderen Fahrzeuge massgebend.

f) Zusammenfassung; Versuche ohne Brett

Je nach Fahrzeuggruppe und Messstelle weist der DI-Verlauf mehr oder weniger stark ausgeprägte Strukturmerkmale auf. Für die Durchbiegungen sind die DI-Verläufe im allgemeinen klarer strukturiert als für die Dehnungen. Die dynamischen Inkremente insbesondere für Querdehnungen werden offenbar stärker von störenden Einflüssen, wie seitlichen Abweichungen der effektiven Fahrachse von ihrer Sollage, beeinflusst als von der dynamischen Interaktion zwischen Fahrzeug und Brücke. Infolge der dementsprechend grossen DI-Streuung sind die zugehörigen DI-Strukturen oft wenig charakteristisch und demnach für Vergleiche nicht geeignet.

Dass das dynamische Inkrement nicht einfach eine Zufallsgrösse ist, zeigen vor allem die

Resultate für die Gruppen 2D und MD, auf die sich die durchgeführte Diskussion im wesentlichen beschränkt. Die Fahrzeuge der LS-Gruppe weisen offenbar so unterschiedliche dynamische Eigenschaften auf, dass die DI-Strukturen nicht untereinander vergleichbar sind. Die DI-Verläufe für die Versuchsserien mit mehreren Fahrzeugen sind ebenfalls meist nicht für Vergleiche geeignet, was wahrscheinlich auf starke Streuungen der Abstände zwischen den Fahrzeugen zurückzuführen ist. Immerhin sind zum Teil Zusammenhänge zwischen den DI-Strukturen für die Serien 2MH, 2MN oder 4MN und jenen für die MD-Fahrzeuge zu erkennen.

Der DI-Verlauf für 2D- und MD-Fahrzeuge weist eine meist recht deutlich ausgebildete Struktur auf. Dabei ist festzuhalten, dass die DI-Strukturen für die Fahrzeuge innerhalb einer Gruppe nicht immer gleich sind, und dass die Strukturstreuung recht erhebliche Ausmasse annehmen kann.

Die DI-Strukturen sind je nach Fahrzeugtyp und Messstelle zum Teil stark voneinander verschieden. Als einzige Gemeinsamkeit weisen sie eine wellenartige Form auf, wobei im Bereich von $v = 5 \dots 20$ km/h immer ein Berg A durchlaufen wird, dessen Spitzenwert jedoch nicht immer massgebend ist. Die Anzahl der zwischen $v = 5$ km/h und $v = 80$ km/h auftretenden Wellenberge bzw. -täler variiert zwischen eins und vier.

Aus Bild 172 geht hervor, dass für 2D-Fahrzeuge bei 7 von 12 untersuchten Messstellen und für MD-Fahrzeuge bei 6 von 12 Messstellen die DI-Strukturen innerhalb der Gruppe für alle Fahrzeuge gleich sind. Dabei fällt auf, dass für eine bestimmte Messstelle diese Fahrzeugunabhängigkeit zwar für 2D-, nicht aber für MD-Fahrzeuge gegeben sein kann, und umgekehrt. Beispielsweise gilt von den Durchbiegungen nur für WG 22, dass die DI-Strukturen sowohl für 2D- als auch für MD-Fahrzeuge fahrzeugunabhängig sind.

Da horizontale Strukturstreuungen nicht mit Sicherheit identifiziert werden konnten, beschränkt sich die Diskussion auf vertikale Strukturstreuungen. Die Strukturstreuung der DI-Verläufe ist von der Homogenität der Fahrzeuggruppe abhängig. Die kleinste Streuung weist die Gruppe der MD-Fahrzeuge auf, gefolgt von jener der 2D-Fahrzeuge.

Die Strukturstreuung innerhalb einer Fahrzeuggruppe nimmt im allgemeinen mit der Fahrgeschwindigkeit zu. Die DI-Streuung für

ein einzelnes Fahrzeug nimmt dagegen meist mit steigender Fahrgeschwindigkeit ab.

Anhand der DI-Strukturen kann noch der Frage etwas detaillierter nachgegangen werden, ob es innerhalb der 2D- und der MD-Fahrzeuggruppen ein dynamisch kritisches Fahrzeug gebe. Dazu wurde für jedes Strukturelement vom Typ "Berg" oder "Anstieg" das Fahrzeug mit dem grössten und jenes mit dem zweitgrössten DI bestimmt. Verteilt man reziprok die Gewichte 2 und 1, ergeben sich für die 29 bzw. 36 untersuchten Elemente der DI-Strukturen für 2D- bzw. MD-Fahrzeuge folgende Punktzahlen:

	11R	12R	13R	14R
Durchbiegungen:	0	10	9	26
Dehnungen :	7	4	6	25
Total :	7	14	15	51

	20R	21R	24R	25R
Durchbiegungen:	3	30	6	30
Dehnungen :	3	8	10	18
Total :	6	38	16	48

Daraus ist ersichtlich, dass das Fahrzeug 14R wesentlich häufiger massgebende dynamische Reaktionen erzeugte als die 2D-Fahrzeuge 12R und 13R, die etwa gleichwertig sind, und vor allem als 11R, das deutlich abfällt. Bei den MD-Fahrzeugen führt 25R leicht vor 21R, während 24R und vor allem 20R deutlich weniger oft massgebende dynamische Reaktionen hervorriefen. Eine gewisse Rangfolge in der dynamischen Wirksamkeit ist demnach durchaus vorhanden. Es gibt jedoch weder ein Fahrzeug, das immer, noch ein solches, das nie massgebend wäre.

Die Untersuchung der DI-Strukturen zeigt ferner deutlich, dass die recht weit verbreitete Annahme sicher nicht allgemein gültig ist, die dynamische Wirksamkeit eines Fahrzeuges nehme mit der Fahrgeschwindigkeit zu.

g) Zusammenfassung; Versuche mit Brett

Für Fahrten mit Brett und die Fahrzeuggruppen 2D und MD weisen die DI-Verläufe mit Ausnahme jenes für DMS 32 sowohl für Durchbiegungen als auch für Dehnungen markante Strukturen auf. Ebenfalls ist nun auch bei den DI-Verläufen für die LS-Fahrzeuge und die Serie mit mehreren Fahrzeugen 2MH eine gewisse Strukturierung festzustellen.

Die DI-Strukturen sind jetzt nicht mehr allgemein wellenförmig: Für einige Dehnungen

	2D	MD	LS	2LH	2MH	4MH	2MN	4MN
WG 82	ATB ABC AT	ATB ABL ATBL					ABTL	
WG 01	ATBT	ATBL ABCL			ATBT			
WG 02	ATB	ATB ATBL ABCL						
WG 111	ABCT	ABCT ABCL			ABCT			
WG 112	ATB ATBC	ATB ATBL ABCL ABCT						
WG 101		ATBT			ATB		ATB	ATB
WG 102		ATBT	ATBT	ATBT	ATBT	ATBT	ATBT	ATBT
WG 22	ABC	AB					TL	TL
	2D	MD	LS	2LH	2MH	4MH	2MN	4MN
DMS 42	AT LAL LAB							
DMS 52+	TA ALB	AB			AB		AL	AL
DMS 52-	ATB	AB ATL						
DMS 51+	ATL						AL	AL
DMS 51-	ABC	ABC						
DMS 22	ATBC ABTCL	ATBT						
	2D	MD	LS	2LH	2MH	4MH	2MN	4MN

Bild 172a: Tabelle der DI-Strukturen (Parameter Fahrzeuggruppe). Fahrten ohne Brett, Reifendruck 10 bar, Belag A.

ist ein praktisch linearer Anstieg des DI mit der Fahrgeschwindigkeit festzustellen. Ausnahmsweise wäre hier die vorgenannte Annahme bezüglich der Geschwindigkeitsabhängigkeit des DI richtig. Gerade die DI-Verläufe für die Durchbiegungen und MD-Fahrzeuge, wo ebenfalls grosse DI erreicht werden, widerlegen die Allgemeingültigkeit dieser Annahme jedoch sehr deutlich.

Für Versuche mit Brett sind die DI-Strukturen innerhalb der 2D- und MD-Gruppen nur noch ausnahmsweise fahrzeugunabhängig: Für beide Gruppen trifft dies für eine von sechs untersuchten Messstellen, jeweils eine Dehnung, zu.

Anders als bei den Fahrten ohne Brett ist hier die Strukturstreuung für tiefere Geschwindigkeiten grösser als für höhere. Wiederum fallen die MD-Fahrzeuge durch eine geringe Strukturstreuung auf. Die DI-Streuung ist allgemein kleiner als für Fahrten ohne Brett.

Geht man wie für die Versuche ohne Brett der Frage nach, ob eines der 2D- bzw. MD-Fahrzeuge dynamisch kritischer sei als die anderen, ergibt sich folgendes Bild:

	11R	12R	13R	14R
Durchbiegungen:	2	1	2	10
Dehnungen :	2	6	6	7
Total :	4	7	8	17

	20R	21R	24R	25R
Durchbiegungen:	0	8	1	9
Dehnungen :	6	13	5	12
Total :	6	21	6	21

Wiederum erzeugt das Fahrzeug 14R offensichtlich wesentlich häufiger massgebende dynamische Reaktionen als die 2D-Fahrzeuge 12R und 13R, die etwa gleichwertig sind, und als 11R, das deutlich abfällt. Von den MD-Fahrzeugen sind 25R und 21R sowie 20R und 24R gleich kritisch, wobei 21R und 25R deutlich öfter massgebende dynamische Reaktionen hervorrufen als die beiden anderen Fahrzeuge.

	2D	MD	LS	2LH	2MH	4MH	2MN	4MN
WG 01	ABT ATBT ATBL	ATBT ATBCT	AT ATL ATBT					
WG 02	ATBT ABT ABCT	ATBT ATBCT	AT	ATB				
	2D	MD	LS	2LH	2MH	4MH	2MN	4MN
DMS 42	ATBT	ATBL ABCT ABCL		ATBT				
DMS 52+	TL L	ABL	L AL	ABL				
DMS 52-	ABL ATL	ABL ATL ABTL	AT ATL	ABL				
DMS 22	TL TLT	ABL ABT ALBT						
	2D	MD	LS	2LH	2MH	4MH	2MN	4MN

Bild 172b: Tabelle der DI-Strukturen (Parameter Fahrzeuggruppe). Fahrten mit Brett, Reifendruck 10 bar, Belag A.

3.76 Der Einfluss des Reifendruckes

a) Allgemeines

Im Anhang 7 sind die $\phi(v)$ -Funktionen zusammengestellt, die eine Untersuchung des Einflusses des Reifendruckes auf den Verlauf des dynamischen Inkrementes ϕ oder DI über die Fahrgeschwindigkeit v erlauben. Der Parameter Belag (A) ist dabei konstant gehalten. Bezüglich der Fahrzeuge sind von folgenden Versuchsserien Resultate gegeben:

2D-Fahrzeuge Nr. 11R: 10, 8, 6 bar
 12R: 10, 6 bar
 13R: 10, 8, 6 bar (8 bar
 nur für AoA und KoA)

MD-Fahrzeuge Nr. 20R: 10, 6 bar
 25R: 10, 6 bar

LS-Fahrzeuge Nr. 42R: 10, 6 bar
 52R: 10, 6 bar
 71R: 10, 6 bar
 74R: 10, 6 bar
 76R: 10, 6 bar

In Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen bezüglich Fahrachse und Brett (Bild 124) sind im allgemeinen Darstellungen für die folgenden Instrumente gegeben:

AoA: WG 82, WG 02, WG 22; DMS 42, DMS 52;

KoA: WG 01; DMS 22;

AmA: WG 02; DMS 42, DMS 52;

KmA: WG 01; DMS 22;

Der Anhang 7 ist so gegliedert, dass zunächst die Resultate für Fahrten ohne (A7.1 bis A7.80), dann diejenigen für Fahrten mit Brett (A7.81 bis A7.140) gezeigt werden. Für die erwähnten Messstellen folgen jeweils nacheinander die Darstellungen für die verschiedenen Fahrzeuge. Die Hierarchie in der Reihenfolge der Messstellen ist die gleiche, wie sie im Anhang 4, "Tabellen der maximalen dynamischen Inkremente", verwendet wird. Darstellungen, die keine klaren DI-Strukturen erkennen lassen, werden nicht im einzelnen diskutiert. In Bild 173 sind die besprochenen DI-Strukturen tabellarisch zusammengestellt.

b) Fahrten ohne Brett, Durchbiegungen

WG 82

Die Unterschiede in den DI-Strukturen für die drei 2D-Fahrzeuge gehen aus den Bildern

A7.1 bis A7.3 etwas klarer hervor als aus Bild A6.1, das im vorangehenden Abschnitt 3.74 diskutiert worden ist. Die Beziehung zwischen der dynamischen Reaktion der Brücke und der Fahrgeschwindigkeit ist insbesondere für höhere Geschwindigkeiten stark vom Fahrzeug abhängig. Für das Fahrzeug 13R gilt eine AT-, für 11R eine ATB- und für 12R eine ABC-Struktur, wobei für 11R Berg B, für 12R und 13R aber Berg A dominieren.

Für das Fahrzeug 11R ist der Einfluss des Reifendruckes verhältnismässig einfach, indem insbesondere in den Berg-Bereichen für höheren Druck auch höhere DI resultieren (A7.1). Beim Fahrzeug 12R gilt dies nur für $v < 45$ km/h, während für $v > 45$ km/h (Berg C) das maximale DI für hohen Druck kleiner ist als für tiefen Druck (A7.2). Ähnliches gilt für das Fahrzeug 13R, wobei die Geschwindigkeitsgrenze jetzt bei $v = 30$ km/h liegt (A7.3).

Für die beiden MD-Fahrzeuge sind die DI-Strukturen wenig ausgeprägt (A7.4, A7.5). Wie für die LS-Fahrzeuge auch, spielt dabei der Umstand eine Rolle, dass hier die Anzahl durchgeführter Versuche und das dabei verwendete Geschwindigkeitsinkrement eine sichere Identifikation komplizierterer Strukturen nicht immer erlauben. Für das Fahrzeug 20R gilt eine ATB-Struktur mit relativ geringem Einfluss des Reifendruckes, für 25R eine ATBL-Struktur, wobei Berg B nur für hohen Reifendruck auftritt (ATL-Struktur für niedrigen Druck) und hoher Druck bei Berg A deutlich massgebend ist. Ebenfalls bei Berg A ist eine geringfügige horizontale Spitzenverschiebung um rund 2 km/h festzustellen.

Für die LS-Fahrzeuge sind die Verhältnisse uneinheitlich (A7.6 bis A7.10). Für das Fahrzeug 52R gilt eine gut ausgeprägte ABL-Struktur, wobei der Einfluss des Reifendruckes auf die vertikale Struktursteuerung mit Ausnahme des dominanten Anstieges L gering ist (niedriger Druck massgebend). Bei den Spitzen der jeweils für beide Drücke praktisch gleich hohen Berge A und B tritt eine Horizontalverschiebung von 3...5 km/h auf.

Für die Sattelschlepper 74R und 76R gilt eine ATL-Struktur, wobei der viergipflige Berg A für 74R und der Anstieg L für 76R besonders gut ausgeprägt sind. Der Einfluss des Reifendruckes ist wenig markant. Für das Fahrzeug 42R gilt eine undeutliche AT-, für 71R eine ebensolche A-Struktur. Für 71R ist hoher Reifendruck meist massgebend.

Im Gegensatz zu sämtlichen anderen Fahrzeugen treten für 52R und 74R die maximalen DI bei niedrigem Reifendruck auf.

WG 01

Mit einer Ausnahme liegt für alle drei 2D-Fahrzeuge immer eine ATBT-Struktur vor (A7.11 bis A7.13): Für 11R und tiefen Reifendruck ist das Tal T_{AB} zu schmal ausgebildet (ABT-Struktur). Weitere Unterschiede in den DI-Verläufen sind insofern vorhanden, als für die Fahrzeuge 11R und 12R Berg A, für 13R aber Berg B massgebend ist. Der Einfluss des Reifendruckes ist für alle Fahrzeuge bei tieferen Geschwindigkeiten grösser als bei hohen. Ansonsten ist er uneinheitlich: Nur für das Fahrzeug 11R wird das grösste DI bei tiefem Druck erreicht.

Für die beiden MD-Fahrzeuge gilt meist eine ATBL-Struktur (A7.14, A7.15). Der Einfluss des Reifendruckes tritt insofern klar in Erscheinung, als bei $v = 30...60$ km/h für das Fahrzeug 25R und einen Druck von 10 bar deutlich zwei Berge (ABCL-Struktur), für 6 bar aber ebenso deutlich nur ein einziger Berg auftritt (ATBL-Struktur). Berg B und Anstieg L sind im Gegensatz zu 20R beim Fahrzeug 25R wesentlich markanter als Berg A. Für beide Fahrzeuge tritt jedoch das maximale DI bei Berg B und für tiefen Reifendruck auf. Ebenso ist für beide Fahrzeuge für die Spitze des Berges B eine Horizontalverschiebung von rund 5 km/h zu registrieren.

Die DI-Verläufe für die beiden LS-Fahrzeuge 42R und 52R weisen eine ABT-Struktur auf, wobei Berg B deutlich dominiert (A7.16, A7.17). Der Einfluss des Reifendruckes ist relativ gering. Von den weiteren LS-Fahrzeugen weisen 76R bzw. 71R eine markante ABTL- bzw. ABTCL-Struktur auf (A7.18, A7.20). Für 71R ist der tiefe, für 76R der hohe Reifendruck massgebend. Für 76R ist eine kleine horizontale Verschiebung der Bergspitzen A und B in Abhängigkeit vom Reifendruck festzustellen.

Beim Fahrzeug 74R beeinflusst der Reifendruck nicht nur die Grösse des DI, sondern auch die Struktur des DI-Verlaufes (A7.19). Klare Aussagen sind nicht möglich, da die Anzahl der Messpunkte zu klein ist, um den offensichtlich komplexen Verlauf des DI erfassen zu können.

WG 02

Für die drei 2D-Fahrzeuge gilt eine ATB-Struktur, allerdings mit unterschiedlicher Dominanz der beteiligten Berge A und B (A7.21 bis A7.23). Berg A ist immer dominant für das Fahrzeug 11R, für 12R nur bei hohem Reifendruck und für 13R gar nicht. Der Einfluss des Reifendruckes ist nur für das Fahrzeug 12R deutlich ausgeprägt. Dabei ist bei Berg A hoher, bei Berg B aber tiefer Druck massgebend. Bei Berg B ist eine kleine horizontale Verschiebung der Spitze festzustellen. Ausgesprochen klein ist der Einfluss des Reifendruckes im Bereich des Berges B für das Fahrzeug 13R.

Die beiden MD-Fahrzeuge 20R bzw. 25R weisen eine ATB- bzw. eine ATBL-Struktur mit jeweils dominantem Berg B auf (A7.24, A7.25). Der Einfluss des Reifendruckes ist vergleichsweise klein.

Die DI-Verläufe für die beiden LS-Fahrzeuge 42R bzw. 52R weisen eine deutlich ausgebildete ATB- bzw. AB-Struktur auf, wobei die Bedeutung der beiden Berge wesentlich ausgeglichener ist als für WG 01 (A7.26, A7.27). Ebenfalls für beide Fahrzeuge gilt, dass der Reifendruck bei Berg A einen grösseren Einfluss ausübt als bei Berg B, und dass hoher Druck praktisch immer massgebend ist.

Von den übrigen LS-Fahrzeugen gilt für 76R eine ATBL- und für 71R eine ABTCL-Struktur (A7.30, A7.28). Ausser für Berg A bei 71R, wo tiefer Druck deutlich massgebend ist, bleibt der Einfluss des Reifendruckes im allgemeinen gering. Für das Fahrzeug 76R sind für die Spitzen der Berge A und B gegenläufige Horizontalverschiebungen in der Grösse von rund 3 km/h festzustellen. Das Fahrzeug 74R (ABCDL- bzw. ABCL-Struktur für hohen bzw. niedrigen Reifendruck) fällt dadurch auf, dass die DI für tiefen Reifendruck fast durchwegs massgebend sind (A7.29).

WG 22

Für alle drei 2D-Fahrzeuge gilt eine praktisch identische ABC-Struktur, wobei Berg B mehr oder weniger stark dominiert und hoher Reifendruck fast immer massgebend ist (A7.31 bis A7.33). Der vertikale Einfluss des Reifendruckes ist unterschiedlich. Gross ist er im Bereich des Berges A für das Fahrzeug 12R, mittel im Bereich des Berges A für 13R, des Berges B für 11R und 13R sowie

des Berges C für 11R, und schwach ist er in den übrigen Bereichen.

Für die beiden MD-Fahrzeuge gilt eine AB-Struktur, wobei Berg B wesentlich breiter und höher ist als Berg A (A7.34, A7.35). Der Einfluss des Reifendruckes ist meist nicht sehr gross. Lediglich im Bereich des Berges B für das Fahrzeug 20R ist hoher Druck deutlich massgebend.

Von den LS-Fahrzeugen gilt für 52R und 76R eine recht deutlich ausgeprägte ABT-Struktur mit dominantem Berg B (A7.37, A7.40). Mit Ausnahme des Berges B für das Fahrzeug 52R, wo hoher Druck deutlich massgebend ist, bleibt der vertikale Einfluss des Reifendruckes relativ klein. Für das Fahrzeug 74R gilt eine ATB-Struktur mit dominantem Berg B, wobei der Einfluss des Reifendruckes vergleichsweise klein ist (A7.39). Wiederum fällt auf, dass wie für WG 02 für dieses Fahrzeug tiefer Druck fast durchwegs massgebend ist. Die Struktur des DI-Verlaufes für die Fahrzeuge 42R bzw. 71R kann mit ABCD bzw. ABCT angegeben werden (A7.36, A7.38). Der Einfluss des Reifendruckes ist unterschiedlich. Hoher Druck ist deutlich massgebend bei Berg A für 42R und bei Berg B für 71R.

c) Fahrten ohne Brett, Dehnungen

Was bereits im vorangehenden Abschnitt 3.75 erwähnt wurde, gilt auch hier: Die DI-Verläufe sind oft nicht klar strukturiert, so dass eine eingehende Diskussion dann nicht sinnvoll ist (A7.41 bis A7.80).

DMS 52+

Für die 2D-Fahrzeuge gilt meist eine TA-Struktur, wobei Berg A erst bei einer Geschwindigkeit von $v = 35...50$ km/h beginnt und die DI für kleinere Geschwindigkeiten praktisch gleich Null sind (A7.51, A7.53, A7.55). Die Strukturstreuung im Bereich des Berges A ist recht gross. Für das Fahrzeug 12R und tiefen Druck existiert Berg A gar nicht (T-Struktur).

Für die beiden MD-Fahrzeuge gilt eine recht klare ATB-Struktur mit dominantem Berg B (A7.57, A7.59). Mit Ausnahme von Berg B für 20R und Berg A für 25R, wo hoher Reifendruck deutlich massgebend ist, bleibt der Einfluss des Druckes klein.

Ebenfalls recht deutlich ausgebildet sind die DI-Strukturen für die LS-Fahrzeuge 52R und 74R (AB, A7.63; ATL, A7.67). Der Einfluss des Reifendruckes ist relativ gering. Mit Ausnahme des Berges B für 74R ist hoher Reifendruck massgebend.

DMS 52-

Für alle 2D-Fahrzeuge gilt eine ATB-Struktur, wobei Berg A nur für 11R und hohen Reifendruck massgebend ist (A7.52, A7.54, A7.56). Wiederum ist der Einfluss des Reifendruckes für das Fahrzeug 12R und Berg A besonders ausgeprägt: Dieser Berg verschwindet beinahe für geringen Druck. Im übrigen bleibt der Einfluss des Reifendruckes insbesondere im Bereich der Berge B gering. Das Fahrzeug 13R fällt dadurch auf, dass tiefer Druck über den ganzen Geschwindigkeitsbereich massgebend ist.

Für die beiden MD-Fahrzeuge gilt eine AB- (20R, A7.58) bzw. eine ATL-Struktur (25R, A7.60) mit deutlich dominantem Berg B bzw. Anstieg L. Der Einfluss des Reifendruckes ist vergleichsweise gering.

Für die LS-Fahrzeuge 52R, 71R und 76R gilt eine ATB-Struktur mit dominantem Berg B (A7.64, A7.66, A7.70). Der Reifendruck hat im Bereich des Berges A, wo hoher Druck massgebend ist, einen grösseren Einfluss als im Bereich des Berges B. Bei Berg B ist für die Fahrzeuge 71R und 76R tiefer Druck massgebend. Für das Fahrzeug 74R gilt eine ATL-Struktur mit geringem Einfluss des Reifendruckes (A7.68).

DMS 22

Für die 2D-Fahrzeuge 12R und hohen Druck bzw. 13R gilt eine ABTCL- bzw. ATBC-Struktur mit meist moderatem Einfluss des Reifendruckes (A7.72, A7.73). Einzig für das Fahrzeug 12R und hohe Geschwindigkeiten wirkt sich der Druck auf die Struktur aus, indem für $v > 55$ km/h und hohen Druck ein Anstieg L vorhanden ist (ABTCL-Struktur), für tiefen Druck die DI aber auf dem Niveau des Tales T_C bleiben (ABTCT-Struktur). Bei diesem Fahrzeug sind im Bereich der Bergspitzen B und C kleine, gegenläufige horizontale Verschiebungen in Abhängigkeit vom Reifendruck festzustellen.

Bei der ATBT-Struktur mit dominantem Berg B (tiefer Druck massgebend), die für das MD-

Fahrzeug 25R gilt, ist für die Spitze dieses Berges eine Horizontalverschiebung von rund 3 km/h festzustellen (A7.75).

Von den LS-Fahrzeugen gilt für 42R und 76R eine ABL-Struktur (A7.76, A7.80). Für 42R dominiert dabei Berg B, für 76R ist der Anstieg L sehr markant ausgebildet. Mit Ausnahme des Berges A für 42R, wo tiefer Druck recht deutlich massgebend ist, ist der Einfluss des Reifendruckes vergleichsweise gering.

d) Fahrten mit Brett, Durchbiegungen

WG 01

Für die 2D-Fahrzeuge gelten zwar ähnliche, trotzdem aber unterschiedliche Strukturen: ATBT für 11R, ABT für 12R und ATBL für 13R (A7.81 bis A7.83). Für das Fahrzeug 11R dominiert Berg A, für 12R und 13R Berg B. Hoher Reifendruck ist immer massgebend, wobei im Bereich des Berges A der Einfluss des Reifendruckes relativ gering ist. Betreffend den Berg B sind die Verhältnisse unterschiedlich: für die Fahrzeuge 11R und 12R ist der Einfluss des Druckes mässig, für 13R aber gross. Für 13R und 10 bar erreicht das DI bei Berg B 155% des für 6 bar gültigen Wertes.

Von den beiden MD-Fahrzeugen gilt für 20R eine ABT-, für 25R eine ATBCT-Struktur für hohen und eine ATBT-Struktur für tiefen Reifendruck (A7.84, A7.85). In allen Fällen ist Berg A wesentlich markanter ausgeprägt als Berg B. Für das Fahrzeug 25R wirkt sich der Reifendruck im Geschwindigkeitsbereich $v = 30...50$ km/h deutlich auf die DI-Struktur aus (zwei Berge für hohen, nur ein Berg für tiefen Reifendruck). Hoher Reifendruck ist immer massgebend, wenn auch in nicht besonders grossem Ausmass.

Für die beiden LS-Fahrzeuge 42R bzw. 52R gilt eine ABL- bzw. eine ATBT-Struktur (A7.86, A7.87). Während für 42R die Berge A und B fast gleich hoch sind, dominiert für 52R Berg A deutlich. Für 42R ist hoher Reifendruck immer recht deutlich massgebend, für 52R ist der Einfluss des Reifendruckes gering.

Für die Sattelschlepper 71R und 74R gilt eine AT-Struktur (A7.88, A7.89). Der Einfluss des Reifendruckes ist meist relativ gering, wobei hoher Reifendruck immer massgebend ist. Berg A ist dominant und für das Fahrzeug 74R sowie für 71R und hohen Druck

wiederum deutlich zweigipflig ausgebildet. Beim zweiten dieser Gipfel ist der vertikale Einfluss des Reifendruckes grösser als üblich. Für den Sattelschlepper 76R gilt eine ATL-Struktur, wobei das Tal T_A sehr breit ist und der Anstieg L erst bei $v > 60$ km/h erfolgt (A7.90). Der Einfluss des Reifendruckes ist gering; hoher Druck ist massgebend.

WG 02

Für die beiden 2D-Fahrzeuge 11R bzw. 12R gilt eine ATBT- bzw. ABT-Struktur (A7.91, A7.92). Berg A ist immer dominant, Berg B ist für 11R relativ schwach ausgeprägt, und der Einfluss des Reifendruckes ist nicht sehr gross. Meist ist hoher Druck massgebend. Für das Fahrzeug 13R sind die Verhältnisse etwas komplizierter: Für hohen Reifendruck gilt eine ABCI-, für niedrigen Druck eine ABT-Struktur (A7.93). Berg C existiert für niedrigen Druck praktisch nicht, womit auch schon gesagt ist, dass in diesem Bereich, $v = 40...60$ km/h, der Einfluss des Reifendruckes gross ist. In den übrigen Bereichen ist er durchschnittlich, wobei hoher Druck immer massgebend ist.

Für die beiden MD-Fahrzeuge gilt eine ATBT-Struktur mit deutlich dominantem Berg A (A7.94, A7.95). Der Einfluss des Reifendruckes ist durchschnittlich, wobei hoher Druck immer massgebend ist.

Mit Ausnahme des Fahrzeuges 42R sind die DI-Strukturen für alle LS-Fahrzeuge eng mit jenen verwandt, die für WG 01 gelten: ABT- für 52R, AT- für 71R und 74R sowie ATL-Struktur für 76R (A7.97 bis A7.100). Dabei fällt wiederum die zweigipflige Ausbildung des Berges A für die Fahrzeuge 71R (bei hohem Druck) und 74R auf. Der Einfluss des Reifendruckes ist gering bis durchschnittlich. Mit Ausnahme des Berges A für das Fahrzeug 52R ist hoher Reifendruck massgebend. Bei der Spitze dieses Berges ist eine deutliche Horizontalverschiebung festzustellen.

Für das Fahrzeug 42R gilt für hohen Reifendruck eine ABC-, für tiefen Druck eine ATBT-Struktur (A7.96). Verglichen mit der für WG 01 gültigen Struktur sind anstelle des dort bedeutenden Berges B ein bzw. zwei schwach ausgeprägte Berge B bzw. B und C vorhanden. Berg A dominiert dadurch vergleichsweise deutlich. Der Einfluss des Reifendruckes ist durchschnittlich, wobei hoher Druck immer massgebend ist.

e) Fahrten mit Brett, Dehnungen

DMS 42

Für alle drei 2D-Fahrzeuge gilt eine ATBT-Struktur, wobei das Tal T_B auf hohem Niveau liegt (A7.101 bis A7.103). Der Einfluss des Reifendruckes ist unterschiedlich. Er ist sehr klein für Berg A und Fahrzeug 11R sowie Berg B und 12R, beträchtlich für Berg B und 13R und durchschnittlich in den anderen Bereichen. Mit Ausnahme des Berges A für die Fahrzeuge 11R und 12R ist hoher Reifendruck massgebend.

Von den beiden MD-Fahrzeugen gilt für 25R eine klare ATBL-Struktur (A7.105). Ein Einfluss des Reifendruckes ist nur bei Berg A erkennbar (hoher Druck massgebend). Beim Fahrzeug 20R bewirkt unterschiedlicher Reifendruck nicht nur strukturelle Streuungen, sondern Änderungen an der Struktur selber: Für tiefen Druck gilt eine AL-, für hohen Druck eine ABCL-Struktur (A7.104). Ausser beim gemeinsamen Berg A, wo der Einfluss des Reifendruckes gering ist, liegen die DI für hohen Druck zum Teil beträchtlich über jenen für tiefen Druck.

Für die LS-Fahrzeuge gelten unterschiedliche DI-Strukturen (A7.106 bis A7.110). Für das Fahrzeug 52R und hohen Reifendruck gilt eine ABC-, für tiefen Druck jedoch eine ABL-Struktur mit nicht sehr prominentem Anstieg L. Ausser im Bereich des gemeinsamen Berges A, wo der Einfluss des Reifendruckes gering ist, ist hoher Druck deutlich massgebend.

Für die drei Sattelschlepper gelten ähnliche, aber nicht ganz identische Strukturen: ABT für 71R, ABC für 74R und ATB/ABL für 76R. Gemeinsam ist, dass die massgebenden DI im Bereich der Berge B oder C bei $v > 35$ km/h auftreten, wobei in diesem Bereich hoher Reifendruck deutlich (76R) bis sehr deutlich massgebend ist (71R, 74R). Im Bereich des Berges A bleibt der Einfluss des Reifendruckes für die Fahrzeuge 71R und 74R gering. Für 76R ist dort tiefer Druck recht deutlich massgebend.

DMS 52+

Für die 2D-Fahrzeuge gilt eine einfache TL-Struktur, wobei die DI für $v < 20$ km/h sehr klein sind (A7.111, A7.113, A7.115). Der Einfluss des Reifendruckes erscheint hier besonders einfach, indem zwischen Druck und DI Proportionalität besteht.

Von den beiden MD-Fahrzeugen gelten für 20R eine ABL/ABLT- und für 25R und beide Reifendrücke eine eng damit verwandte ABLT-Struktur (A7.117, A7.119). Der Unterschied zwischen der ABL- und der ABLT-Struktur entsteht dadurch, dass in drei von vier Fällen für $v > 50$ km/h der Anstieg L nicht fortgesetzt wird, sondern ein auf allerdings hohem Niveau liegender Talbereich T folgt. Hoher Reifendruck ist massgebend, besonders deutlich im eben erwähnten Geschwindigkeitsbereich.

Für die LS-Fahrzeuge werden die DI-Strukturen durch einen mehr oder weniger sauber ausgebildeten Anstieg L geprägt (A7.121 bis A7.129). Deutlich erkennbar ist dieser Anstieg für das Fahrzeug 42R, hohen Reifendruck und $v > 20$ km/h (TL-Struktur). Für tiefen Reifendruck beginnt der Anstieg bereits bei $v = 5$ km/h, bricht dann aber bei $v = 40$ km/h ab (LT-Struktur), so dass sich die beiden DI-Verläufe bei $v = 40$ km/h schneiden: Für $v < 40$ km/h ist tiefer, für $v > 40$ km/h hoher Reifendruck massgebend. Beim Fahrzeug 52R sind der L-Struktur ein kleiner Berg A (nur für hohen Druck) und ein markanter Berg B bei $v = 25...35$ km/h überlagert. Hier handelt es sich um eine ABL-Struktur (ABLT für tiefen Druck), die eng mit der für die MD-Fahrzeuge gültigen Struktur verwandt ist. Hoher Reifendruck ist hier immer massgebend.

Für die Sattelschlepper wird die L-Struktur von einem bereits für 52R festgestellten, kleinen Berg A überlagert (AL-Struktur, 76R nur für hohen Druck). Nur für 71R tritt zusätzlich ein nicht sehr prominenter Berg B auf (ABL-Struktur). Im Bereich des Berges A spielt der Reifendruck mit Ausnahme des Fahrzeuges 76R (Strukturveränderung) eine nur unwesentliche Rolle. In den übrigen Bereichen ist hoher Reifendruck immer deutlich massgebend.

DMS 52-

Für 2D-Fahrzeuge gilt eine allerdings nicht immer voll ausgebildete ABL-Struktur (A7.112 bis A7.116). So existiert Berg B für das Fahrzeug 11R gar nicht (ATL), für 12R nur für hohen Reifendruck und für 13R für hohen und tiefen Druck. Im Bereich des Berges A ist der Einfluss des Reifendruckes dagegen nicht sehr ausgeprägt. Die grössten DI treten beim Anstieg L auf, wo Reifendruck und DI ungefähr proportional sind.

Von den beiden MD-Fahrzeugen gilt für 20R eine ABL-, für 25R eine ABTL/ATL-Struktur (A7.118, A7.120). Berg B ist insbesondere für tiefen Reifendruck recht schwach bzw. gar nicht ausgebildet. Für 25R dominiert Berg A stärker als für 20R, wo auch beim Anstieg L vergleichsweise grosse DI erreicht werden. Hoher Reifendruck ist immer recht deutlich massgebend.

Für die LS-Fahrzeuge gilt mit Ausnahme des Sattelschleppers 76R (AT/AB-Struktur) überall eine ATL-Struktur (A7.122 bis A7.130). Für die Fahrzeuge 52R, 74R und 76R ist Berg A und hoher Reifendruck massgebend, für 71R ebenfalls hoher Druck, aber beim Anstieg L. Ausser für das Fahrzeug 76R ist der Einfluss des Reifendruckes für höhere Geschwindigkeiten grösser als für tiefere. Wiederum ist Berg A für das Fahrzeug 74R deutlich zweigipflig ausgebildet. Das Fahrzeug 42R fällt

wiederum dadurch auf, dass sich die DI-Verläufe für hohen und niedrigen Druck bei $v \sim 40$ km/h schneiden. Für $v < 40$ km/h ist tiefer Druck deutlich massgebend, für $v > 40$ km/h hoher Druck.

DMS 22

Für 2D-Fahrzeuge gilt im wesentlichen eine TL-Struktur, die aber bei $v = 5$ km/h bereits auf einem deutlich von Null verschienenen Niveau beginnt (A7.131 bis A7.133). Der Einfluss des Reifendruckes ist beachtlich, wobei hoher Druck mit Ausnahme des Bereiches $v = 10...20$ km/h immer deutlich massgebend ist.

Von den beiden MD-Fahrzeugen gilt für 20R sowie für 25R und tiefen Druck eine ABL-, für 25R und hohen Druck eine ABT-Struktur

			11R	12R	13R	20R	25R	42R	52R	71R	74R	76R
WG	82	h t	ATB	ABC	AT	ATB	ATBL ATL	AT	ABL	A	ATL	ATL
WG	01	h t	ATBT ABT	ATBT	ATBT	ATBL	ABCL ATBL	ABT	ABT	ABTCL		ABTL
WG	02	h t	ATB	ATB	ATB	ATB	ATBL	ATB	AB	ABTCL	ABTL ABCL	ATBL
WG	22	h t	ABC	ABC	ABC	AB	AB	ABCD	ABT	ABCT	ATB	ABT
			11R	12R	13R	20R	25R	42R	52R	71R	74R	76R
DMS	42	h t	AT ATBL	LAL	LAB			TL T	A	TATB		T ABL
DMS	52+	h t	TA	TA T	TA	AB	AB		AB	ATB TATB	ATL	ATBL
DMS	52-	h t	ATB	ATB TATB	ATB	AB	ATL		ATB	ATB	ATL	ATB
DMS	22	h t		ABTCL ABTCT	ATBC		ATBT	ABL				ABL
			11R	12R	13R	20R	25R	42R	52R	71R	74R	76R

Bild 173a: Tabelle der DI-Strukturen (Parameter Reifendruck). Fahrten ohne Brett, Belag A. Wo eine DI-Struktur nur für hohen Reifendruck angegeben ist, gilt für tiefen Druck die gleiche Struktur wie für hohen Druck. h = hoher Reifendruck (10 bar), t = tiefer Reifendruck (6 bar).

(A7.134, A7.135). Der Einfluss des Reifendruckes ist in beiden Fällen beim Anstieg L am grössten, und hoher Druck ist immer massgebend.

Von den LS-Fahrzeugen gelten für 42R ähnliche Ergebnisse wie für die 2D-Fahrzeuge (A7.136 bis A7.140): L-Struktur mit Beginn auf einer gewissen Höhe, hoher Druck massgebend. Für das Fahrzeug 52R gilt eine ABC-, für 71R eine ALT- und für 76R eine AL/ATL-Struktur. Berg A ist dabei für 52R, der Anstieg L für die beiden Sattelschlepper massgebend, in allen drei Fällen bei hohem Reifendruck. Für das Fahrzeug 74R gilt mit ABCDL eine relativ komplexe Struktur. Für alle LS-Fahrzeuge gilt, dass der Einfluss des Reifendruckes mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit zunimmt.

f) Zusammenfassung; Versuche ohne Brett

Soweit vorhanden, werden die DI-Strukturen als solche vom Reifendruck nur relativ selten in wesentlichem Mass beeinflusst. Wie aus der entsprechenden Zusammenstellung in Bild 173 hervorgeht, trifft dies in 10 von

69 untersuchten Fällen zu (= 14%, Durchbiegungen: 10%, Dehnungen: 20%). Als markantes Beispiel einer Strukturbeeinflussung kann das Fahrzeug 25R dienen, dessen DI-Verläufe für WG 82 und WG 01 bei mittleren Geschwindigkeiten und hohem Reifendruck einen Berg aufweisen, der für tiefen Druck nicht erscheint (A7.5, A7.15). Für WG 02 ist dieses Phänomen nur andeutungsweise zu erkennen (A7.25).

Im einzelnen ergeben sich jedoch zum Teil beträchtliche Unterschiede zwischen den DI-Verläufen für hohen und niedrigen Reifendruck, die sich in Form von Strukturstreuungen äussern. Diese Streuungen treten meist in vertikaler Richtung auf, d.h. sie betreffen die Grösse des DI.

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen (A, B, C, D und L) aller besprochenen Fälle darauf hin, ob hoher oder tiefer Reifendruck massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 65%:35% (insgesamt 100 Peaks), und für Dehnungen ein solches von 58%:42% (77 Peaks) zu Gunsten des hohen Reifendruckes. In einer Mehrheit der Fälle ist demnach hoher Reifendruck massgebend.

			11R	12R	13R	20R	25R	42R	52R	71R	74R	76R
WG	01	h t	ATBT	ABT	ATBL	ABT	ATBCT ATBT	ABL ABT	ATBT	AT	AT	ATL
WG	02	h t	ATBT	ABT	ABCT ABT	ATBT	ATBT	ABC ATBT	ABT	AT	AT	ATL
			11R	12R	13R	20R	25R	42R	52R	71R	74R	76R
DMS	42	h t	ATBT	ATBT	ATBT	ABCL AL	ATBL		ABC ABL	ABT	ABC	ATB ABL
DMS	52+	h t	TL	TL	TL	ABL ABLT	ABLT	TL LT	ABL ABLT	ABL	AL	AL TL
DMS	52-	h t	ATL	ABL ATL	ABL	ABL	ABTL ATL	ATL	ATL	ATL	ATL	AT AB
DMS	22	h t	TLT	TL	TL L	ABL	ABT ABL	L	ABC	ALT	ABCDL	AL ATL
			11R	12R	13R	20R	25R	42R	52R	71R	74R	76R

Bild 173b: Tabelle der DI-Strukturen (Parameter Reifendruck). Fahrten mit Brett, Belag A. Wo eine DI-Struktur nur für hohen Reifendruck angegeben ist, gilt für tiefen Druck die gleiche Struktur wie für hohen Druck. h = hoher Reifendruck (10 bar), t = tiefer Reifendruck (6 bar).

Bezüglich des Einflusses des Reifendrucks auf die vertikale Strukturstreuung für Durchbiegungen kann folgendes festgehalten werden:

- Der Reifendruck beeinflusst im allgemeinen die Grösse des DI im Bereich höherer Geschwindigkeiten weniger stark als im Bereich tieferer Geschwindigkeiten. Besonders gering ist dieser Einfluss beim Fahrzeug 13R für hohe Geschwindigkeiten.
- Für das Fahrzeug 76R ist hoher Reifendruck praktisch durchwegs (in massgebenden Bereichen immer) massgebend.
- Für das Fahrzeug 74R ist tiefer Reifendruck praktisch durchwegs (in massgebenden Bereichen immer) massgebend.

Bei 13 von 177 Peaks der DI-Strukturen (= 7%, Durchbiegungen: 9%, Dehnungen: 5%) sind auch Strukturstreungen in horizontaler Richtung festzustellen, bei denen die absoluten oder relativen Spitzenwerte des DI bei unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeit auftreten. Es sind keine allgemein gültigen Gesetzmässigkeiten erkennbar, denen diese Strukturstreungen gehorchen. Insbesondere scheint kein Zusammenhang zwischen der Richtung der Verschiebung und den Verhältnissen bezüglich Reifendruck sowie der Fahrgeschwindigkeit zu bestehen.

Für die sichere Identifikation von horizontalen Strukturstreungen ist es notwendig, dass das bei den Versuchen gewählte Geschwindigkeitsinkrement nicht grösser als $\Delta v = 2 \text{ km/h}$ ist. Insbesondere bei den Versuchen mit LS-Fahrzeugen musste dieser Wert oft überschritten werden.

g) Zusammenfassung; Versuche mit Brett

Die DI-Strukturen werden vom Reifendruck in 17 von 59 Fällen beeinflusst. Mit 29% (Durchbiegungen: 20%, Dehnungen: 33%) ist diese Häufigkeit rund doppelt so gross wie für die Versuche ohne Brett (Bild 173). Als typisches Beispiel für eine Strukturveränderung kann wiederum das Fahrzeug 25R dienen, dessen DI-Verlauf für WG 01 auch hier im Bereich mittlerer Geschwindigkeiten für hohen Reifendruck einen Berg aufweist, der für tiefen Druck nicht auftritt (A7.85).

Die vertikale Strukturstreuung nimmt stark unterschiedliche Ausmasse an. Für Durchbiegungen ist sie im allgemeinen im Bereich höherer Geschwindigkeiten grösser als im Be-

reich tieferer Geschwindigkeiten. Besonders gross ist sie für das Fahrzeug 13R und Geschwindigkeiten $v > 40 \text{ km/h}$.

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen (A, B, C, D und L) aller besprochenen Fälle darauf hin, ob hoher oder tiefer Reifendruck massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 93%:7% (total 40 Peaks), und für Dehnungen ein solches von 89%:11% (89 Peaks) zu Gunsten des hohen Reifendrucks. Für Fahrten über das Brett ist demnach hoher Reifendruck meist massgebend.

Mit einer Ausnahme (WG 02, 52R) treten horizontale Strukturstreungen nicht in klar erkennbarem Ausmass auf.

3.77 Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche

a) Allgemeines

Für die Untersuchung des Einflusses des Belagszustandes auf den Verlauf des dynamischen Inkrementes ϕ oder DI über die Fahrgeschwindigkeit v ist im Anhang 8 eine Reihe von $\phi(v)$ -Funktionen dargestellt. Der Parameter Reifendruck (10 bar) wird dabei konstant gehalten. Von den folgenden vier Fahrzeugen werden Resultate der Versuchsserien auf den beiden Belägen A und B präsentiert:

- Fahrzeug Nr. 12R,
- Fahrzeug Nr. 13R,
- Fahrzeug Nr. 14R und
- Fahrzeug Nr. 21R.

In Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen bezüglich Fahrachse und Brett (Bild 124) sind im allgemeinen Darstellungen für die folgenden Instrumente vorhanden:

AoA, AoB: WG 82, WG 02, WG 112, WG 22;
DMS 42, DMS 52;

KoA, KoB: WG 01, WG 111; DMS 22;

AmA, AmB: WG 02; DMS 42, DMS 52;

KmA, KmB: WG 01; DMS 22.

Der Anhang 8 ist so gegliedert, dass zuerst die Resultate für Fahrten ohne (A8.1 bis A8.39), dann diejenigen für Fahrten mit Brett (A8.40 bis A8.63) gezeigt werden. Für

die erwähnten Messstellen folgen jeweils nacheinander die Darstellungen für die verschiedenen Fahrzeuge. Die Hierarchie in der Reihenfolge der Messstellen ist die gleiche, wie sie im Anhang 4, "Tabellen der maximalen dynamischen Inkremente", verwendet wird. Darstellungen, die keine klaren DI-Strukturen erkennen lassen, werden nicht im einzelnen diskutiert. In Bild 174 sind die besprochenen DI-Strukturen tabellarisch zusammengestellt.

b) Fahrten ohne Brett, Durchbiegungen

WG 82

Für diese Messstelle sind die DI-Strukturen wenig markant. Die Aufteilung in Berge bzw. Täler ist oft nicht zweifelsfrei möglich.

Für die 2D-Fahrzeuge gelten unterschiedliche Strukturen (A8.1 bis A8.3). Für das Fahrzeug 12R und Belag A gilt eine ABC-, für Belag B eine ATB-Struktur. Der Einfluss der Belagsqualität ist uneinheitlich. Für das Fahrzeug 13R und Belag A gilt eine AT-, für Belag B eine ATB-Struktur. Berg A fällt durch seine grosse Breite und die viergipflige Ausbildung auf. Mit wenigen Ausnahmen liegen die DI für Belag A deutlich höher als für Belag B. Für das Fahrzeug 14R und Belag A gilt eine ATB-, für Belag B eine ABL-Struktur. Der Einfluss der Belagsqualität ist beachtlich: Im Bereich des gemeinsamen Berges A erreichen die maximalen DI für Belag B nur rund die Hälfte der für Belag A gültigen Werte.

Für das Fahrzeug 21R gilt für Belag A eine ABL-, für Belag B aber eine ATB-Struktur (A8.4). Berg A ist für beide Beläge qualitativ ähnlich ausgebildet, wobei Belag A deutlich massgebend ist. Für $v > 35$ km/h ist der Einfluss der Belagsqualität ausserordentlich gross. Für Belag B sinkt das DI-Niveau zunächst tief in den Bereich des Tales T_{AB} ab und bildet für $v = 55...70$ km/h einen nicht sehr markanten Berg B. Für Belag A dagegen folgen zunächst Berg B und dann ein steiler, linearer Anstieg L, an dessen Ende die DI für Belag A rund fünfmal höher liegen als für Belag B.

Die maximalen DI erreichen für das Fahrzeug 12R für beide Beläge eine ähnliche Höhe, für 13R ist Belag A deutlich, für 14R sehr deutlich und für 21R ausserordentlich deutlich massgebend.

WG 01

Für die 2D-Fahrzeuge beeinflusst die Belagsqualität die DI-Strukturen in beachtlichem Ausmass (A8.5 bis A8.7). Für Belag A gilt eine ATBT-, für Belag B eine ABC- (12R), ATBCT- (13R) bzw. ABCT-Struktur (14R). Im Bereich des gemeinsamen Berges A beeinflusst die Belagsqualität die DI-Struktur für die Fahrzeuge 12R und 14R praktisch nur horizontal (Spitze für Belag B um rund 10 km/h tiefer als für Belag A), für 13R aber praktisch nur vertikal (Belag B deutlich massgebend).

Der Bereich $v = 30...40$ km/h ist für den Belag A als Tal T_{AB} , für den Belag B jedoch deutlich als Zwischenberg B ausgeprägt. Das DI-Niveau liegt hier für das Fahrzeug 12R und beide Beläge etwa gleich hoch, für die Fahrzeuge 13R und 14R ist Belag B aber deutlich massgebend.

Im Bereich des Berges B bzw. C ($v = 40...60$ km/h) gilt für alle drei Fahrzeuge, dass der Belag den DI-Verlauf praktisch nur vertikal beeinflusst: Belag A ist deutlich massgebend.

Für das MD-Fahrzeug 21R und Belag A gilt eine ABCCL-Struktur, wobei Berg B sehr schmal ausgebildet ist und im gleichen Geschwindigkeitsbereich liegt wie das Tal T_{AB} für die 2D-Fahrzeuge (A8.8). Für Belag B gilt eine ABCD-Struktur. Für die gemeinsamen Berge A und B ist wiederum ein deutlicher horizontaler Einfluss des Belages festzustellen: Ihre Spitzen liegen für Belag B um rund 5 km/h höher als für Belag A. Die Höhe bleibt bei Berg A unbeeinflusst, bei Berg B ist Belag A deutlich massgebend. Bei Berg C liegen die DI für Belag A rund dreimal höher als für Belag B. Die steil ansteigende Flanke L für $v > 70$ km/h existiert nur für Belag A. Der DI-Spitzenwert erreicht dabei beinahe die gleiche Höhe wie beim massgebenden Berg C.

Für die Fahrzeuge 12R und 14R liegen die für die Beläge A und B erreichten absoluten Spitzenwerte des DI jeweils praktisch gleich hoch. Demgegenüber ist für das Fahrzeug 13R der Belag B deutlich, für das Fahrzeug 21R der Belag A sehr deutlich massgebend.

WG 02

Für die 2D-Fahrzeuge und Belag A gilt eine ATB-Struktur (A8.9 bis A8.11). Für Belag B sind die Verhältnisse uneinheitlich (ATBTC,

ATB, ABCT für 12R, 13R, 14R). Im Bereich des gemeinsamen Berges A bei $v = 5...25$ km/h ist der Einfluss des Belages, verglichen mit den für WG 01 gültigen Verhältnissen, nicht mehr so eindeutig. Dies betrifft insbesondere die horizontale Struktur-Beeinflussung: Eine Verschiebung der Spitze des Berges A ist für das Fahrzeug 14R nicht mehr und für 12R nur noch in geringem Mass zu beobachten. Dagegen liegt für das Fahrzeug 13R die Spitze des Berges A für Belag B bei einer um rund 6 km/h höheren Geschwindigkeit als für Belag A.

Der Zwischenberg B bei $v = 35$ km/h (Belag B) ist insbesondere für die Fahrzeuge 12R und 14R zwar nur schmal, aber trotzdem sehr markant ausgebildet. Die DI erreichen hier rund doppelt so hohe Werte wie für Belag A. Im Bereich des Berges B bzw. C bei $v = 40...60$ km/h ist Belag A immer massgebend: Für die Fahrzeuge 12R und 13R deutlich und für 14R sehr deutlich. Zudem tritt bei allen drei Fahrzeugen eine horizontale Spitzenverschiebung um $3...5$ km/h auf.

Für das MD-Fahrzeug 21R gilt für Belag A eine ABCL-, für Belag B aber eine ABT-Struktur (A8.12). Ein horizontaler Einfluss des Belages auf die DI-Struktur ist nicht festzustellen, dagegen beim gemeinsamen Berg A ein deutlicher (Belag A massgebend) und für $v > 40$ km/h ein ausserordentlich starker vertikaler Einfluss. Für $v > 40$ km/h bleibt das DI für Belag B auf dem tiefen Niveau des sehr breiten Tales T_B , für Belag A durchläuft es aber den markanten Berg C und erreicht am Ende des daran anschliessenden steilen Anstieges L seinen Höchstwert. Im Bereich des wiederum sehr schmalen, gemeinsamen Berges B bei $v = 33$ km/h ist kein wesentlicher Einfluss der Belagsqualität festzustellen.

Bezüglich der absolut grössten DI ist der Belag A für das Fahrzeug 21R ausserordentlich deutlich, für das Fahrzeug 14R deutlich und für 12R nicht besonders ausgeprägt massgebend. Dagegen ist für das Fahrzeug 13R der Belag B, hier ebenfalls nicht besonders ausgeprägt, massgebend.

WG 111

Für die 2D-Fahrzeuge und beide Beläge gilt eine ABCT-Struktur, allerdings mit unterschiedlicher Dominanz der beteiligten Berge (A8.13 bis A8.15). Zwar werden die Strukturen selbst vom Belag nicht beeinflusst, da-

gegen sind zum Teil recht beachtliche vertikale und auch einige horizontale Struktur-streuungen festzustellen. Bei Berg A ist der Belageseinfluss relativ gering, wobei Belag B für die Fahrzeuge 12R und 13R massgebend ist. Bei Berg B ist dieser Einfluss für das Fahrzeug 14R, abgesehen von einer kleinen Horizontalverschiebung, ebenfalls gering, für 13R ist Belag A deutlich und für 12R sehr deutlich massgebend. Bei Berg C ist der vertikale Belageseinfluss nicht sehr gross für das Fahrzeug 13R, deutlich für 12R und sehr deutlich für 14R. Belag A ist hier wiederum immer massgebend.

Für Belag A ist die Höhe der Berge A, B und C vergleichbar, dagegen dominiert für Belag B Berg A deutlich (13R, 14R) bis sehr deutlich (12R).

Verglichen mit den Resultaten für WG 01, sind die Strukturen für WG 111 sehr ähnlich. Berg B, der für WG 01 nur für Belag B existiert, ist hier für WG 111 immer vorhanden, und zwar recht markant.

Für das Fahrzeug 21R und Belag A gilt ebenfalls eine ABCT-, für Belag B eine ABT-Struktur (A8.16). Bis auf wenige Details stimmen die DI-Verläufe für WG 01 und WG 111 überein. Der Einfluss des Reifendrucks ist deutlich bei Berg A und sehr deutlich im übrigen Bereich. Belag A ist immer massgebend.

Bezüglich der absolut grössten DI ist der Belag A für das Fahrzeug 21R sehr deutlich, sowie für 12R und 14R nur sehr knapp massgebend. Belag B ist dagegen für das Fahrzeug 13R massgebend, wenn auch nicht besonders deutlich.

WG 112

Bis auf einige wenige kleinere Unterschiede sind die Ergebnisse für WG 112 qualitativ gleich wie jene für WG 02 (A8.17 bis A8.20). So ist beispielsweise für das Fahrzeug 12R und Belag A bei $v = 42$ km/h jetzt ein Berg B vorhanden, der bei WG 02 nur ansatzweise erkennbar ist und dort deshalb in der Strukturbezeichnung vernachlässigt wurde (A8.17, A8.9).

Bezüglich der absolut grössten DI ist wiederum festzustellen, dass der Belag A für die Fahrzeuge 12R, 14R und 21R deutlich bis ausserordentlich deutlich, für Fahrzeug 13R aber Belag B knapp massgebend ist.

Für alle drei 2D-Fahrzeuge und Belag A gilt eine ABC-Struktur (A8.21 bis A8.23). Für Belag B und das Fahrzeug 12R gilt ebenfalls eine ABC-, für 13R und 14R aber eine ABCD-Struktur.

Im Bereich des gemeinsamen Berges A ist ein horizontaler Einfluss des Belages auf die DI-Struktur recht deutlich ausgebildet. Die entsprechende Verschiebung beträgt rund 10 km/h für das Fahrzeug 12R sowie etwa 3 km/h für 13R und 14R, wobei die Spitze für Belag B bei tieferer Geschwindigkeit auftritt als für Belag A. Der vertikale Einfluss ist für 13R und 14R gering und etwas grösser für 12R. Die grössten DI für Belag B treten immer bei Berg A auf.

Im Bereich des Berges B ist der Belag A immer deutlich massgebend. Die entsprechenden Spitzenwerte der DI liegen für Belag A rund zwei- (12R, 14R) bzw. viermal (13R) höher als für Belag B. Für das Fahrzeug 12R ist bei Berg B eine horizontale Verschiebung der Spitze um rund 8 km/h festzustellen (in gleicher Richtung wie bei Berg A).

Eine Spitzenverschiebung in ähnlichem Ausmass und gleicher Richtung ist für den Berg C und das Fahrzeug 12R festzustellen. Im Bereich des Berges C, der für die Fahrzeuge 13R und 14R zweigipflig ausgebildet ist, ist Belag A deutlich (12R, 13R) oder sogar sehr deutlich (14R) massgebend.

Für das Fahrzeug 21R gilt für Belag A eine AB-, für Belag B aber eine AT-Struktur (A8.24). Im Bereich des gemeinsamen, zweigipfligen Berges A ist Belag A recht deutlich massgebend. Dort tritt ebenfalls eine horizontale Verschiebung der Bergspitze um rund 8 km/h auf (in gleicher Richtung wie oben). Für $v > 30$ km/h bleibt das DI für den Belag B konstant auf einem niedrigen T-Niveau, während für den Belag A ein sehr markanter Berg B durchlaufen wird. Hier liegt der Spitzenwert für den Belag A etwa viermal höher als jener für den Belag B.

Wiederum ist bezüglich der absolut grössten DI für das Fahrzeug 21R der Belag A ausserordentlich deutlich massgebend. Für die 2D-Fahrzeuge ist ebenfalls immer der Belag A massgebend, für 13R sehr deutlich, für 14R deutlich und für 12R nicht besonders ausgeprägt.

DMS 42

Die DI-Verläufe sind nur undeutlich strukturiert. Der Belag A ist immer mehr oder weniger ausgeprägt massgebend, wobei die grössten DI bei $v > 45$ km/h erreicht werden (A8.25 bis A8.27).

Für die 2D-Fahrzeuge 13R bzw. 14R tritt eine Erscheinung auf, die bereits früher ange-troffen wurde: Die DI-Verläufe für die Beläge A (LAB- bzw. LAL-Struktur) und B (A-Struktur) schneiden sich in einem mittleren Geschwindigkeitsbereich. Für $v < 35$ km/h ist dabei Belag B, für $v > 35$ km/h Belag A massgebend.

DMS 52+

Für die Zweiachser sind die DI-Strukturen zum Teil nur undeutlich ausgebildet (A8.28 bis A8.32). Während für das Fahrzeug 14R der Belag A meist massgebend ist, kann für 12R und 13R wiederum beobachtet werden, dass für $v < 50$ km/h Belag B, für $v > 50$ km/h aber Belag A massgebend ist. Die DI-Verläufe für das Fahrzeug 14R und beide Beläge weisen mit einer ALB- bzw. ABT-Struktur einen gemeinsamen Berg A auf. In diesem Bereich ist eine Horizontalverschiebung der Spitze um rund 7 km/h festzustellen.

Für das Fahrzeug 21R gilt für Belag A eine AB-, für Belag B eine AT-Struktur (A8.34). Belag A ist dabei insbesondere im Bereich der Berge deutlich (Berg A) bis ausserordentlich deutlich (Berg B) massgebend. Bei Berg A ist eine geringfügige Horizontalverschiebung der Spitze festzustellen. Diese Ergebnisse sind praktisch identisch mit jenen für WG 02 und WG 22 (A8.12, A8.24).

DMS 52-

Für alle 2D-Fahrzeuge und Belag A gilt eine ATB-Struktur, die aber im Bereich des Berges A insbesondere für 12R nicht besonders deutlich ausgeprägt ist (A8.29 bis A8.33). Für Belag B und die Fahrzeuge 12R bzw. 13R und 14R ist der breite Berg bei $v = 45...70$ km/h nicht vorhanden bzw. nur schwach ausgebildet. Für das Fahrzeug 12R und Belag B ist dagegen bei $v = 35$ km/h ein zusätzlicher, sehr schmaler Zwischenberg vorhanden (ATBT-Struktur). Im Bereich des Berges A ist für die Fahrzeuge 12R und 13R Belag B, für 14R

aber Belag A recht deutlich massgebend. Für das Fahrzeug 13R tritt eine geringfügige Horizontalverschiebung der Spitze auf. Im Bereich des Berges B, wo der Belag A sehr deutlich massgebend ist, ist zudem für die Fahrzeuge 13R und 14R eine horizontale Spitzenverschiebung um etwa 5 km/h festzustellen.

Für das Fahrzeug 21R kann lediglich festgestellt werden, dass für $v < 50$ km/h die Verhältnisse unklar sind, während für $v > 50$ km/h Belag A sehr deutlich massgebend ist (A8.35).

DMS 22

Die DI-Verläufe für die vier Fahrzeuge sind mit unterschiedlicher Deutlichkeit strukturiert (A8.36 bis A8.39). Am klarsten sind die Verhältnisse für die 2D-Fahrzeuge 12R und 14R, wo für die Beläge A bzw. B eine ABTCL- bzw. ABTC(I)-Struktur gilt. Der vertikale Einfluss des Belages ist unterschiedlich: Bei Berg A ist für beide Fahrzeuge Belag A massgebend, während bei den Bergen B bzw. C für 12R Belag B, für 14R aber Belag A knapp massgebend ist bzw. umgekehrt.

Im Bereich der gemeinsamen Berge A, B und C ist für beide Fahrzeuge jeweils eine horizontale Spitzenverschiebung von 3...10 km/h festzustellen. Während bei den Bergen A und C die Spitze der DI für Belag B bei höherer Geschwindigkeit auftritt als für Belag A, trifft im Bereich des Berges B genau das Umgekehrte zu.

Für das Fahrzeug 13R und die Beläge A bzw. B gilt eine ATBC- bzw. AT-Struktur, die beide nicht sehr deutlich ausgeprägt sind. Im Bereich des gemeinsamen Berges A ist einerseits Belag B deutlich massgebend, andererseits ist eine horizontale Spitzenverschiebung um etwa 5 km/h festzustellen. Berg B existiert nur für Belag A.

Für das Fahrzeug 21R gilt für Belag A bzw. Belag B eine nur undeutlich ausgeprägte ATBT- bzw. ATBC-Struktur. Im Bereich der Berge A und B ist Belag A deutlich massgebend, und es tritt eine Spitzenverschiebung um rund 3 km/h auf. In beiden Fällen liegt die Spitze für Belag B bei einer höheren Geschwindigkeit als für Belag A.

Bezüglich der absolut grössten DI ist für die Fahrzeuge 12R und 14R der Belag B massgebend, für 12R im Bereich des Berges A, für

14R im Bereich des Berges B. Der Belag B ist auch für das Fahrzeug 13R massgebend, so dass bei dieser Messstelle lediglich für 21R das grösste DI bei Fahrt über den Belag A (Berg B) auftrat.

d) Fahrten mit Brett, Durchbiegungen

WG 01

Für das Fahrzeug 21R gilt eine klare ATBT-Struktur mit deutlicher Dominanz des Berges A (A8.43). Ein wesentlicher Einfluss des Belages ist im Bereich dieses Berges nicht festzustellen. Dagegen tritt im Bereich des Berges B neben einer leichten Dominanz des Belages A eine Horizontalverschiebung der Spitze um rund 10 km/h auf.

Wesentlich unübersichtlicher sind die Verhältnisse für die 2D-Fahrzeuge (A8.40 bis A8.42). Für Belag A und das Fahrzeug 12R gilt eine ABT-, für 13R und 14R eine ATBL-Struktur. Für Belag B sind es eine ATBT-, eine ABCT- und eine ATBCT-Struktur. Im Gegensatz zum Fahrzeug 21R ist jetzt Berg A entweder nur schwach (14R) oder gar nicht mehr massgebend (12R, 13R). Ein Einfluss des Belages ist vor allem im Bereich des Berges B zu erkennen, wo Belag A (für 12R recht deutlich) massgebend ist. In diesem Bereich ist für die Fahrzeuge 13R und 14R eine allerdings nur geringfügige horizontale Spitzenverschiebung zu erkennen.

WG 02

Wiederum sind die Verhältnisse für das Fahrzeug 21R am übersichtlichsten, und es gelten fast die gleichen Resultate wie für WG 01 (A8.47). ATBCT-Struktur, Berg A deutlich dominant, Einfluss des Belages: Spitzenverschiebung um rund 4 km/h bei Berg B. Als einziger Unterschied ist zu vermerken, dass im Bereich $v = 35...55$ km/h jetzt anstelle des einen Berges B zwei kleine Berge B und C vorhanden sind. Dabei ist Belag B bei Berg B und Belag A bei Berg C leicht massgebend.

Eine ABT-Struktur mit massgebendem Berg A gilt für das Fahrzeug 12R (A8.44). Der Einfluss des Belages beschränkt sich im wesentlichen auf den Bereich des Berges B, wo Belag B massgebend ist. Ausserdem ist dort eine Horizontalverschiebung der Bergspitze um rund 3 km/h festzustellen.

Für das Fahrzeug 13R und Belag A gilt eine ABCT-Struktur mit massgebendem Berg A (A8.45). Die Struktur für den Belag B ist weniger markant, kann aber mit ABTC bezeichnet werden. Bei den gemeinsamen Bergen A und B beschränkt sich der Einfluss des Belages im wesentlichen auf eine Spitzenverschiebung: Für Belag B liegen die Bergspitzen bei einer um rund 3...5 km/h tieferen Geschwindigkeit als für Belag A. Für $v > 40$ km/h folgt für Belag A Berg C, während für Belag B die DI auf dem relativ tiefen Niveau des Tales T_{BC} bleiben und der Berg C erst bei $v = 55...70$ km/h auftritt. In diesem Bereich ist demnach einerseits der Belag A deutlich massgebend, andererseits ist auch eine Verschiebung der Spitze des Berges C um rund 20 km/h zu verzeichnen.

Für das Fahrzeug 14R gilt für beide Beläge eine ABCT-Struktur, wobei der dreigipflige Berg A dominiert (A8.46). Im Bereich der Berge A und B ist Belag B, im Bereich des Berges C dagegen Belag A (hier deutlich) massgebend. Eindeutige Spitzenverschiebungen sind nicht zu erkennen.

e) Fahrten mit Brett, Dehnungen

DMS 42

Für die Zweiachser und Belag A gilt eine ATBT-Struktur, die vom sehr breit ausgebildeten Berg B dominiert wird (A8.48 bis A8.50). Der Einfluss des Belages ist relativ gering für das Fahrzeug 14R und $v < 35$ km/h, deutlich für 12R sowie 14R und $v > 35$ km/h und sehr deutlich für 13R. Der für das Fahrzeug 13R bereits für Belag A nur schwach ausgebildete Berg A ist für Belag B gar nicht vorhanden (TA-Struktur). Für die Fahrzeuge 12R und 13R ist immer Belag A, für 14R und $v > 35$ km/h jedoch Belag B massgebend. Dass der Belag die horizontale Lage der Bergspitzen beeinflusst, ist nicht mit Sicherheit auszumachen.

Ebenfalls Überwiegend auf die Grösse der DI beschränkt sich der Einfluss des Belages für das Fahrzeug 21R, wo eine ABCT-Struktur gilt (A8.51). Der Belag A ist dabei nicht sehr deutlich massgebend.

DMS 52+

Für die 2D-Fahrzeuge gelten durchwegs fast reine L-Strukturen, wobei Belag B für 12R und 13R deutlich massgebend ist (A8.52 bis

A8.56). Für 14R und $v < 40$ km/h sind die DI-Verläufe für beide Beläge identisch, während für $v > 40$ km/h Belag A leicht massgebend wird.

Bei der ABL-Struktur, die für das Fahrzeug 21R gilt, sind Berg B und der Anstieg L dominant ausgebildet (A8.58). Der Einfluss des Belages ist mit Ausnahme des Anstieges L klein. Dort sind abwechselungsweise die Beläge B und A massgebend, jedoch ohne dass die Strukturstreuung bedeutend würde.

DMS 52-

Für die vier Fahrzeuge gelten ABL-, ABTL- oder ATL-Strukturen, je nachdem, ob Berg B ganz, halb oder gar nicht ausgebildet ist (A8.53 bis A8.59). Für die Fahrzeuge 12R bzw. 13R dominiert der Anstieg L deutlich bzw. sehr deutlich, während für die beiden anderen Fahrzeuge die grössten DI bei Berg A auftreten.

Für das Fahrzeug 12R existiert Berg B nur für Belag A. In diesem Bereich ist denn Belag A auch deutlich, in den übrigen Bereichen nur leicht massgebend. Für das Fahrzeug 13R ist die ABL-Struktur für beide Beläge markant ausgebildet. Beide Berge sind etwa gleich hoch, werden aber vom Anstieg L deutlich dominiert. Der Einfluss des Belages ist gering. Für das Fahrzeug 14R ist der wenig markante Berg B für den Belag B etwas deutlicher ausgebildet als für Belag A. In den übrigen Bereichen ist der Einfluss des Belages gering.

Für das Fahrzeug 21R ist Berg B für Belag A nur sehr schwach ausgebildet. Im übrigen ist der Einfluss des Belages gering, wobei meist Belag B leicht massgebend ist.

DMS 22

Für die Zweiachser gilt meist eine TL-Struktur, die insbesondere für das Fahrzeug 14R bei $v = 5$ km/h auf recht hohem Niveau beginnt (A8.60 bis A8.62). Der Einfluss des Belages ist für die Fahrzeuge 12R und 14R eher gering, während für 13R Belag A deutlich massgebend ist. Für das Fahrzeug 13R und Belag B ist die DI-Struktur mit ABL zu bezeichnen.

Für das Fahrzeug 21R und Belag A gilt eine ALBT-, für Belag B eine AL-Struktur (A8.63). Belag A ist im Bereich des Berges B denn

auch massgebend, in den übrigen Bereichen trifft dies aber für Belag B zu. Mit Ausnahme des Anstieges L, wo Belag B deutlich massgebend ist, ist der Einfluss des Belages aber eher gering. Bei Berg A tritt die Spitze für Belag B bei einer um rund 3 km/h tieferen Geschwindigkeit auf als für Belag A.

f) Zusammenfassung; Versuche ohne Brett

Die DI-Strukturen werden vom Zustand der Fahrbahnoberfläche in wesentlich grösserem Ausmass beeinflusst, als dies für den Reifendruck der Fall ist. Wie aus der Zusammenstellung in Bild 174 hervorgeht, werden 30 von 37 untersuchten DI-Strukturen von der Belagsqualität beeinflusst (= 81%, Durchbiegungen: 71%, Dehnungen: 100%). Als vielleicht etwas extremes Beispiel für die Art und Weise der Strukturbeeinflussung kann das Fahrzeug 21R dienen, wo der DI-Verlauf für WG 02 insbesondere für Geschwindigkeiten $v > 40$ km/h je nach Belag sehr stark unterschiedlich ist (A8.12, ABCL- bzw. ABT-Struktur für Belag A bzw. B).

Neben Veränderungen an der DI-Struktur selbst beeinflusst der Belagszustand die DI-Verläufe häufig in vertikaler und/oder horizontaler Richtung.

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen (A, B, C, D und L) daraufhin, welcher der beiden Belagszustände bezüglich der Grösse des DI massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 78%:22% (insgesamt 67 Peaks), und für Dehnungen ein solches von 64%:36% (28 Peaks) zu Gunsten des unebenen Belages A. In der Mehrheit der Fälle, für Durchbiegungen in einer klaren Mehrheit, treten bei unebenem Belag höhere DI auf als bei ebenem Belag.

Bezüglich des vertikalen Einflusses des Belagszustandes auf den DI-Verlauf für Durchbiegungen kann folgendes festgehalten werden:

Der Einfluss schwankt zwischen schwach und sehr stark. Schwach ist er im allgemeinen in Bereichen, wo die DI-Struktur ein Tal aufweist. Stark ist er oft in Berg- oder L-Bereichen, insbesondere wenn solche Bereiche bei relativ hohen Geschwindigkeiten auftreten. Ausserordentlich stark ist der Einfluss des Belages immer dann, wenn die letztgenannten Bedingungen für das Fahrzeug 21R erfüllt sind.

Bei 45 von 95 Peaks der DI-Strukturen (= 47%, Durchbiegungen: 46%, Dehnungen: 50%) ist festzustellen, dass der Belag einen Einfluss auf die Geschwindigkeit ausübt, bei der diese Spitze auftritt. Besonders klar ist diese Erscheinung erkennbar, wenn die Höhe der betroffenen Bergspitze vom Belag nur schwach beeinflusst wird. Es ist keine Gesetzmässigkeit auszumachen, die etwa die Richtung oder die Grösse der Spitzenverschiebung in eine Abhängigkeit von Fahrzeug, Belag oder Geschwindigkeit brächte.

Belag			12R	13R	14R	21R
WG 82	A	ABC	AT	ATB	ABL	ABL
	B	ATB	ATB	ABL		ATB
WG 01	A	ATBT	ATBT	ATBT		ABCL
	B	ABC	ATBCT	ABCT		ABCD
WG 02	A	ATB	ATB	ATB		ABCL
	B	ATBTC		ABCT		ABT
WG 111	A	ABCT	ABCT	ABCT		ABC
	B					ABT
WG 112	A	ATBC	ATB	ATB		ABCL
	B			ABC		ABTCT
WG 22	A	ABC	ABC	ABC		AB
	B		ABCD	ABCD		AT
Belag			12R	13R	14R	21R
DMS 42	A		LAB	LAL		
	B		A	A		
DMS 52+	A	TA	TA	ALB		AB
	B	TAT	AT	ABT		AT
DMS 52-	A	ATB	ATB	ATB		
	B	ATBT	AT	AT		
DMS 22	A	ABTCL	ATBC	ABTCL		ATBT
	B	ABTCT	AT	ABTC		ATBC
Belag			12R	13R	14R	21R

Bild 174a: Tabelle der DI-Strukturen (Parameter Belag). Fahrten ohne Brett, Reifendruck 10 bar. Wo eine Struktur nur für Belag A angegeben ist, gilt für Belag B die gleiche Struktur wie für Belag A.

g) Zusammenfassung; Versuche mit Brett

Die DI-Strukturen werden vom Belagszustand in geringerem Mass beeinflusst, als dies für die Versuche ohne Brett der Fall ist. Aus der Zusammenstellung in Bild 174 geht hervor, dass die DI-Struktur in 14 von 24 untersuchten Fällen (= 58%, Durchbiegungen: 62%, Dehnungen: 56%) von der Qualität der Fahrbahnoberfläche abhängt.

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen (A, B, C, D und L) daraufhin, welcher der beiden Belagszustände bezüglich der Grösse des DI massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 68%:32% (insgesamt 19 Peaks) und für Dehnungen ein solches von 56%:44% (32 Peaks) zu Gunsten des unebenen Belages A. In der Mehrheit der Fälle treten demnach bei unebenem Belag höhere DI auf als bei ebenem Belag.

Bei 9 von 51 Peaks der DI-Strukturen (= 18%, Durchbiegungen: 42%, Dehnungen: 3%) ist festzustellen, dass der Belag einen Einfluss auf die Geschwindigkeit ausübt, bei der diese Spitze auftritt.

Belag		12R	13R	14R	21R
WG 01	A	ABT	ATBL	ATBL	ATBT
	B	ATBT	ABCT	ATBCT	
WG 02	A	ABT	ABCT	ABCT	ATBCT
	B		ABTC		ATBT
Belag		12R	13R	14R	21R
DMS 42	A	ATBT	ATBT	ATBT	ABCT
	B	ABT	TA		
DMS 52+	A	TL	TL	L	ABL
	B	L	L		
DMS 52-	A	ABL	ABL	ATL	ATL
	B	ATL		ABTL	ABTL
DMS 22	A	TL	TL	TL	ALBT
	B		ABL		AL
Belag		12R	13R	14R	21R

Bild 174b: Tabelle der DI-Strukturen (Parameter Belag). Fahrten mit Brett, Reifendruck 10 bar. Wo eine Struktur nur für Belag A angegeben ist, gilt für Belag B die gleiche Struktur wie für Belag A.

3.78 Wichtigste Ergebnisse der Auswertung im Zeitbereich

a) Maximalwerte des dynamischen Inkrementes

Die Diskussion der Resultate beschränkte sich zunächst auf die Maximalwerte des dynamischen Inkrementes ϕ oder DI, die für die einzelnen Versuchsfahrzeuge bzw. Fahrzeuggruppen und für alle Messstellen bestimmt wurden. Sie wird im Abschnitt 3.72, "Die Maximalwerte der dynamischen Inkremente in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp", durchgeführt. In den Anhängen 4 bzw. 5 sind die Resultate tabellarisch bzw. grafisch dargestellt.

Die maximalen DI, die pro Fahrzeug unabhängig von allen anderen Versuchsparametern bestimmt wurden, liegen in den folgenden Bereichen:

Fahrten ohne Brett

Durchbiegungen	:	45% - 88%
		WG 82 WG 24
Dehnungen zwischen den Stegen	:	29% - 87%
		DMS 41 DMS 32
Dehnungen an der Konsole:	:	32% - 38%
		DMS 20 DMS 22

Fahrten mit Brett

Durchbiegungen	:	152% - 221%
		WG 01 WG 04
Dehnungen zwischen den Stegen	:	191% - 237%
		DMS 32 DMS 42
Dehnungen an der Konsole:	:	156%
		DMS 22

Die oberen Grenzen dieser Bereiche sind für Durchbiegungen und Dehnungen der Bewehrung der Fahrbahnplatte zwischen den Stegen etwa gleich. Für Dehnungen der Einspannbewehrung der Konsole gelten kleinere obere Grenzwerte als für die anderen Messstellen.

Untersucht man die Herkunft dieser Maximalwerte, zeigt sich folgendes:

- Es gibt keine Parameterkombination Fahrzeug/Reifendruck/Belag, die in allen Fällen massgebend wäre.
- Die Streuung des maximalen DI für die Fahrzeuge innerhalb einer Fahrzeuggruppe (2D, MD, LS, MF) ist teilweise recht beträchtlich. Es gibt auch innerhalb der Fahrzeuggruppen kein Fahrzeug, das immer massgebend wäre.
- Als dynamisch wirksamste Fahrzeuggruppe erwiesen sich mit grossem Vorsprung die

mehrachsiges Solofahrzeuge (MD), schwererwichtig die Fahrzeuge 21R und 25R.

- Die für schweizerische Verhältnisse beträchtlich zu schweren Fahrzeugen 52R und 76R erzeugten keine massgebenden dynamischen Inkremente.
- Mehr als 90% der maximalen DI wurden bei einem Reifendruck von 10 bar erzielt.
- Alle Maximalwerte für Fahrten ohne Brett und die Hälfte der Werte für Fahrten mit Brett wurden erzielt, als der unebene Belag A auf der Brücke eingebaut war.
- Für Durchbiegungen am Kastensteg wurden bei zentrischer Fahrt über die Brücke grössere DI erzeugt als bei Fahrt auf dem Kragarm.

Der Vergleich der maximalen DI für Versuche ohne Brett und Einzelfahrzeuge mit dem dynamischen Beiwert, wie er im Vorschlag für die neue SIA-Belastungsnorm formuliert ist [13], ergibt, dass nur wenige dynamische Inkremente grösser sind als der entsprechende Normwert $\Phi = 1.8$ ($\phi = 80\%$).

Die Antwort auf die Frage des Verhältnisses der DI für die Versuche mit mehreren Fahrzeugen zu jenen für die Versuche mit Einzelfahrzeugen muss differenziert gegeben werden. Geht man von den Resultaten für die Durchbiegungen aus, bei denen die grössten DI beobachtet wurden, zeigt sich, dass die maximalen DI für die MF-Gruppe rund 50% des maximalen DI der massgebenden Gruppe von Einzelfahrzeugen (MD) erreichen. Dagegen ist darauf hinzuweisen, dass das grösste DI für die Einspannbewehrung der Konsole im Stützenbereich auch für die MF-Serie 4MN erreicht wurde. Es ist demnach zu unterscheiden, ob eine Messstelle das globale Verhalten der Brücke oder das lokale Verhalten eines Tragelementes erfasst. Je nachdem spielt es eine Rolle, ob gleichzeitig viele Fahrzeuge auf die Brücke einwirken oder nur ein Einzelfahrzeug.

Neben den pro Fahrzeug maximalen DI wurden auch die pro Fahrzeuggruppe mittleren maximalen DI betrachtet. Es zeigte sich, dass nur für Durchbiegungen klare Verhältnisse herrschen, indem wiederum die MD-Fahrzeuge im Mittel die grösste dynamische Wirksamkeit aufwiesen. Für Fahrten ohne Brett folgen dann die 2D-, die LS- und die MF-Gruppe, für solche mit Brett die LS-, die 2D- und die MF-Gruppe. Für Dehnungen ist lediglich festzustellen, dass die MD-Fahrzeuge häufiger massgebend waren als alle anderen Gruppen.

b) Vergleich mit den EMPA-Standardversuchen

Vergleiche mit den Ergebnissen routinemässiger dynamischer Belastungsversuche an Strassenbrücken (Abschnitt 3.73) zeigen, dass die Bergspurbrücke Deibüel zu jenen Brücken gehört, die auf die dynamischen Einwirkungen schwerer Fahrzeuge empfindlich reagieren. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sie durchaus geeignet ist, als Versuchsobjekt für die Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf das Verhalten dynamisch kritischer Brücken zu dienen.

c) Verlauf des dynamischen Inkrementes ϕ über die Fahrgeschwindigkeit v

Für die Diskussion der verschiedenen $\phi(v)$ -Funktionen, auch als DI-Verläufe bezeichnet, sind im Abschnitt 3.74 einige vorbereitende Angaben enthalten. Dort wird zum Beispiel definiert, dass einem charakteristischen DI-Verlauf eine DI-Struktur zugeordnet werden kann, aus deren Bezeichnung hervorgeht, wieviele und welche Elemente die Struktur enthält. Mögliche Elemente sind Berg (A, B, C, D), Tal (T) und linearer Anstieg (L).

Ferner werden die Begriffe "DI-Streuung" sowie "vertikale und horizontale Strukturstreuung" definiert und diskutiert. Während es sich bei der DI-Streuung um ein an sich unerwünschtes, aus versuchstechnischen und physikalischen Gründen aber nicht vermeidbares Phänomen handelt, ist die Strukturstreuung neben der Struktur selbst die eigentliche Zielgrösse der vorliegenden Untersuchung.

d) Die DI-Strukturen innerhalb der verschiedenen Fahrzeuggruppen

Im Abschnitt 3.75 werden die DI-Strukturen diskutiert, wie sie sich innerhalb der Fahrzeuggruppen 2D, MD, LS und MF, die letztere aufgeteilt in die beiden Untergruppen 2LH, 2MH, 4MH und 2MN, 4MN, präsentieren. Die Parameter Reifendruck (10 bar) und Belag (A) werden dabei konstant gehalten. Die Resultate sind im Anhang 6 grafisch dargestellt.

Es zeigt sich, dass die DI-Strukturen je nach Fahrzeuggruppe, Fahrzeug und Messstelle sowie für Versuche mit und ohne Brett, stark unterschiedlich sein können. Für Durchbiegungen sind die DI-Strukturen im allgemeinen deutlicher ausgebildet als für Dehnungen. Dies dürfte damit zusammenhängen,

dass Dehnungen insbesondere für Versuche ohne Brett grössere DI-Streuungen aufweisen als Durchbiegungen.

Für die 2D- und die MD-Fahrzeuge sind die DI-Strukturen meist so deutlich ausgebildet, dass eine Diskussion möglich ist. In einigen, nicht sehr häufigen Fällen trifft dies auch für eine oder mehrere der MF-Untergruppen zu. Für die Gruppe der LS-Fahrzeuge sind lediglich für Versuche mit Brett DI-Strukturen erkennbar, und auch dann nicht für alle Messstellen (Bild 172).

Für Versuche ohne Brett sind die DI-Strukturen im allgemeinen wellenförmig, d.h. das DI durchläuft eine Folge von Bergen und Tälern. Ein weiteres zu beobachtendes Strukturelement ist ein linearer Anstieg (L) des DI mit der Fahrgeschwindigkeit. Für Versuche mit Brett tritt neben der üblichen wellenförmigen DI-Struktur auch eine reine L-Struktur auf, wo das DI über den ganzen Bereich linear mit der Geschwindigkeit zunimmt. Dies ist jedoch nur für Dehnungen zu beobachten.

Aus den DI-Strukturen geht hervor, dass die weit verbreitete Annahme, die dynamischen Wirkungen schwerer Fahrzeuge nähmen mit der Fahrgeschwindigkeit zu, nicht allgemein gültig ist.

Die Frage nach dem Einfluss der Fahrzeugparameter wie Geometrie, Aufhängungen, statische Radlasten und Massenverteilung innerhalb der 2D- und der MD-Gruppen auf den DI-Verlauf ist nicht in einfacher Weise zu beantworten. Als Beurteilungsgrößen stehen hier die DI-Struktur bzw. ihre Variabilität und die Strukturstreuung zur Verfügung. Für 2D-Fahrzeuge sowie den Lastenzug 42R wird in [65] versucht, eine detaillierte Analyse aufgrund der gemessenen dynamischen Radlasten durchzuführen.

Zunächst ist festzustellen, dass es für beide Fahrzeuggruppen Messstellen gibt, für die die DI-Strukturen für alle Fahrzeuge gleich sind, und auch solche, für die das nicht zutrifft (Bild 172). Für 2D-Fahrzeuge und Versuche ohne Brett ist bei sieben von zwölf Messstellen die DI-Struktur unabhängig vom Fahrzeug, für Versuche mit Brett aber nur bei einer von sechs. Für MD-Fahrzeuge lauten die entsprechenden Zahlen sechs von zwölf und ebenfalls eine von sechs.

Immerhin ist es doch so, dass die DI-Strukturen für die 2D-Fahrzeuge, deren fahrzeug-

technischer Aufbau im wesentlichen gleich ist, für die massgebenden Durchbiegungen WG 02 und WG 22 und Versuche ohne Brett fahrzeugunabhängig sind. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass das dynamische Inkrement bzw. die DI-Struktur nicht einfach Zufallsgrößen sind, zumindest wenn sie sich auf das globale Verhalten der Brücke beziehen.

Horizontale Strukturstreuungen konnten nicht mit Sicherheit identifiziert werden, so dass sich die Diskussion auf vertikale Streuungen beschränkt. Die kleinste Strukturstreuung weist die Gruppe der MD-Fahrzeuge auf, gefolgt von jener der 2D-Fahrzeuge. Für Versuche ohne Brett nimmt die Strukturstreuung im allgemeinen mit der Fahrgeschwindigkeit zu, für Versuche mit Brett jedoch ab.

Die DI-Streuung für ein einzelnes Fahrzeug nimmt meist mit steigender Geschwindigkeit ab. Sie ist für Versuche ohne Brett relativ grösser als für Versuche mit Brett.

Anhand der DI-Strukturen wurde der Frage etwas detaillierter nachgegangen, ob es innerhalb der 2D- und der MD-Gruppen ein dynamisch kritisches Fahrzeug gebe. Es zeigte sich, dass das Fahrzeug 14R offensichtlich wesentlich häufiger massgebende dynamische Reaktionen erzeugt als die anderen 2D-Fahrzeuge 12R und 13R, die etwa gleichwertig sind, und als 11R, das deutlich abfällt. Von den MD-Fahrzeugen sind 25R und 21R etwa gleich kritisch, während 24R und vor allem 20R deutlich weniger oft massgebende dynamische Reaktionen hervorrufen. Eine gewisse Rangfolge in der dynamischen Wirksamkeit ist demnach durchaus vorhanden. Es gibt jedoch weder ein Fahrzeug, das immer, noch eines, das nie massgebend ist.

e) Der Einfluss des Reifendruckes

Der Einfluss des Reifendruckes auf die DI-Strukturen für 10 Fahrzeuge wird im Abschnitt 3.76 untersucht. Der Parameter Belag (A) wird dabei konstant gehalten. Die Resultate sind im Anhang 7 grafisch dargestellt.

Die DI-Strukturen als solche werden vom Reifendruck nur relativ selten beeinflusst. Für Versuche ohne Brett trifft dies in 14% und für Versuche mit Brett in 29% der untersuchten Fälle zu (Bild 173). Im einzelnen ergeben sich jedoch zum Teil beträchtliche

Unterschiede zwischen den DI-Verläufen für hohen und niedrigen Reifendruck, die sich meist in vertikalen Strukturstreungen äussern.

Versuche ohne Brett

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen darauf hin, ob hoher oder tiefer Reifendruck massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 65%:35% und für Dehnungen ein solches von 58%:42% zu Gunsten des hohen Reifendruckes. In einer Mehrheit der Fälle ist demnach hoher Reifendruck massgebend. Mit Ausnahme der Fahrzeuge 74R (tiefer Druck) und 76R (hoher Druck) gibt es jedoch kein Fahrzeug, für das einer der Drücke immer massgebend wäre.

Für Durchbiegungen gilt, dass der Reifendruck die Grösse der DI im allgemeinen bei tieferen Geschwindigkeiten stärker beeinflusst als bei höheren. Besonders gering ist dieser Einfluss für das Fahrzeug 13R und hohe Geschwindigkeiten.

Bei 7% der Peaks der DI-Strukturen sind auch horizontale Strukturstreungen festzustellen. Es sind keine allgemeinen Gesetzmässigkeiten erkennbar, denen diese Streungen gehorchen. Insbesondere scheint kein Zusammenhang zwischen der Richtung der Spitzenverschiebung, der Lage des Peaks (Fahrgeschwindigkeit) und der Höhe des Reifendrucks zu bestehen.

Versuche mit Brett

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen darauf hin, ob hoher oder tiefer Reifendruck massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 93%:7% und für Dehnungen ein solches von 89%:11% zugunsten des hohen Reifendruckes. Für Fahrten über das Brett ist demnach hoher Reifendruck meist massgebend.

Die vertikale Strukturstreung nimmt stark unterschiedliche Ausmasse an. Für Durchbiegungen ist sie im allgemeinen für höhere Geschwindigkeiten grösser als für tiefere, dies im Gegensatz zu den Versuchen ohne Brett. Besonders gross ist sie für das Fahrzeug 13R und Geschwindigkeiten $v > 40$ km/h.

Mit einer Ausnahme treten horizontale Strukturstreungen nicht in klar erkennbarem Ausmass auf.

f) Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche

Im Abschnitt 3.77 wird der Einfluss der Belagebenheit auf die DI-Strukturen für vier Fahrzeuge untersucht. Der Parameter Reifendruck (10 bar) wird dabei konstant gehalten. Die Resultate sind im Anhang 8 grafisch dargestellt.

Die DI-Strukturen als solche werden vom Zustand der Fahrbahnoberfläche in wesentlich stärkerem Ausmass beeinflusst, als dies für den Reifendruck der Fall ist. Für Versuche ohne Brett ist eine Strukturänderung in 81% und für Versuche mit Brett in 58% der untersuchten Fälle festzustellen (Bild 174). Neben Veränderungen an der DI-Struktur selbst bewirkt eine Änderung der Fahrbahnebenheit zum Teil recht markante vertikale und auch horizontale Strukturstreungen.

Versuche ohne Brett

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen darauf hin, welcher der beiden Belagzustände massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 78%:22% und für Dehnungen ein solches von 64%:36% zu Gunsten des unebenen Belages A. In der deutlichen Mehrheit der Fälle treten demnach bei unebenem Belag höhere DI auf als bei ebenem Belag.

Die vertikale Strukturstreung schwankt zwischen schwach und sehr stark. Schwach ist sie im allgemeinen in Bereichen, in denen die DI-Struktur ein Tal aufweist. Stark ist sie oft in Berg- oder L-Bereichen, insbesondere dann, wenn solche Strukturelemente bei relativ hohen Geschwindigkeiten auftreten. Ausserordentlich stark ist die vertikale Strukturstreung immer dann, wenn die letztgenannten Bedingungen für das Fahrzeug 21R erfüllt sind.

Bei 47% der Peaks der DI-Strukturen ist eine horizontale Strukturstreung festzustellen. Besonders klar erkennbar ist diese Erscheinung, wenn gleichzeitig die vertikale Streung verschwindet. Es ist keine Gesetzmässigkeit erkennbar, die etwa die Grösse oder die Richtung der Spitzenverschiebung in eine Abhängigkeit von Fahrzeug, Belag oder Geschwindigkeit brächte.

Versuche mit Brett

Untersucht man die einzelnen Peaks der DI-Strukturen darauf hin, welcher der beiden

Belagszustände bezüglich der Grösse der DI massgebend sei, erhält man für Durchbiegungen ein Verhältnis von 68%:32% und für Dehnungen ein solches von 56%:44% zu Gunsten des unebenen Belages A. In der Mehrheit der Fälle treten demnach bei unebenem Belag höhere DI auf als bei ebenem Belag.

Bei 18% der Peaks ist eine horizontale Strukturstreuung festzustellen. Dieser Wert liegt deutlich tiefer als jener für die Versuche ohne Brett.

3.79 Die Brückenreaktion im Frequenzbereich

a) Die unbelastete Brücke

Der Ausschwingvorgang der unbelasteten Brücke wird immer von den Biegeschwingungen L2 mit $f \sim 3.05$ Hz und L3 mit $f \sim 4.35$ Hz dominiert. Aus Bild 175, das RSD-Spektren mit linear skaliertem Ordinate zeigt, geht hervor, dass im 41-m-Feld (WG 02) die Dominanz von L2 am stärksten ausgeprägt ist. Im 37-m-Feld (WG 22) erreicht die spektrale Dichte für L3 fast jene für L2, während im 32-m-Feld (WG 82) L3 dominiert. Ferner ist in Bild 175 zu erkennen, dass neben L2 und L3 mit deutlich schwächerer Intensität auch L4 mit $f \sim 5.50$ Hz, L5 mit $f \sim 10.5$ Hz und, allerdings nur ausnahmsweise, T1 mit $f \sim 3.75$ Hz, im Ausschwingvorgang enthalten sind. In Bild 176 sind die gleichen Spektren mit logarithmischer Skalierung auf der Ordinate dargestellt. Sie geben zwar die Relationen zwischen den Amplitudendichten verzerrt wieder, heben aber dafür die schwächer vertretenen Schwingungen besser hervor. So kann im Spektrum von WG 82 auch noch T2 mit $f \sim 6.75$ Hz identifiziert werden.

Die Partizipation der einzelnen Längsbiegeschwingungen an der Gesamtbewegung entspricht recht gut den Erwartungen, wie sie sich in den drei untersuchten Messpunkten aus den Formen dieser Schwingungen ergeben (Bild 95). Dass die Dichte von L2 bei WG 22 grösser ist als jene von L3, führt zum Schluss, dass L2 besser angeregt wurde als L3. Dies erscheint einleuchtend, denn erstens liegt L2 frequenzmässig näher an der Anregung (siehe unten) und zweitens entspricht die Form von L2 im Gegensatz zu jener von L3 sehr gut der statischen Biegelinie der Brücke unter einer Einzellast.

Die Tatsache, dass die Längsbiegeschwingung L1 mit $f \sim 2.5$ Hz zwar rechnerisch ermit-

telt, experimentell bei den Versuchsreihen E1 und E2 aber nicht nachgewiesen werden konnte, ist im Abschnitt 2.63, "Vergleich Theorie/Experiment" bereits erwähnt worden.

Dort wird dann darauf hingewiesen, dass L1 in relativ seltenen Fällen im Ausschwingvorgang dominant in Erscheinung trete, und dass die frei schwingende Brücke demnach zwei unterschiedliche Verhaltensmuster zeige. Diese Hinweise müssen hier korrigiert werden.

Die Analyse im Frequenzbereich, wie sie im Abschnitt 3.53 beschrieben ist, wurde in den Jahren 1985 bis 1987 an den Signalen von knapp 300 Versuchsfahrten aus zehn verschiedenen Versuchsserien durchgeführt. Bezüglich des Ausschwingverhaltens der Brücke ergaben sich die Resultate, wie sie im Abschnitt 2.63 angegeben sind. Infolge eines Fehlers, der beim Transfer der Signale vom Magnetband in den Rechner auftrat, sind diese Resultate falsch. Dafür, dass ein Fehler überhaupt gesucht und dann auch gefunden wurde, genügten jedoch die im Abschnitt 2.63 als "aussergewöhnlich" taxierten Instabilitäten im Ausschwingverhalten der Brücke nicht. Diese erscheinen nämlich nicht als a priori unvernünftig, denn in den Spektren sind nur als solche bekannte Eigenschwingungen der Brücke festzustellen. Dagegen zeigten sich in den für die Fahrzeuge ermittelten Frequenzen und Schwingungsformen Erscheinungen, die auf physikalische Weise nicht interpretierbar waren.

Beim vorgenannten Fehler handelt es sich darum, dass der Spurmultiplexer, der beim Datentransfer die von den drei Bandspuren stammenden Signale zu einem einzigen Datenstrom komprimierte, pro Minute Signaldauer eine bis zwei Sekunden neue Daten generierte. Eingehende Untersuchungen ergaben, dass der Grund für diese Erscheinung in der fehlenden Synchronisation der AD-Wandlung der Brücken- und der Fahrzeugsignale zu suchen ist. Der Multiplexer war nicht in der Lage, den Phasenjitter zwischen den Daten über längere Zeit auszugleichen. Die anderslautenden Angaben im Abschnitt 3.41 sind demnach ebenfalls nicht zutreffend. Bei den "neuen" Daten handelte es sich nicht um irgendwelche exotischen Signale, sondern der Multiplexer reproduzierte jeweils während einer gewissen, offensichtlich zufällig auftretenden Zeit, das gerade anstehende Sample und fuhr dann normal weiter.

Dadurch sind zwar die Auswertungen im Zeitbereich nicht von diesem Fehler tangiert,

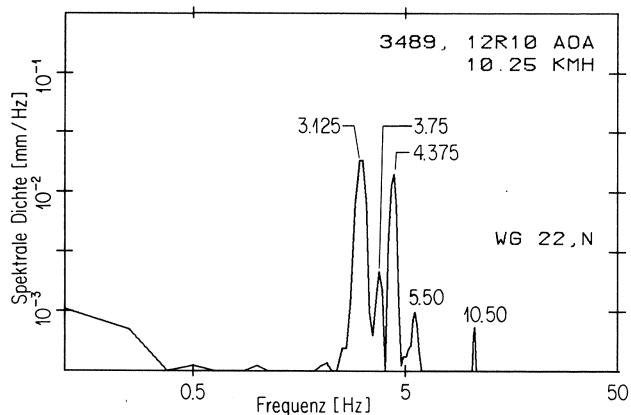
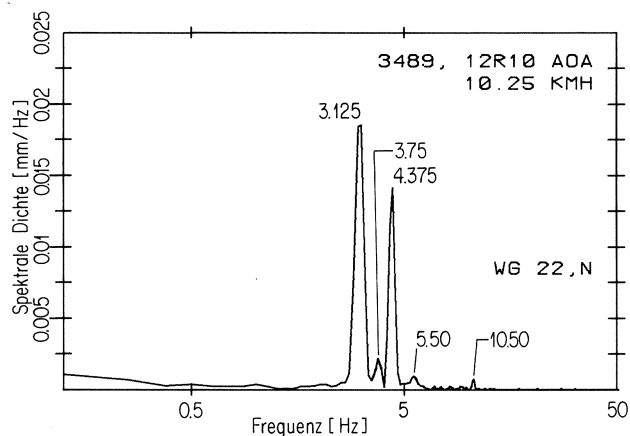
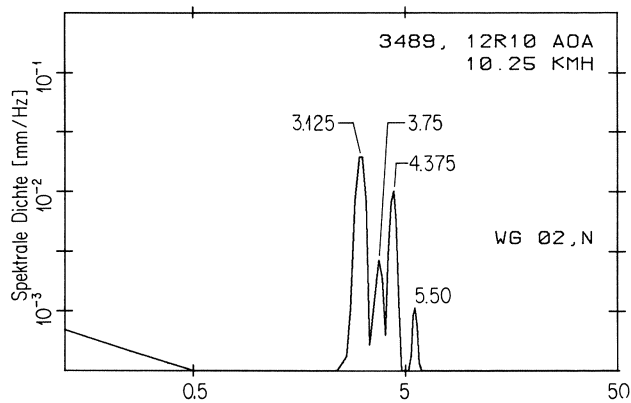
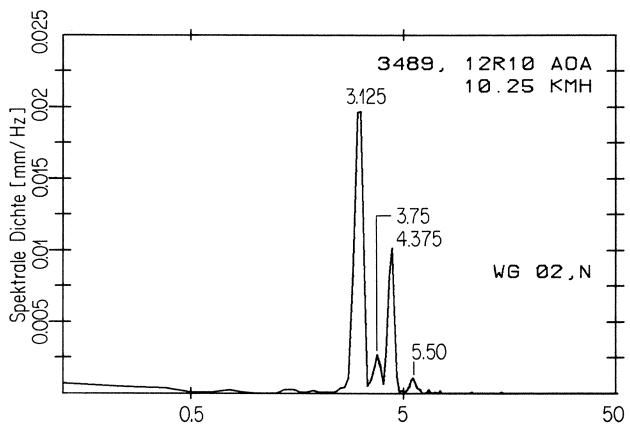
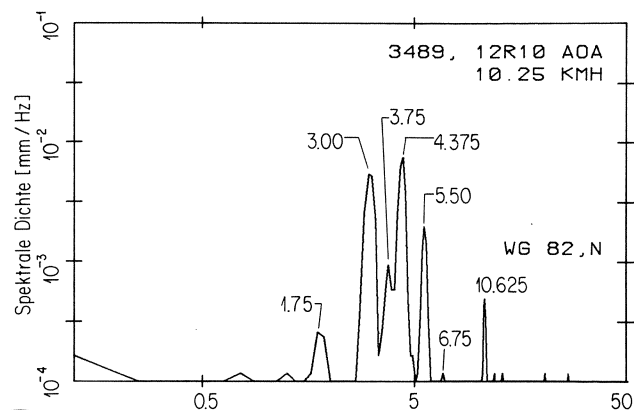
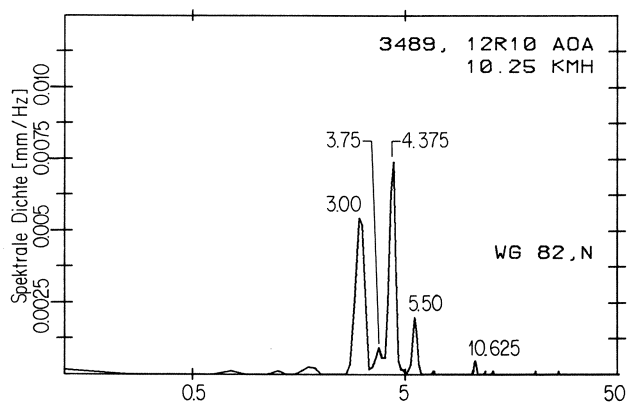


Bild 175: RSD-Spektren von Durchbiegungen der frei ausschlagenden Brücke. Ordinaten linear skaliert.

Bild 176: RSD-Spektren von Durchbiegungen der frei ausschlagenden Brücke. Ordinaten logarithmisch skaliert.

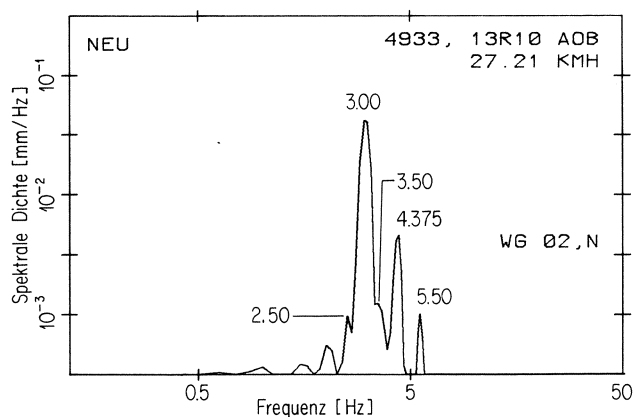
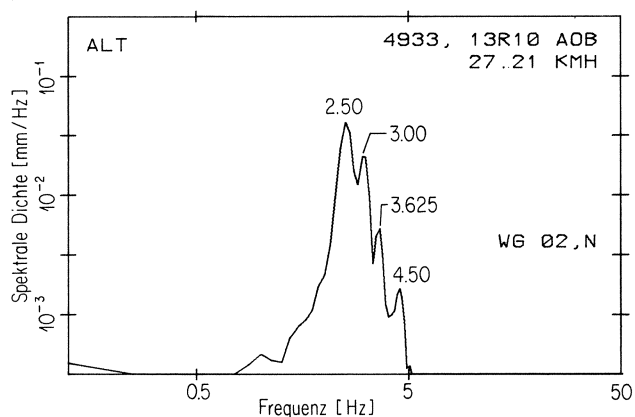


Bild 177: Auswirkungen des Fehlers, der beim Transfer der Signale vom Magnetband in den Rechner auftrat, hier demonstriert am Beispiel eines RSD-Spektrums der frei ausschlagenden Brücke. Links: mit dem Fehler, rechts: ohne Fehler.

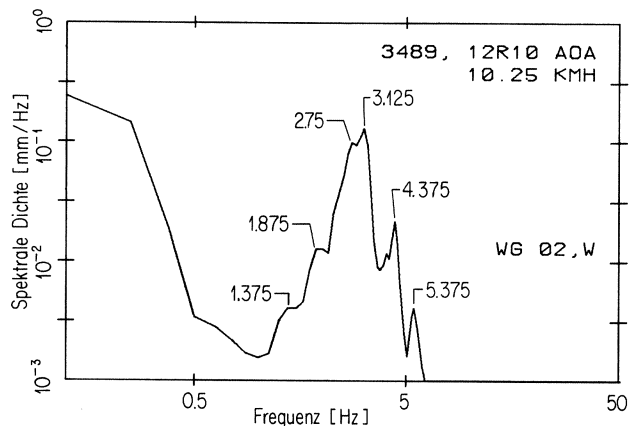
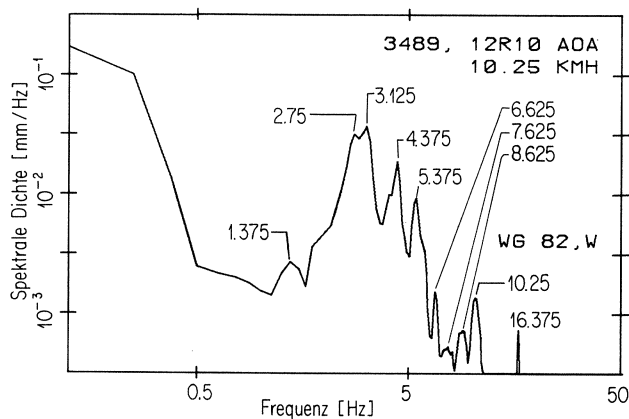


Bild 178: RSD-Spektren von Brückendurchbiegungen während der Ueberfahrt eines Versuchsfahrzeuges.

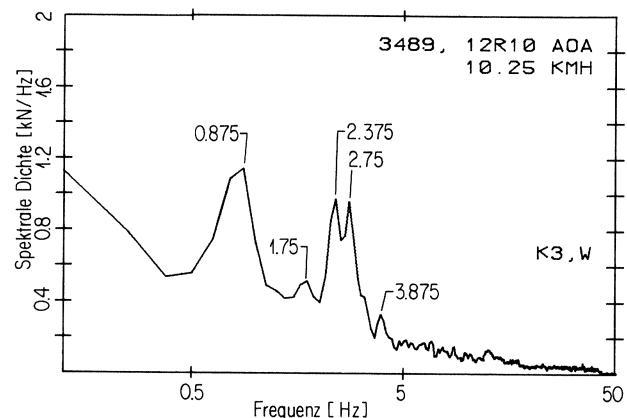
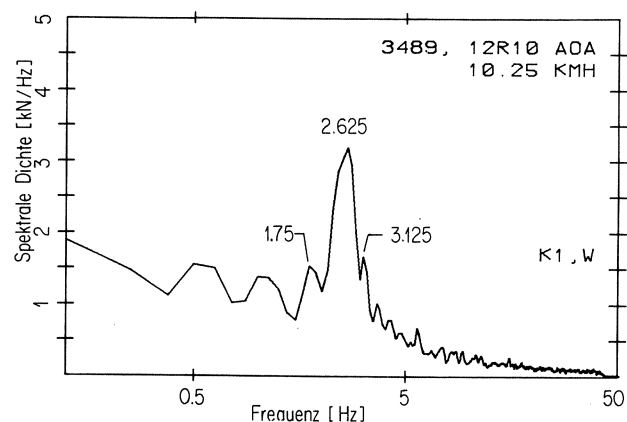


Bild 179: RSD-Spektren der dynamischen Radlasten des Versuchsfahrzeuges für den gleichen Zeitraum wie in Bild 178.

seine Auswirkungen waren jedoch so unauffällig, dass er erst entdeckt wurde, als die Endergebnisse der Auswertungen im Frequenzbereich vorlagen. Erst das Uebereinanderlegen von Plots, die unter unterschiedlichen Bedingungen bezüglich Spurbelegung überspielte Signale eines bestimmten Versuches wiedergaben, zeigte dann, dass die Zeitachse Verzerrungen aufwies, sobald Brücken- und Fahrzeugsignale zusammen transferiert wurden. Die unter solchen Umständen durchgeführten Analysen im Frequenzbereich konnten nur unbrauchbare Resultate liefern.

Betreffend die Analyse des Ausschwingverhaltens der Brücke trat dabei der ausserordentlich unwahrscheinliche Fall ein, dass dieser Fehler zum Erscheinen einer Schwingung in den Spektren führte, die frequenzmässig genau der Schwingung L1 entsprach. Neue Auswertungen, bei denen die Brücken- und die Fahrzeugsignale nacheinander in den Rechner überspielt und ausgewertet wurden, ergaben, dass die Schwingung L1 zwar tatsächlich exi-

stiert, dass sie aber nur mit sehr kleiner spektraler Dichte auftritt. Bild 177 zeigt die Spektren des auf den Versuch Nr. 4933 folgenden Ausschwingvorganges, wie sie sich aus den beiden Auswertungen ergaben.

Der Ausschwingvorgang der Deibüel-Brücke wird demnach von L1 praktisch nicht beeinflusst, und er ist auch entsprechend den bisherigen Erfahrungen an anderen Strassenbrücken bezüglich seines Frequenzinhaltes vollständig stabil. Bezüglich L1 ist dieser Befund gleichbedeutend damit, dass diese Schwingung von den Fahrzeugen auch nicht signifikant angeregt wird.

Eine entsprechende Auswertung ergab, dass L2 über die ersten 20 Perioden eines Ausschwingvorganges einen mittleren Anteil an kritischer Dämpfung von 1.0% ($\delta = 0.063$) bis 0.8% ($\delta = 0.050$) aufweist, dass dieser bis zur 50. Periode kontinuierlich auf etwa 0.5% ($\delta = 0.031$) sinkt und dann konstant bleibt.

b) Die belastete Brücke

Die als Beispiel in Bild 178 dargestellten, logarithmisch skalierten Spektren zeigen, dass die Brückenbewegung von der Schwingung L2 dominiert wird (das Spektrum für WG 22 ist im wesentlichen identisch mit jenem für WG 02 und wurde deshalb weggelassen). In den grösseren Brückenfeldern können noch L3 und L4, im 37-m-Feld auch T2, T3, T4 und L5 identifiziert werden. Die Frequenz von L2 wird offenbar durch die zusätzliche Masse des Fahrzeuges nicht messbar verändert.

Neben der dominanten Schwingung L2 tritt mit beinahe ebenso grosser spektraler Dichte eine Schwingung mit $f \sim 2.75$ Hz auf. Es kann vermutet werden, dass hier ein Zusammenhang mit den vom Fahrzeug ausgeübten Einwirkungen besteht. Bild 179 zeigt die Spektren der Radlasten der beiden linken Räder des Versuchsfahrzeuges für den gleichen Versuch. Die für die Berechnung der in den Bildern 178 und 179 gezeigten Spektren verwendeten Zeitbereiche sind identisch, was auch bei nicht-simultaner Auswertung erreicht werden kann. Das Spektrum der Radlasten zeigt insbesondere für die Hinterachse im fraglichen Bereich ein deutliches Maximum bei $f = 2.625$ Hz, während die Verhältnisse für die Vorderachse etwas weniger eindeutig sind.

Es kann angenommen werden, dass es sich bei der in den Brückenspektren erscheinenden Schwingung mit $f \sim 2.75$ Hz im wesentlichen um eine vom Fahrzeug erzwungene Schwingung handelt. Die vom Fahrzeug erzeugten Brückenschwingungen sind im übrigen recht breitbandiger Natur, wie ein direkter Vergleich der Spektren der belasteten Brücke (Bild 178) mit jenen der unbelasteten Brücke (Bild 176) zeigt. Der vom Fahrzeug erzwungene Anteil verschwindet dabei praktisch sofort, nachdem das Fahrzeug die Brücke verlassen hat: Der Zeitbereich für die Analyse der Schwingungen der unbelasteten Brücke beginnt jeweils rund eine Sekunde später.

Auf Fragen der Interaktion Fahrzeug/Brücke kann hier aus verschiedenen Gründen nicht weiter eingegangen werden. Dies wird, soweit möglich, in [65] versucht.

4 Beurteilung der Resultate

4.1 Ergebnisse der Vorversuche

Die Auswahl der Versuchsfahrzeuge und das Vorgehen beim Bau der Versuchsbeläge geben zu keinen weiteren Diskussionen Anlass. In beiden Fällen entsprach das Ergebnis der Bemühungen den Erwartungen. Es bleibt lediglich zu bedauern, dass es nicht gelang, einen dritten Belag mit weiter verbesserter Ebenheit in die Versuche einzubeziehen.

Bezüglich der Methoden für die Bestimmung der Belagsunebenheiten kann vermerkt werden, dass die ISETH-Methode sehr einfach in der Durchführung ist und mit dem maximalen W-Wert und dem s_W -Wert aussagekräftige Mittel für die Beurteilung der Ebenheit liefert. Zumindest in der Schweiz (und der DDR), wo die Methode üblich und auch normiert ist, wäre es mit wenig Aufwand verbunden, sie systematisch bei dynamischen Versuchen an Strassenbrücken anzuwenden. Allerdings ist festzustellen, dass eine Messstrecke von gut 100 m für die Bestimmung von s_W -Wert und Spektrum bereits recht deutlich unter der normierten Mindestlänge von 250 m liegt. Für gezielte wissenschaftliche Anwendungen hat es sich als wesentlicher Vorteil erwiesen, dass die ISETH-Messungen durch solche mit der IFF-Methode ergänzt worden sind. Die Belagsvermessung mit dem Braunschweiger Profilographen liefert nämlich nicht nur die zwei für die Beschreibung eines "linearen" Unebenheitsspektrums notwendigen Parameter, sondern das Längsprofil steht auch punktweise in deterministischer Form zur Verfügung.

An der RWTH in Aachen kürzlich durchgeführte Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass es für die exakte Nachrechnung eines dynamischen Belastungsversuches nicht genügt, lediglich die Spektrumsparameter zu kennen. Um das für eine Berechnung vorzuzugende, spezifische Längsprofil des Fahrbahnbelages aus einem gegebenen Spektrum zu bestimmen, müssen Phasenbeziehungen definiert werden. Da das Spektrum selbst keine Phaseninformationen enthält, ist man dabei auf Annahmen angewiesen. Je nach Wahl dieser Phasenbeziehungen ergeben sich für ein und dasselbe Unebenheitsspektrum zum Teil erhebliche Unterschiede in der Brückenreaktion in einem bestimmten Punkt. Will man Feldversuche mittels einer Computersimulation zuverlässig nachrechnen, ist es deshalb unter anderem

erforderlich, über das Fahrbahnprofil in deterministischer Weise exakt informiert zu sein.

Die Anlage für die Messung der dynamischen Radlasten bewährte sich in ihrer modifizierten Form gut. Wegen des damit verbundenen Aufwandes, und auch, weil die Auswertung der in diesem Bericht beschriebenen Versuche noch nicht abgeschlossen ist, wurde sie aber bei routinemässigen EMPA-Versuchen bisher nicht eingesetzt. An Verbesserungen könnte man sich vorstellen, dass die Nichtlinearität der LSK-Kurven (Transformation Optospannung/Radlast) hardwaremässig noch vor der Aufzeichnung der Signale ausgeglichen würde. Dies wäre relativ einfach realisierbar, setzte aber voraus, dass man die Randbedingungen "Reifen", "Reifendruck", "Reifeneinfederung unter statischer Last" und "optischer Winkel" streng überwachte. Ein echter Beitrag für weitere Untersuchungen wäre die Entwicklung einer Anlage, die auch für Doppelachsen einsetzbar wäre.

Die Bestimmung des dynamischen Uebertragungsverhaltens schwerer Fahrzeuge mittels harmonischer Anregung mit frequenzunabhängig konstanter Amplitude erwies sich als wenig erfolgreich. Infolge der ausgeprägten Nichtlinearität der Aufhängungen wäre es zumindest notwendig, die Anregungsamplituden den Unebenheiten der interessierenden Fahrstrecke anzupassen. Dies müsste nicht nur im Weg- sondern auch im Zeitfrequenzbereich geschehen, denn die ersten (fehlerfreien) Auswertungen zeigen, dass bei gegebener Fahrbahn nicht nur die Amplituden der Radlasten sondern auch ihr Frequenzinhalt in beachtlichem Ausmass von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sind. Anders ausgedrückt: Die Uebertragungsfunktion eines Fahrzeuges ist nicht, wie die Theorie dies voraussetzt, eine Fahrzeugkonstante, sondern sie kann je nach den Randbedingungen stark variieren.

Die für die Bestimmung des dynamischen Uebertragungsverhaltens der Bergspurbrücke Deibüel durchgeführten Versuche lieferten im wesentlichen die gesuchten Informationen. Wenn hohe Frequenzgenauigkeit angestrebt wird, ist der Einsatz von rein harmonisch angesteuerten, servohydraulischen Erregern auch heute noch ein durchaus übliches Verfahren. Wegen des grossen Zeitaufwandes, der mit dem manuellen Frequenzsweep verbunden ist, werden solche Schwinger vermehrt mit Rauschsignalen angesteuert. Die gewonnene Zeit wird meist in eine wesentlich intensivierte Instrumentierung gesteckt, wobei

heute fast ausschliesslich mit rasch umsetzbaren Beschleunigungsaufnehmern gearbeitet wird. Damit legt man das Hauptgewicht auf die Bestimmung der Schwingungsformen und vermeidet so die Probleme, wie sie bei den Versuchen an der Deibüel-Brücke bei höheren Frequenzen und damit komplexeren Formen deutlich zutage getreten sind. Der von der EMPA bereits praktisch erprobte Einsatz des heute modernsten Hilfsmittels, der experimentellen Modalanalyse, reduziert den Aufwand für die Auswertung solcher Messungen um mindestens zwei bis drei Zehnerpotenzen. Bei geschickter Wahl des Anregungsverfahrens - Stichwort: kompakter, mobiler, sich selbst ver- und entsorgender Erreger (Bild 180) - wird so die Bestimmung des Uebertragungsverhaltens einer Brücke zu einer effizient lösbaren Routineaufgabe.

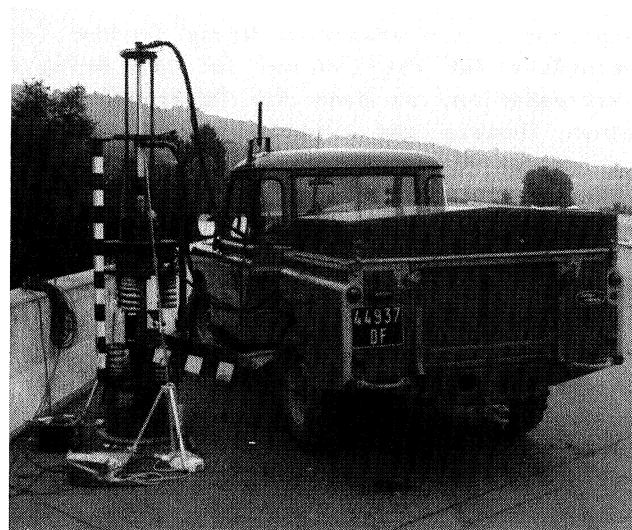


Bild 180: Erreger, wie sie heute für die Modalanalyse von Brücken verwendet werden. Oben: Impulsanregung, unten: Rauschanregung. Beide Erreger benötigen ausser Benzin oder Dieselkraftstoff keine Ver- oder Entsorgungsmittel.

4.2 Ergebnisse der Hauptversuche

Infolge eines beim Transfer der Messsignale vom Magnetband in den Rechner aufgetretenen Fehlers (siehe Abschnitt 3.79) muss die Auswertung im Frequenzbereich wiederholt werden. Der vorliegende Bericht enthält deshalb nur die Ergebnisse der Auswertung im Zeitbereich.

4.21 Die dynamischen Radlasten

Die Standardabweichung der dynamischen Radlasten, auch als Radlastschwankung bezeichnet, nimmt mit der Fahrgeschwindigkeit zu. Theoretisch geht diese Zunahme mit der Quadratwurzel aus der Fahrgeschwindigkeit. Für die Fahrten auf dem Belag A ergab sich im wesentlichen Übereinstimmung zwischen Theorie und den gemessenen Werten, wobei die gemessene Zunahme im Mittel etwas kleiner ist als theoretisch erwartet. Diese Tendenz ist verstärkt für die Fahrten auf dem Belag B festzustellen, so dass die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment hier grösser ist. Einen Ausnahmefall stellt offenbar das Fahrzeug 14R auf dem Belag A dar, wo die Radlastschwankung praktisch linear mit der Fahrgeschwindigkeit zunimmt.

Als numerischer Anhaltspunkt seien mittlere Radlastschwankungen für den Belag A, einen Reifendruck von 10 bar und Geschwindigkeiten von $v = 15 \text{ km/h}$ und $v = 60 \text{ km/h}$ genannt: Für einfach bereifte Achsen ist $\sigma_F(15) \sim 2 \text{ kN}$ und $\sigma_F(60) \sim 3.5 \text{ kN}$, für doppelt bereifte Achsen ist $\sigma_F(15) \sim 4.5 \text{ kN}$ und $\sigma_F(60) \sim 7.5 \text{ kN}$.

Bei hohem Reifendruck resultieren im allgemeinen etwas höhere Radlastschwankungen. Im unteren Geschwindigkeitsbereich ist dies immer der Fall, während für $v > 30 \dots 40 \text{ km/h}$ Ausnahmen von dieser Regel aufgetreten sind.

Mit zunehmender Unebenheit der Fahrbahn nehmen die Radlastschwankungen zu. Die Zunahme ist am grössten für $v = 40 \dots 50 \text{ km/h}$ und nimmt auf beiden Seiten des Geschwindigkeitsspektrums ab. Für den Belag B erreichen die Radlastschwankungen etwa zwischen 60% und 80% der für den Belag A gültigen Werte.

4.22 Die Brückenreaktionen

Eine nähere Untersuchung der in den verschiedenen Messpunkten erfassten Zeitsignale

ergibt, dass die Durchbiegungssignale in ihrem Charakter durchaus untereinander vergleichbar sind, dass dies aber für die Dehnungssignale nicht unbedingt der Fall ist. Für die Durchbiegungssignale ist lediglich festzustellen, dass die im 32-m-Feld gemessenen Signale durch vergleichsweise kleine dynamische Amplituden auffallen. Bei den Dehnungen sind aber je nach Lage der Messstelle Signale mit stark unterschiedlichen Charakteristika festzustellen. Innerhalb einer Gruppe von Messstellen, z.B. der Dehnungen der unteren Querbewehrung der Fahrbahnplatte in der Mitte zwischen den Stegen, sind diese Charakteristika aber jeweils konstant. Aus der spezifischen Form der Zeitsignale für die Dehnungen der unteren Längsbewehrung der Fahrbahnplatte zwischen den Stegen ergab sich, dass die sonst übliche Art der Bestimmung des dynamischen Inkrementes in diesem Fall nicht geeignet ist. Statt die jeweils maximalen, vorzeichenbehafteten statischen und dynamischen Signalwerte, müssen hier die entsprechenden Signalamplituden (ohne Vorzeichen) miteinander verglichen werden.

In einem nächsten Schritt wurden die pro Messstelle maximalen dynamischen Inkremente ϕ bestimmt, wobei unabhängig von den Randbedingungen alle Versuche berücksichtigt wurden. Dabei ergaben sich die folgenden Bereiche:

• Fahrten ohne Brett:

- Durchbiegungen : 45% - 88%
- Dehnungen zwischen den Stegen : 29% - 87%
- Dehnungen an der Konsole : 32% - 38%

• Fahrten mit Brett:

- Durchbiegungen : 152% - 221%
- Dehnungen zwischen den Stegen : 191% - 237%
- Dehnungen an der Konsole : 156%

Die oberen Grenzen dieser Bereiche sind für Durchbiegungen und Dehnungen zwischen den Stegen etwa gleich. Für Dehnungen der Einspannbewehrung der Konsole, insbesondere für Fahrten ohne Brett, liegt diese Grenze deutlich tiefer. Untersucht man die Herkunft der pro Messstelle absolut grössten gemessenen dynamischen Inkremente, stellt man fest, dass es keine Parameterkombination Fahrzeug/Reifendruck/Belag gibt, die in allen Fällen massgebend wäre. Immerhin ist ein

deutliches Uebergewicht der MD-Fahrzeuge, des Belages A und des hohen Reifendruckes 10 bar zu verzeichnen. Die für schweizerische Verhältnisse beträchtlich zu schweren Fahrzeuge Nr. 52R und 76R erzeugten keine massgebenden dynamischen Inkremente.

In einem nächsten Schritt wurde der Zusammenhang mit den Resultaten der routinemässigen EMPA-Versuche hergestellt. Es ergab sich, dass unter den als "standardmässig" zu bezeichnenden Bedingungen "Zweiachser, beliebiger Reifendruck, Fahrachse A, Belag B, Messung der Durchbiegung in den Feldmitten", für die Messstellen WG 02 und WG 22 für Fahrten ohne Brett dynamische Inkremente im Bereich der bisher bei anderen Brücken festgestellten Grösstwerte, für die Messstelle WG 82 aber nur ein durchschnittlicher Wert resultierten. Dementsprechend ist die Empfindlichkeit zumindest der beiden grösseren Felder der Bergspurbrücke Deibüel auf die dynamischen Wirkungen des Schwerverkehrs für Fahrten ohne Brett als gross zu bezeichnen. Für Fahrten mit Brett im 41-m-Feld resultierten dynamische Inkremente durchschnittlicher Grösse. Daraus ergibt sich, dass die Deibüel-Brücke durchaus dazu geeignet ist, grundsätzlich aussagekräftige Informationen über das Verhalten solcher (für Fahrten ohne Brett) dynamisch kritischer Brücken zu liefern.

Weitet man den Bereich der "standardmässigen" Randbedingungen durch Einbezug des unebenen Belages A und der Nicht-Zweiachser aus, zeigt sich, dass das dynamische Inkrement DI für Fahrten ohne Brett Werte erreichen kann, die höher liegen als die bei routinemässigen Versuchen festgestellten Grösstwerte. Für Fahrten mit Brett im 41-m-Feld werden jetzt ebenfalls Werte im Bereich des bisher festgestellten Maximums erreicht. Dies ist nicht eine Folge der nicht-standardgemässen Belageebenheit, sondern geht auf den Einbezug der Nicht-Zweiachser zurück.

Als wesentlichstes Ergebnis dieser Untersuchung der festgestellten Maximalwerte des DI wurde die Normvorschrift für den dynamischen Beiwert von Strassenlasten [13] formuliert (Bild 165). Sie definiert diesen Beiwert in Funktion der Grundfrequenz einer Brücke, wie sie sich aus den routinemässigen EMPA-Versuchen für Fahrten ohne Brett ergab, wobei die Grösstwerte den Ergebnissen der Versuche an der Deibüel-Brücke angepasst wurden. So ergab sich für Einzelfahrzeuge ein Wert $\Phi_1 = 1.8$ und für eine Gruppe oder eine Kolonne

von Fahrzeugen ein Wert $\Phi_2 = 1.4$. Bezüglich der Belageebenheit wurde dabei vorgeschlagen, die Anwendbarkeit der erwähnten Grösstwerte für den dynamischen Beiwert auf Brücken zu beschränken, deren Kennwerte für die Fahrbahnebenheit die in der Norm SNV 640'521a [51] angegebenen Grenzwerte nicht überschreiten. Dabei handelt es sich um Grenzwerte, bei deren Ueberschreiten die erwähnte SNV-Norm das Ergreifen baulicher Massnahmen zur Verbesserung der Fahrbahnebenheit fordert. Der auf der Deibüel-Brücke vorhandene Belag A wies Ebenheitskennwerte auf, die im Bereich dieser Grenzwerte lagen.

In weiteren Schritten wurde der Verlauf des dynamischen Inkrementes ϕ über die Fahrgeschwindigkeit v , als $\phi(v)$ -Funktion oder DI-Verlauf bezeichnet, untersucht. Dieser Verlauf weist zum Teil über den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich eine recht klar ausgebildete charakteristische Form auf, mit DI-Struktur bezeichnet, zum Teil ist er aber auch recht eigentlich chaotisch. Wo klare DI-Strukturen ausgebildet sind, können Strukturelemente wie "Berg", "Tal" und "linearer Anstieg" unterschieden werden. Einige der festgestellten DI-Strukturen sind in Bild 171 zusammengestellt. Im allgemeinen sind die DI-Verläufe für Durchbiegungen gut strukturiert, während dies für Dehnungen, und hier insbesondere für Fahrten ohne Brett, meist nicht der Fall ist. Da diese Dehnungssignale offenbar nicht von der dynamischen Interaktion Fahrzeug/Brücke, sondern von unvermeidlichen versuchstechnischen Streuungen massgebend beeinflusst werden, sind sie für Parameterstudien, die auf diese Interaktion zielen, von zweifelhaftem Wert.

Der Vergleich von verschiedenen DI-Strukturen kann zu einem der folgenden Ergebnisse führen:

- Die Strukturen sind immer gleich.
- Die Strukturen weisen grundsätzliche Unterschiede auf, indem zum Beispiel eines der Strukturelemente nicht immer vorhanden ist.
- Die Strukturen sind immer gleich, weisen jedoch sogenannte vertikale Strukturstreuungen auf, indem eines oder mehrere der Strukturelemente mit unterschiedlicher Intensität ausgebildet sind.
- Die Strukturen sind immer gleich, weisen aber sogenannte horizontale Strukturstreu-

ungen auf, indem die Fahrgeschwindigkeit, bei der der Spitzenwert eines oder mehrerer der Strukturelemente auftritt, nicht immer gleich ist.

- Es treten sowohl vertikale als auch horizontale Strukturstreunungen auf.

Die vergleichenden Untersuchungen der DI-Verläufe umfassen drei Abschnitte, in denen jeweils einer der Versuchsparameter "Fahrzeug", "Reifendruck" und "Belag" variiert und die anderen konstant gehalten werden. Für die Fälle "Reifendruck" und "Belag" liegen jeweils Ergebnisse für mehrere Fahrzeuge vor.

Die Untersuchung des Parameters "Fahrzeug" erfolgte für die Versuchsserien auf dem Belag A mit einem Reifendruck von 10 bar. Die Versuchsfahrzeuge wurden dabei in drei Gruppen von Einzelfahrzeugen (2D, MD und LS) sowie in fünf Gruppen mit mehreren Fahrzeugen (2LH, 2MH, 4MH, 2MN und 4MN) eingeteilt. Für die Gruppen 2D und MD ist eine Diskussion der DI-Strukturen für Durchbiegungen in den meisten Fällen möglich. Für Fahrten mit Brett trifft dies auch für die LS-Fahrzeuge zu, während in den übrigen Fällen klare DI-Strukturen nur ausnahmsweise festzustellen sind. Die DI-Strukturen können je nach Fahrzeuggruppe, Fahrzeug und Messstelle stark unterschiedlich sein.

Innerhalb der Gruppe der 2D-Fahrzeuge variieren die DI-Strukturen für Durchbiegungen in den Mitten der beiden grösseren Brückenfelder und Fahrten ohne Brett jedoch nicht. Für die MD-Fahrzeuge trifft dies für die Mitte des 37-m-Feldes zu. Die Variation der Fahrzeugparameter, wie zum Beispiel des Radstandes, bewirkt hier lediglich vertikale Strukturstreunungen. Diese sind für die MD-Fahrzeuge geringer als für die 2D-Fahrzeuge. Es ist deshalb für den DI-Verlauf für eine gegebene Messstelle sehr wohl wesentlich, zu welcher Gruppe ein bestimmtes Versuchsfahrzeug gehört. Dagegen beeinflusst die Wahl eines bestimmten Fahrzeuges aus der 2D- oder der MD-Gruppe im allgemeinen lediglich das Strukturelement (bzw. die Fahrgeschwindigkeit), bei dem das maximale DI auftritt und dessen absolute Grösse.

Für die Untersuchung des Einflusses des Reifendruckes standen die Resultate für 10 Fahrzeuge mit Reifendrücken von 10 bar und 6 bar (zum Teil auch 8 bar) und Fahrten auf dem Belag A zur Verfügung. Soweit vorhanden, werden die DI-Strukturen als solche vom Rei-

fendruck im allgemeinen nicht beeinflusst. Im einzelnen ergeben sich jedoch oft beträchtliche vertikale und vereinzelt auch horizontale Strukturstreunungen, wobei kein offensichtlicher, immer gültiger und einfacher Zusammenhang zwischen der Grösse des Reifendruckes und seinem Einfluss auf das dynamische Inkrement zu erkennen ist.

Der Einfluss der Belagsebenheit konnte anhand der Resultate für drei 2D- und ein MD-Fahrzeug (Reifendruck 10 bar) und Fahrten auf zwei Belägen mit deutlich verschiedener Ebenheit untersucht werden. Die DI-Strukturen als solche werden von der Belagsebenheit in wesentlich stärkerem Ausmass beeinflusst als vom Reifendruck. Die vertikale Strukturstreunung schwankt zwischen schwach und sehr stark. Bei fast der Hälfte der für Fahrten ohne Brett aufgetretenen Peaks der DI-Strukturen sind zum Teil beachtliche horizontale Strukturstreunungen festzustellen. Wiederum ist ein offensichtlicher, immer gültiger und einfacher Zusammenhang zwischen der Ebenheit des Belages und seinem Einfluss auf das dynamische Inkrement nicht zu erkennen.

Wie nicht anders zu erwarten war, ist eine eingehende Interpretation der Versuchsergebnisse lediglich aufgrund der Untersuchung der Zeitsignale nicht möglich. Es erstaunt nicht, dass die Untersuchung des Einflusses der drei vorgenannten Parameter je nach Wahl zum Beispiel der Messstelle oder auch des Fahrzeuges widersprüchliche Ergebnisse zeitigte. Als Beispiel sei hier aufgeführt, dass für Fahrten ohne Brett und die DI für Durchbiegungen für das Fahrzeug 76R hoher, für das Fahrzeug 74R aber tiefer Reifendruck massgebend ist.

Schlüssige Aussagen über den Einfluss der drei hier variierten Versuchsparameter auf die dynamische Reaktion der Brücke sind nur dann zu erwarten, wenn zunächst die dynamischen Einwirkungen der Fahrzeuge im Frequenzbereich und die Interaktion Fahrzeug/Brücke sowie deren Beeinflussung durch die variierten Grössen untersucht werden. Dies wird im Bericht [65] versucht werden. Hier bleibt lediglich festzustellen, dass das globale dynamische Verhalten der Deibüel-Brücke von jedem der drei Parameter Fahrzeug/Reifendruck/Belag in signifikanter Weise beeinflusst wird. Dabei ist der Einfluss der Belagsebenheit besonders deutlich ausgeprägt, weshalb sich die weitere Untersuchung auf diesen Parameter konzentrieren wird.

5 Dank

Die Zahl der Personen, die an Planung, Durchführung und Auswertung der hier beschriebenen Versuche und an der Erstellung dieses Berichtes beteiligt waren, ist gross. Auch wenn es nicht möglich ist, alle Leiter der im folgenden erwähnten Institutionen und die direkt involvierten Personen namentlich zu nennen, liegt es dem Verfasser sehr daran, ihnen allen hier seinen besten Dank für ihre wertvolle Mitarbeit auszusprechen.

Um mit der strategischen Ebene zu beginnen: Ein besonderer Dank des Verfassers geht an die Kommission für Strassenbauforschung des EVED (früher des EDI), den Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein SIA und an die Direktionen der EMPA und des Tiefbauamtes des Kantons Zug, ohne deren finanzielle und/oder ideelle Unterstützung dieses Projekt nicht hätte realisiert werden können. Als begleitende Kommission von seiten des EVED amtierte die Kommission 160 des SIA, "Einwirkungen auf Tragwerke", insbesondere die Arbeitsgruppe 3, "Dynamische Wirkungen".

Auf der taktischen Ebene trugen die folgenden, in zwangloser Reihenfolge aufgezählten EMPA-Abteilungen, Institute und Firmen in wesentlichem Mass zum Gelingen des Projektes bei: Die EMPA-Abteilungen 116 (Massivbau), 173 (Messtechnik), 177 (Akustik), 111 (Beton und Bindemittel), 174 (Konstruktion und Werkstatt, Zeichnungsbüro), 115 (Holz), 171 (Public Relations, Fotodienst, Hausdruckerei), 172 (Mathematik und Informatik, Bibliothek) und 190 (Kanzlei, Textverarbeitung); das Bundesamt für Strassenbau ASB; das Institut für Strassen- und Untertagbau ISETH, die Abteilung für Industrielle Forschung AFIF (Hybridrechenzentrum), die Abteilung für Industrielle Elektronik AIE und das Institut für Informatik der ETH Zürich; das Institut de la Construction Métallique ICOM der EPF Lausanne; das Institut für Fahrzeugtechnik Iff der TU Braunschweig (BRD); die Firmen Gebr. Saurer AG, Arbon, Magirus Deutz, Ulm (BRD), Jenzer AG, Dietikon, und Walo Bertschinger, Zürich.

Literaturverzeichnis

- [1] Rösli, A. et al, Die Versuche an der Glattbrücke Opfikon, EMPA-Bericht Nr. 192 (1963)
- [2] Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Ueberwachung der Bauten, Nr. 160, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich (1970)
- [3] Cantieni, R., Ladner, M., Stosszuschläge von Strassenbrücken, EMPA-interner Bericht (1974)
- [4] Cantieni, R., Ladner, M., Dynamisches Verhalten von Strassenbrücken, EMPA F+E-Bericht Nr. 10'389 (1975)
- [5] Cantieni, R., Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken unter rollendem Schwerverkehr, EMPA-interner Bericht und SIA-Papier Nr. K 3743-1 (1976)
- [6] Cantieni, R., Dynamische Belastungsversuche an Strassenbrücken in der Schweiz - 60 Jahre Erfahrung der EMPA, EMPA Forschungs- und Arbeitsbericht Nr. 116/1 (1983)
- [7] Egger, G., Ladner, M., Bergspurbrücke Deibüel - Statische Belastungsversuche vom 7. Oktober 1975, EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 34'779/1 (1975)
- [8] Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken, Kreditgesuch an die Kommission für Strassenbauforschung des EDI, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Papier Nr. K 3754 (1977)
- [9] Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken, Kreditgesuch an die Kommission für Strassenbauforschung des EDI, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Papier Nr. K 4980 (1980)
- [10] Cantieni, R., Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken, EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 10'584/1 (1977)
- [11] Cantieni, R., Statistische Untersuchung des Schwerverkehrs in der Schweiz, EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 10'502 (1978)

- [12] Bez. R., Cantieni, R., Jacquemoud, J., Modélisation du trafic routier suisse, Ingénieurs et architectes suisses 111 (1985), pp. 429 - 435
- [13] Einwirkungen auf Tragwerke, Vernehmlassungsentwurf der Norm SIA 160, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich (1985)
- [14] Motorfahrzeugbestand in der Schweiz, Statistische Quellenwerke 566 (1975), Eidg. Statistisches Amt, Bern
- [15] Ruckstuhl, F., Achslasterhebungen auf dem National- und Hauptstrassennetz, Strasse und Verkehr 60 (1974), Heft 2
- [16] Hirt, M.A., Jacquemoud, J., Comportement des ponts mixtes sous trafic réel, SIA-Dokumentation 23 (1977), Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich
- [17] Walker, W.H., Ruhl, J.A., Investigation of Dynamic Stresses in Highway Bridges - An Interim Report, Civ. Eng. Studies, Structural Research Series No. 404 (1973), University of Illinois, Urbana, Illinois
- [18] von Becker, P., Die Diskussion um die Vereinheitlichung der Abmessungen und Gewichte von Nutzkraftfahrzeugen in der Europäischen Gemeinschaft (I), Strasse und Autobahn 25 (1974), Nr. 6
- [19] Cantieni, R., Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken - Dynamische Versuche an der Bergspurbrücke Deibüel bei Baar/ZG - Zwischenbericht, EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 10'784/1 (1979)
- [20] Mitschke, M., Dynamik der Kraftfahrzeuge, 1. Auflage, Springer-Verlag (1972), 2. Auflage, Band B: Schwingungen, Springer-Verlag (1984)
- [21] Herrick, R.C., Analytical Study of Weighing Methods for Vehicles in Motion, Highway Research Board, NCHRP Report 71 (1969)
- [22] Bode, O. et al, Vergleich verschiedener Verfahren zur Feststellung der dynamischen Radlast, Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 131 (1959)
- [23] Whittemore, A.P. et al, Dynamic Pavement Loads of Heavy Highway Vehicles, Highway Research Board, NCHRP Report 105 (1970)
- [24] Gersbach, V. et al, Vergleich von Verfahren zur Messung von Radlastschwankungen, Automobiltechnische Zeitschrift 80 (1978)
- [25] Mühlfeld, A., Entwicklung eines hochfrequenztechnischen Verfahrens für Reifen- und Schwingungsmessungen, Diss., Techn. Universität Braunschweig (1949)
- [26] Justi, K., Bestimmung der Radlastschwankungen bei Pkw- und Lkw-Reifen mittels eines kapazitiven Gebers mit Innenelektrode, Diss., Techn. Universität Braunschweig (1972)
- [27] Still, P.B., Winnett, M.A., Development of a Contactless Displacement Transducer, TRRL, Laboratory Report 690 (1975)
- [28] Dickerson, R.S., Mace, D.G.W., Dynamic Pavement Force Measurements With a Two-Axle Heavy Goods Vehicle, TRRL, Supplementary Report 688 (1981)
- [29] v. Bomhard, F.J., Verfahren zur Messung der dynamischen Radlast beim Kraftwagen, Verlag R. Oldenbourg, München (1956)
- [30] Page, J., Grainger, J.W., A Technique for Measuring Vehicle Dynamic Wheel Loads, TRRL, Supplementary Report 98 UC (1974)
- [31] Woodrooffe, J.H.F., LeBlanc, P.A., LePiane, K.R., Effects of Suspension Variations on the Dynamic Wheel Loads of a Heavy Articulated Highway Vehicle, Vehicle Weights and Dimensions Study 11 (1986), Roads and Transportation Association of Canada, Ottawa
- [32] Martini, K.H., Mehrkomponenten-Kraftmessung am rotierenden Rad, Tagung VDI-Gesellschaft "Fahrzeugtechnik - Teilgebiete und Methoden", Bad Homburg 1985, Sonderdruck Firma Kistler (1986)
- [33] Sweatman, P., The Dynamic Loading Performance of Heavy Vehicle Suspensions, Proc. Australian Road Research Board 9 (1978)

- [34] Carey, W.N. Jr., Irick, P.E., The Pavement Serviceability-Performance Concept, Highway Research Board, Bulletin 250 (1960)
- [35] Huschek, S., Befahrbarkeitsmessungen auf Strassen nach der Winkelmessmethode - Neue Untersuchungen, Mitteilungen des Instituts für Strassen- und Untertagbau an der ETH Zürich 28 (1974)
- [36] The AASHO Road Test - History and Description of Project, Highway Research Board, Special Report 61A (1961)
- [37] Quinn, B.E., Zable, J.L., Evaluating Highway Elevation Power Spectra From Vehicle Performance, Highway Research Record 121 (1966)
- [38] Spangler, E.B., Kelly, W.J., GMR Road Profilometer - A Method for Measuring Road Profile, Highway Research Record 121 (1966)
- [39] Holbrook, L.F., Darlington, J.R., Analytical Problems Encountered in the Correlation of Subjective Response and Pavement Power Spectral Density Functions, Highway Research Record 471, (1973)
- [40] Rizenbergs, R.L., Burchett, J.L., Davis, L.E., Pavement Roughness: Measurement and Evaluation, Highway Research Record 471 (1973)
- [41] Walker, R.S., Hudson, W.R., Use of Profile Wave Amplitude Estimates for Pavement Serviceability Measures, Highway Research Record 471 (1973)
- [42] Ostwald, K.-W., Messverfahren für den Oberflächenzustand von Strassen, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 171 (1974)
- [43] Lucas, J., Contrôle de l'uni: L'analyseur de profil en long APL 25, Annales 374 (1979)
- [44] Sulten, P., Herstellung, Erhaltung und Ueberprüfung der Strassenebeneheit, Strasse und Autobahn 31 (1980), Nr. 6
- [45] Hudson, W.R., Road Roughness: Its Elements and Measurement, Transportation Research Record 836 (1981)
- [46] Wambold, J.C. et al, State of the Art of Measurement and Analysis of Road Roughness, Transportation Research Record 836 (1981)
- [47] Quinn, B.E., Problems Encountered in Using Vehicle Ride as a Criterion of Pavement Roughness, Transportation Research Record 946 (1983)
- [48] Walls, J.H., Houbolt, J.C., Press, H., Some Measurements and Power Spectra of Runway Roughness, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 3305 (1954)
- [49] Braun, H., Untersuchungen von Fahrbahnunebenheiten und Anwendungen der Ergebnisse, Diss. TH Braunschweig (1969)
- [50] Ebenheit - Prüfung der Geometrie, Norm SNV 640 520a, Schweizerische Normenvereinigung (1977)
- [51] Ebenheit - Anforderungen, Norm SNV 640 521a, Schweizerische Normenvereinigung (1977)
- [52] Bachner, G., Huschek, S., Grob, H., Bericht über die Ebenheitsmessungen der Versuchsstrecke auf der N4a, ETH Zürich, Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau, Bericht S 538 (1978)
- [53] Braun, H., Messung und Auswertung der Längsunebenheiten der Versuchsstrecke Deibüel bei Baar, Technische Universität Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, Bericht 476 (1977)
- [54] Bachner, G., Huschek, S., Grob, H., Bericht über die Ebenheitsmessung auf der N4a - Versuchsstrecke mit Kunststoffmörtel, ETH Zürich, Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau, Bericht S 578 (1978)
- [55] Braun, H., Auswertung der Längsunebenheiten der Versuchsstrecke Deibüel bei Baar, Technische Universität Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, Bericht 613 (1982)
- [56] Hascher, W., Im Blickpunkt: Telemetrie, Elektronik 28 (1979)
- [57] Lemme, H., Die Pulscod-Modulation (PCM), Elektronik 29 (1980)

- [58] Pöschl, H., FM und PCM, Elektrotechnik 58 (1976)
- [59] Glockmann, H.P., Aufzeichnung und Uebertragung von analogen Messdaten in PCM-Technik, Archiv für technisches Messen (1976)
- [60] Cantieni, R., A Laser System for the Measurement of Displacements of Structures under Static and Dynamic Loading, in: Industrial Applications of Lasers, Edited by H. Koebner, John Wiley & Sons Ltd. (1984)
- [61] Cooley, J.W., Tukey, J.W., An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series, Math. Computation 19 (1965)
- [62] Brigham, E.O., The Fast Fourier Transform, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1974)
- [63] Bachmann, H., Durch Menschen verursachte Bauwerksschwingungen - Am Beispiel einer Turnhalle, Schweizer Ingenieur und Architekt 101 (1983), Nr. 6
- [64] Cantieni, R., Untersuchung von Deckenschwingungen bei einem Bürogebäude, EMPA Forschungs- und Arbeitsbericht Nr. 116/2 (1985)
- [65] Cantieni, R., Beitrag zur Dynamik von Strassenbrücken unter der Ueberfahrt schwerer Fahrzeuge (in Bearbeitung)
- [66] Billing, J.R., Dynamic Loading and Testing of Bridges in Ontario, 1980, Proc. International Symposium on Short and Medium Span Bridges, Toronto (1982), Vol. 1

Häufig verwendete Abkürzungen

Allgemeines

ASB	Bundesamt für Strassenbau
EDI	Eidgenössisches Departement des Innern
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
ETHL	Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne = EPFL
EVED	Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt (BRD)
HRZ	Hybridrechenzentrum, ETHZ
ICOM	Institut de la Construction Métallique, EPFL
Iff	Institut für Fahrzeugtechnik, TUB
ISETH	Institut für Strassen- und Untertagebau, ETHZ
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein
SNV	Schweizerische Normenvereinigung
TUB	Technische Universität Braunschweig (BRD)
ZG	Kanton Zug

Einheiten

bar	Druck, 1 bar = 0.1 MPa = 0.1 N/mm ²
db	Dezibel
Hz	Hertz
GHz	Giga-Hertz
ips	Inch per second
K	Kilo (1024)
km/h	Kilometer pro Stunde
KMH	Kilometer pro Stunde, nur in Grafiken verwendet
kN	Kilo-Newton
KW	Kilo-Worte (1024 Samples)
MB	Megabyte
MD	
MIKROD}	Mikrodehnung, = 10 ⁻⁶
MI	
mm	Millimeter
nm	Nanometer
mW	Milliwatt
N	Newton
V	Volt
W	Watt

Lateinische Buchstaben

A	Amplitude; Radstand; Fläche; Anhang
D	Diagonal bereift
E	Elastizitätsmodul
F	Radlast; Kraft
H	Hinten (am Fahrzeug); Hintereinander
I	Trägheitsmoment
L	Längsbiege-Eigenschwingung; Spannweite; Wellenlänge der Fahrbahnunebenheiten
N	Anzahl Samples in einem Zeitfenster; (Unmittelbar) Nach der Ueberfahrt eines Versuchsfahrzeuges über die Brücke
Q	Querbiege-Eigenschwingung
R	Radial bereift
T	Torsions-Eigenschwingung; Periodendauer
V	Vorne (am Fahrzeug); Vergrößerungsfaktor; Variationskoeffizient; Vor der Ueberfahrt eines Versuchs- fahrzeuges über die Brücke (Phase der Anfahrt)
W	Während der Ueberfahrt eines Ver- suchsfahrzeuges über die Brücke
c	Dämpfungskonstante
f	Frequenz; Eigenfrequenz
g	Erdbeschleunigung (10 m/s^2)
h	Unebenheitshöhe; horizontale modale Amplitude
k	Federkonstante $[\text{kN/mm}]$; Korrekturfaktor
m	Masse
p	Reifendruck
s	Subtangente; Abtastrate $[\text{Hz}]$
v	Fahrgeschwindigkeit

Griechische Buchstaben

Φ	Dynamischer Beiwert; Spektrale Dichte
Ω	Wegkreisfrequenz
α	Temperaturausdehnungskoeffizient
δ	Logarithmisches Dämpfungsdekrement
γ	Kohärenz
ϕ	Dynamisches Inkrement
φ	Phasengang
σ	Standardabweichung; Spannung
ω	Zeitkreisfrequenz

Indices

dyn	dynamisch
gem	gemessen
ger	gerechnet
m	mittel
max	maximal
min	minimal
stat	statisch, quasistatisch

Spezialfälle

Verschiedenes:

A_{stat}	Maximalwert der Reaktion einer Brük- ke unter statischer oder quasistati- scher Last
A_{dyn}	Maximalwert der Reaktion einer Brük- ke unter dynamischer Last
DI	Dynamisches Inkrement
PHI	Dynamisches Inkrement, nur in Grafi- ken verwendet
avg	Mittelwert
Δv	Geschwindigkeitsinkrement
k_1	Reifenfederkonstante $[\text{kN/mm}]$
k_2	Aufbaufederkonstante $[\text{kN/mm}]$
σ_F	Standardabweichung der Radlast, Rad- lastschwankung
log	Dekadischer Logarithmus
ln	Natürlicher Logarithmus

Ebenheit des Fahrbahnbelages:

W-Wert	Neigungsänderung des Längsprofils der Fahrbahn
s_W	Standardabweichung der W-Werte über 250 m Messlänge
Ω_0	Bezugswegkreisfrequenz
$\Phi_h(\Omega)$	Spektrale Dichte der Fahrbahnuneben- heit
$\Phi_h(\Omega_0)$	Bezugsdichte der Fahrbahnoberfläche (Kennwert des Unebenheitsspektrums)
w	Welligkeit der Fahrbahnoberfläche (Kennwert des Unebenheitsspektrums)

Kennlinien/Eichkurven:

RFK	Reifenfederkennlinie $[\text{kN/mm}]$
IRFK	Inverse Reifenfederkennlinie $[\text{mm/kN}]$
EOK	Eichkurve einer Optokamera $[\text{mm/V}]$
LSK	Radlast/Spannungskurve einer Optoka- mera $[\text{kN/PCME}]$
PCME	PCM-Einheiten, Skalierung der AD- Wandlung

Brückeninstrumentierung:

WG	(Induktiver) Wegaufnehmer, -mess- stelle
DMS	Dehnungsmessstreifen, -messstelle
OW	Oberwasserseitig
UW	Unterwasserseitig

Codierung der Versuchsreihen:

- Ei Versuchsreihen zur Bestimmung des Uebertragungsverhaltens der Deibüel-Brücke (E1 und E2)
- Si Stellung des Schwingungserregers auf der Brücke (S1, S3, S4, S10, S11, S12)
- Vi Dynamische Belastungsversuche an der Deibüel-Brücke (V1 bis V4)

Codierung der Versuchsserien:

z.B. "14R10AoB" = Fahrzeug Nr. 14, radial bereift, 10 bar Reifendruck, Fahrachse A, ohne Brett, Belag B

Codierung der Fahrzeuggruppen:

- 2D Zweiachsige Solofahrzeuge
- MD Mehrachsige Solofahrzeuge
- LS Lastenzüge und Sattelschlepper
- MF Gruppen von mehreren Fahrzeugen
- 2LH Fahrzeuge 14R und 12R hintereinander
- 2MH Fahrzeuge 24R und 25AR hintereinander
- 4MH Fahrzeuge 24R, 12R, 25AR und 14R hintereinander
- 2MN Fahrzeuge 25AR und 24R nebeneinander
- 4MN Fahrzeuge 25AR, 24R und 12R, 14R je nebeneinander, paarweise hintereinander

Signalanalyse:

- AD Analog/Digital
- ADC Analog/Digital-Wandler
- DA Digital/Analog
- FFT Fast Fourier Transform
- Δf Frequenzauflösung
- f_c Grenzfrequenz
- PCM Pulse-Code-Modulation
- RMS Root-Mean-Square
- RSD Root-Mean-Square-Density-(Amplituden-Spektrum)
- PSD Power-Spectral-Density-(Varianz-Spektrum)

DI-Strukturelemente:

- A,B,C,D Berg
- T Tal
- T_{AB} Tal zwischen den Bergen A und B
- L Linearer Anstieg von ϕ mit v

Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken unter rollendem Verkehr

**Dynamische Belastungsversuche
an der Bergspurbrücke Deibüel**

Teil B

von Reto Cantieni, dipl. Ing. ETH

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
Abteilung Massivbau
Überlandstrasse 129
CH- 8600 Dübendorf**

Dezember 1988

Inhaltsverzeichnis Teil B, Anhänge

- Anhang 1: Das Uebertragungsverhalten der Deibüelbrücke:
Räumlich dargestellte modale Formen und die
zugehörigen Zeitsignale
- Anhang 2: Die dynamischen Radlasten: Standardabweichung
der Radlast in Funktion der Fahrgeschwindigkeit;
Tabellen und grafische Darstellungen
- Anhang 3: Die Reaktion der Brücke: Beispiele von
Schwingungsaufzeichnungen und $\phi(v)$ -Funktionen
- Anhang 4: Die Reaktion der Brücke: Zusammenstellung der
maximalen dynamischen Inkremente für alle Versuchs-
serien und Instrumente
- Anhang 5: Die Reaktion der Brücke: Grafische Darstellung der
wichtigsten maximalen dynamischen Inkremente in
Funktion des Fahrzeugtyps
- Anhang 6: Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen für fünf
Gruppen von Fahrzeugtypen (Reifendruck 10 bar, Belag A)
- Anhang 7: Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen in Abhängigkeit
vom Reifendruck (Belag A)
- Anhang 8: Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen in Abhängigkeit
von der Fahrbahnoberfläche (Reifendruck 10 bar)

Inhaltsverzeichnis Teil A

ZUSAMMENFASSUNG - RESUME - SUMMARY

1	EINLEITUNG	1
2	VORVERSUCHE	7
2.1	Der Schwerverkehr in der Schweiz	7
2.2	Die Versuchsfahrzeuge	9
2.21	Fahrzeugtypen, Geometrie, Lasten	9
2.22	Kennlinien der Reifen- und Aufbaufedern	21
2.3	Das dynamische Uebertragungsverhalten von zweiachsigen Solofahrzeugen	27
2.31	Theoretische Grundlagen	27
2.32	Experimentelle Bestimmung des Uebertragungsverhaltens mittels harmonischer Anregung	31
2.4	Messung der dynamischen Radlasten schwerer Fahrzeuge	36
2.5	Die Versuchsbrücke	40
2.6	Das dynamische Uebertragungsverhalten der Deibüel-Brücke	42
2.61	Analytische Bestimmung der Eigenschwingungen	42
2.62	Experimentelle Bestimmung der Eigenschwingungen mittels harmonischer Anregung	46
2.63	Vergleich Theorie/Experiment	69
2.7	Der Versuchsbelag	73
2.71	Allgemeines	73
2.72	Belag A	74
2.73	Belag B	81
2.74	Das Brett	84
3	HAUPTVERSUCHE	85
3.1	Das Versuchsprogramm	85
3.2	Die Instrumentierung der Fahrzeuge	86
3.21	Ueberwachung der Fahrgeschwindigkeit	86
3.22	Messung der dynamischen Radlasten	87
3.23	Transfer der Daten vom Fahrzeug zur Messzentrale	91
3.3	Die Instrumentierung der Brücke	94
3.31	Durchbieungsmessung	94
3.32	Dehnungsmessung	94

3.4	Datenaufzeichnung	97
3.41	Mittel	97
3.42	Konzept	100
3.5	Auswertemethoden	100
3.51	Auswertung von digitalisierten dynamischen Signalen	100
3.52	Im Zeitbereich	104
3.53	Im Frequenzbereich	108
3.6	Resultate: Die dynamischen Radlasten	110
3.61	Im Zeitbereich	110
3.62	Im Frequenzbereich	118
3.7	Resultate: Die Reaktion der Brücke	118
3.71	Beispiele von Zeitsignalen und $\phi(v)$ -Funktionen	118
3.72	Die Maximalwerte der dynamischen Inkremente in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp	123
3.73	Vergleich mit den EMPA-Standardversuchen	130
3.74	Charakterisierung der $\phi(v)$ -Funktionen	131
3.75	Die $\phi(v)$ -Funktionen für fünf Gruppen von Fahrzeugtypen (Reifendruck 10 bar, Belag A)	134
3.76	Der Einfluss des Reifendruckes	143
3.77	Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche	150
3.78	Wichtigste Ergebnisse der Auswertung im Zeitbereich	157
3.79	Die Brückenreaktion im Frequenzbereich	161
4.	BEURTEILUNG DER RESULTATE	164
4.1	Ergebnisse der Vorversuche	164
4.2	Ergebnisse der Hauptversuche	166
4.21	Die dynamischen Radlasten	166
4.22	Die Brückenreaktionen	166
5.	DANK	169
	LITERATURVERZEICHNIS	169
	HÄUFIG VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	172

Anhang 1

Das Uebertragungsverhalten der Deibüelbrücke: Räumlich dargestellte modale Formen und die zugehörigen Zeitsignale

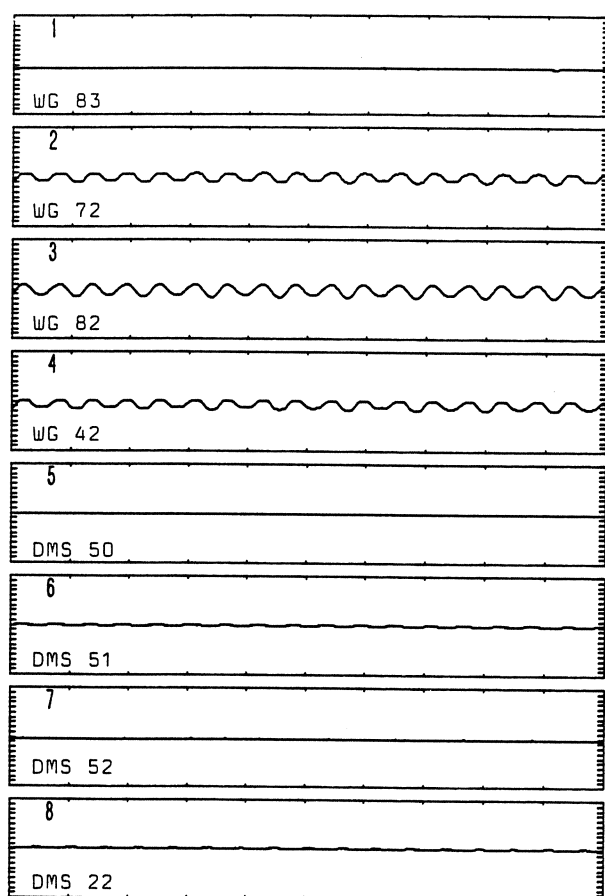
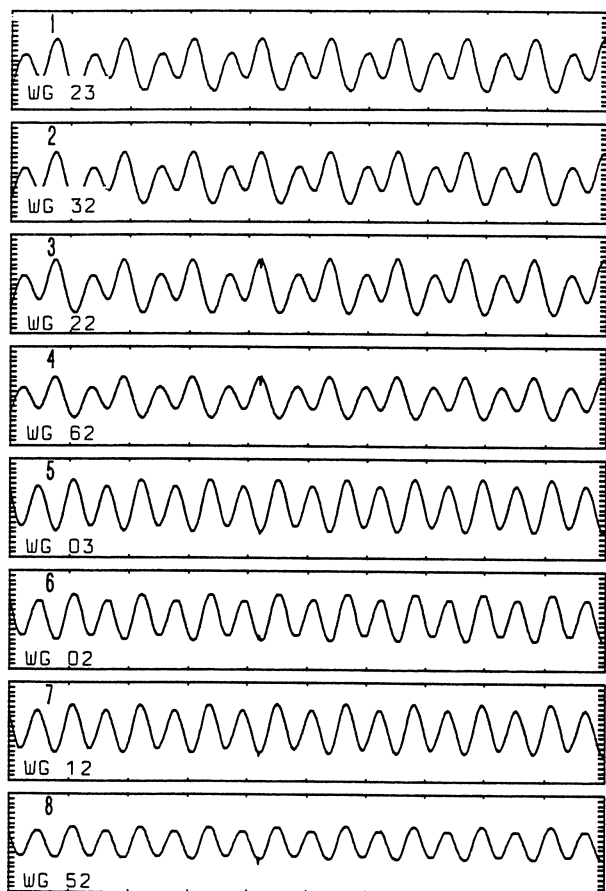
Anhang zum Berichtteil A, Seite 31 ff,
Abschnitt 2.32,

"Experimentelle Bestimmung des Uebertragungsverhaltens mittels harmonischer Anregung".

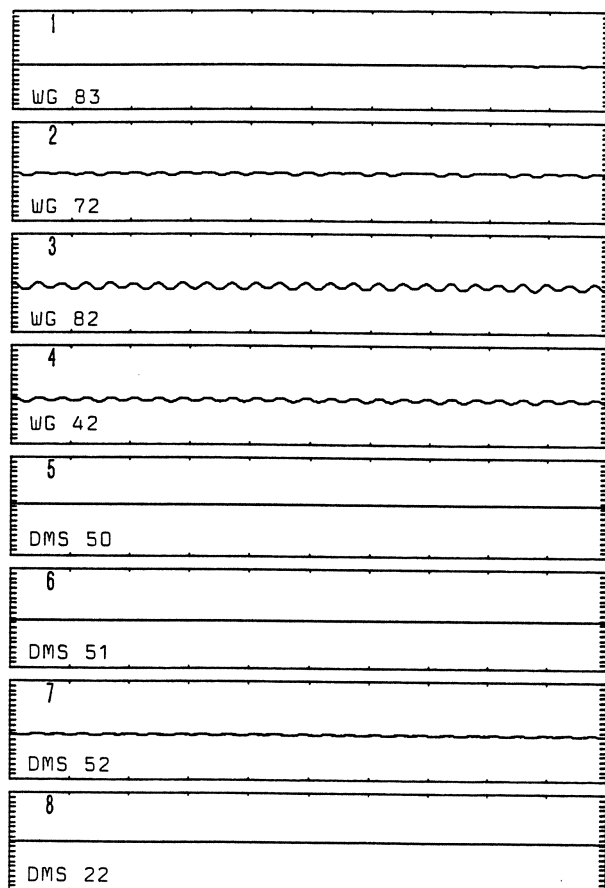
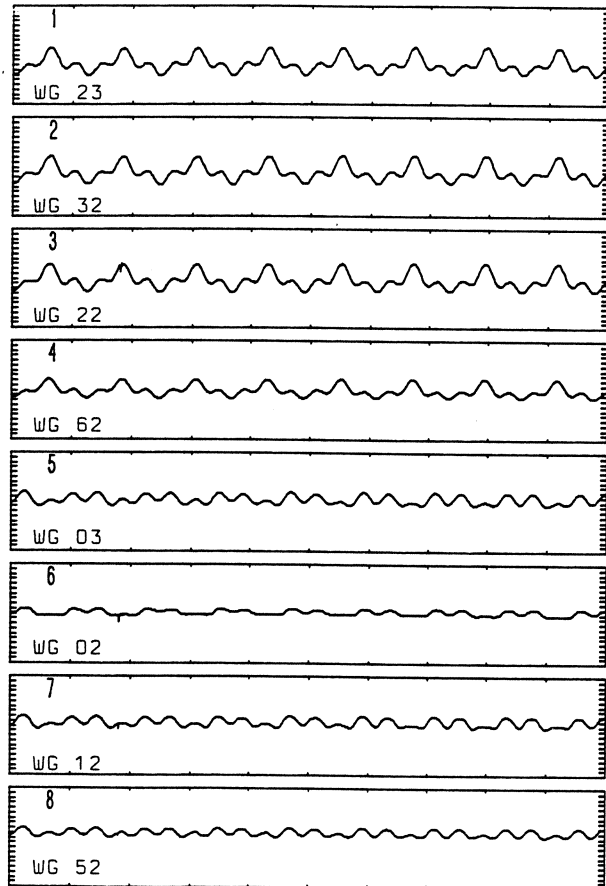
Die Brücke wurde mit einem servohydraulischen Erreger einfach harmonisch angeregt und ihre Reaktion in 16 (E1) bzw. 23 (E2) Punkten erfasst. In der Regel sind jeweils oben auf einer Seite Ausschnitte aus den für eine bestimmte Anregungsfrequenz gemessenen Zeitsignalen und unten auf der gleichen Seite die daraus ermittelte dreidimensionale Eigenform dargestellt. Die Ausnahmen betreffen jene Fälle, wo sich die Brücke nicht rein in einer Eigenschwingung bewegt. Dort sind entweder nur Zeitsignale oder zusätzlich Frequenzspektren dargestellt.

Bei den Darstellungen der Zeitsignale wurde darauf verzichtet, die vertikale Skalierung anzugeben. Dagegen wird die Ueberprüfung der Phasenverhältnisse dadurch erleichtert, dass in einem zweckmässig ausgewählten Punkt der Zeitachse jeweils eine vertikale Linie eingetragen ist.

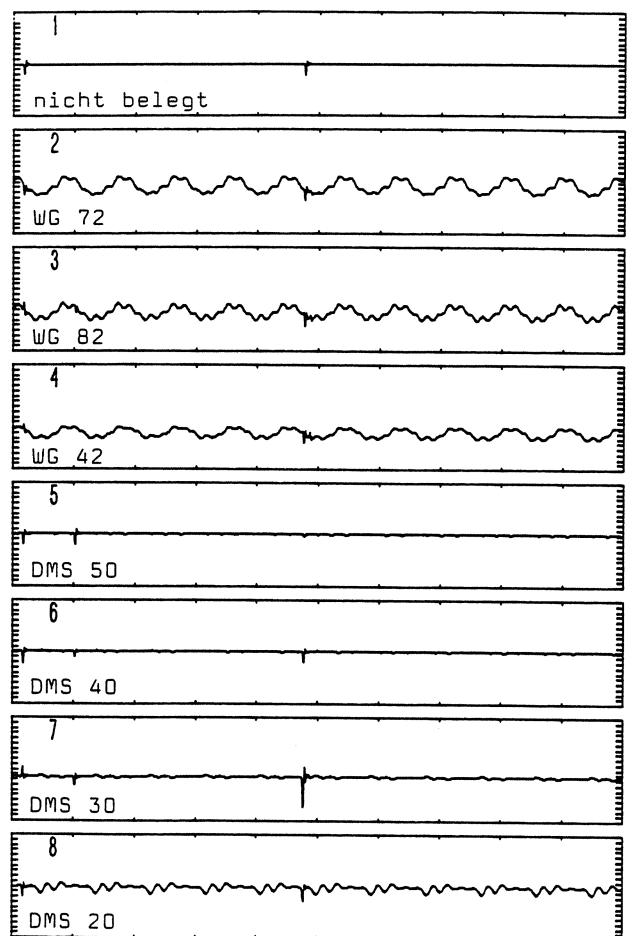
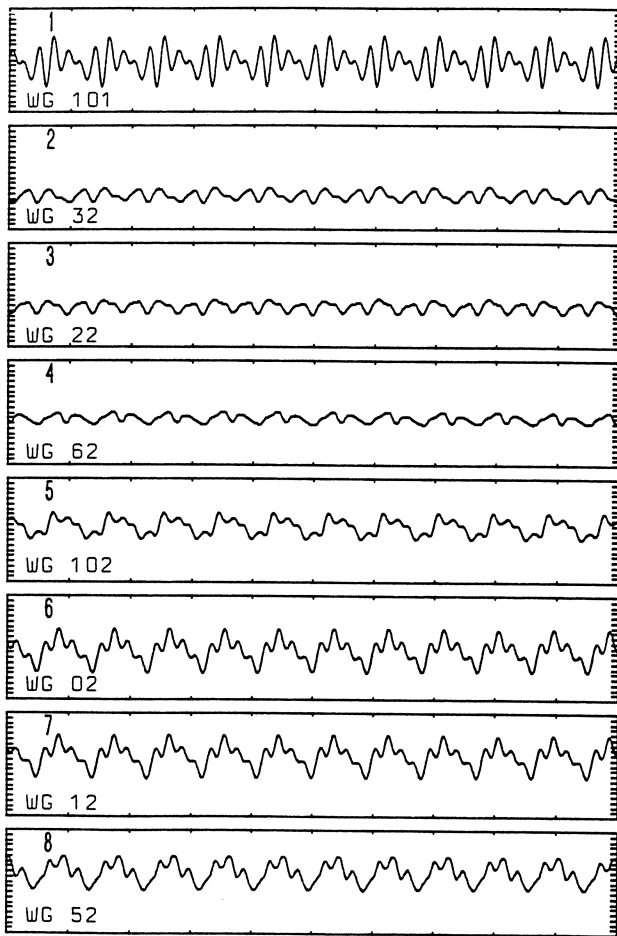
Die Seiten A1.1 bis A1.53 geben Resultate der Versuchsreihe E1, die Seiten A1.54 bis A1.108 solche der Versuchsreihe E2 wieder. Die Darstellungen sind nach zunehmender Anregungsfrequenz geordnet. Die jeweils gültige Schwingerstellung S_i ist angegeben.



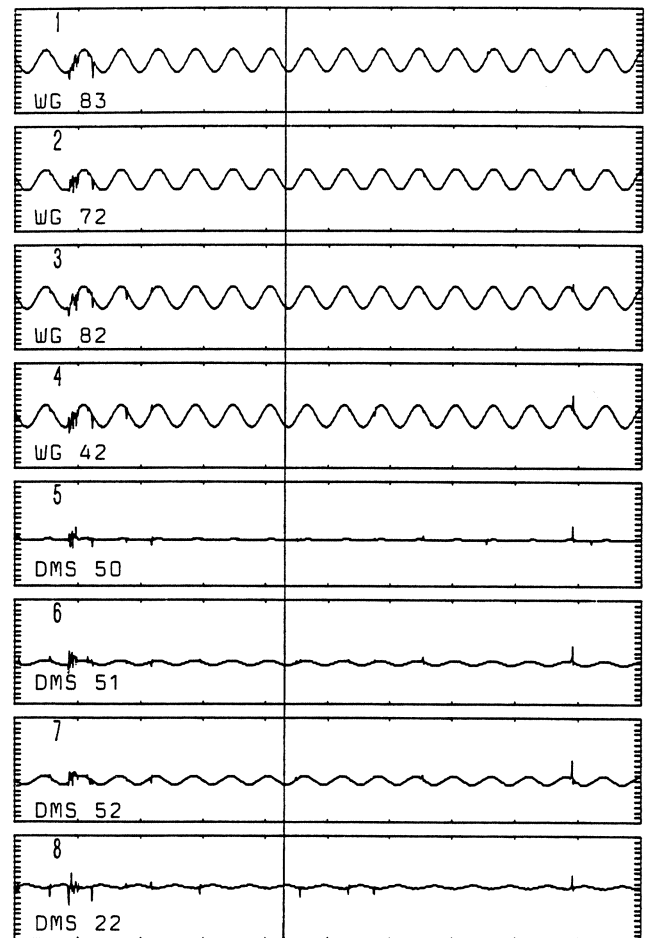
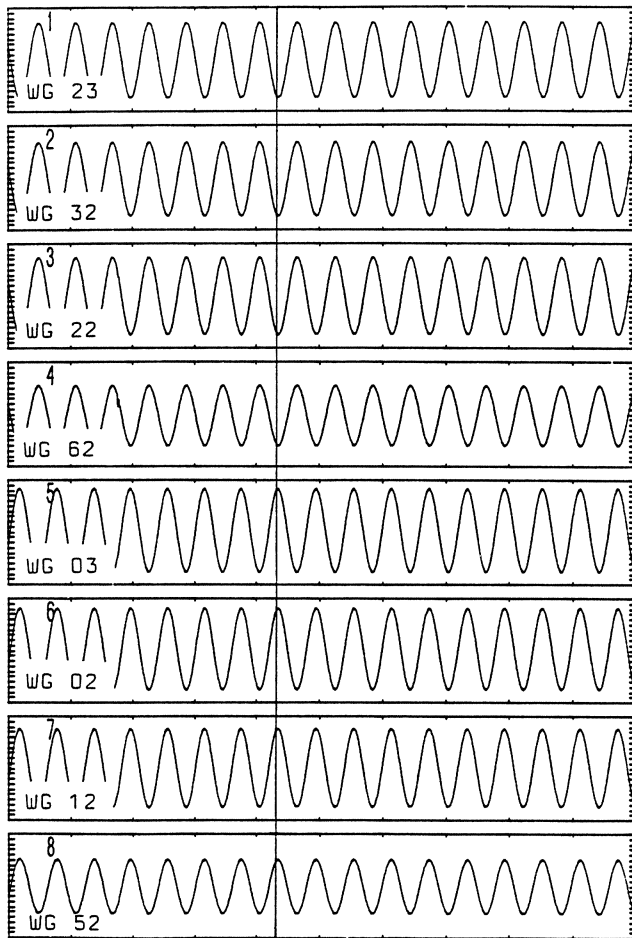
Versuch: E1, S3, $f = 1.59 \text{ Hz}$, Skalierung horizontal: 0.053 s/div



Versuch: E1, S3, $f = 1.50 \text{ Hz}$, Skalierung horizontal: 0.053 s/div

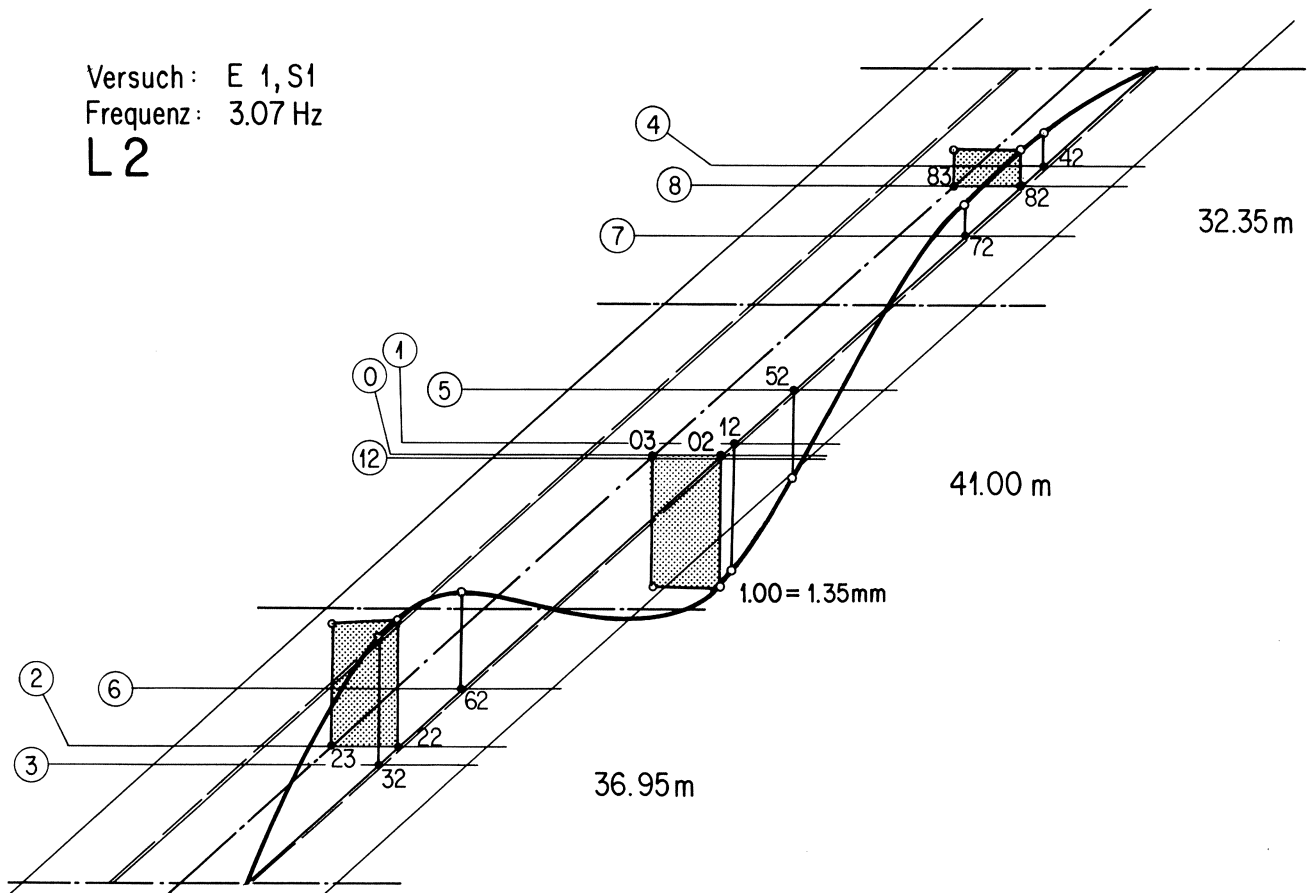


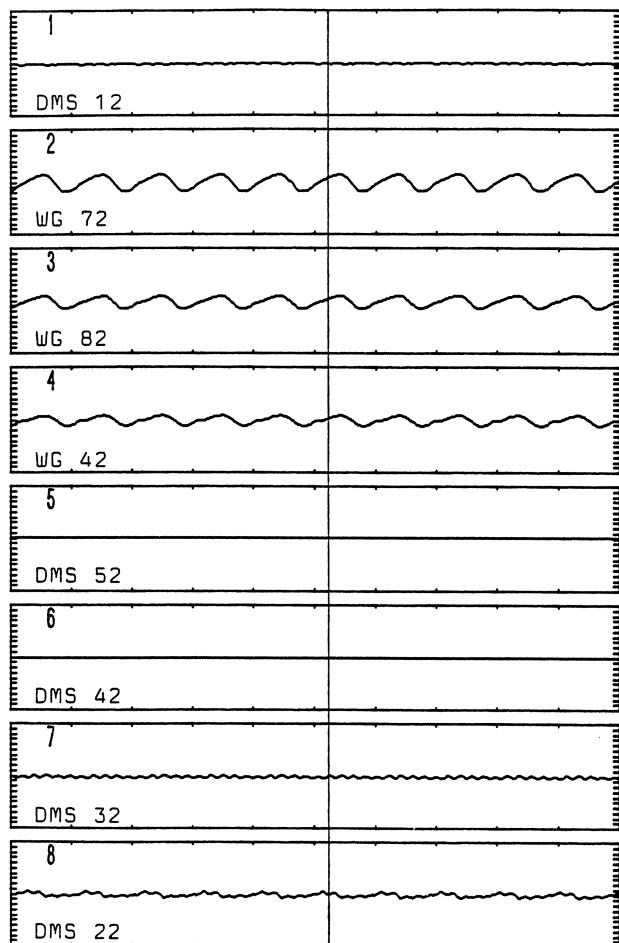
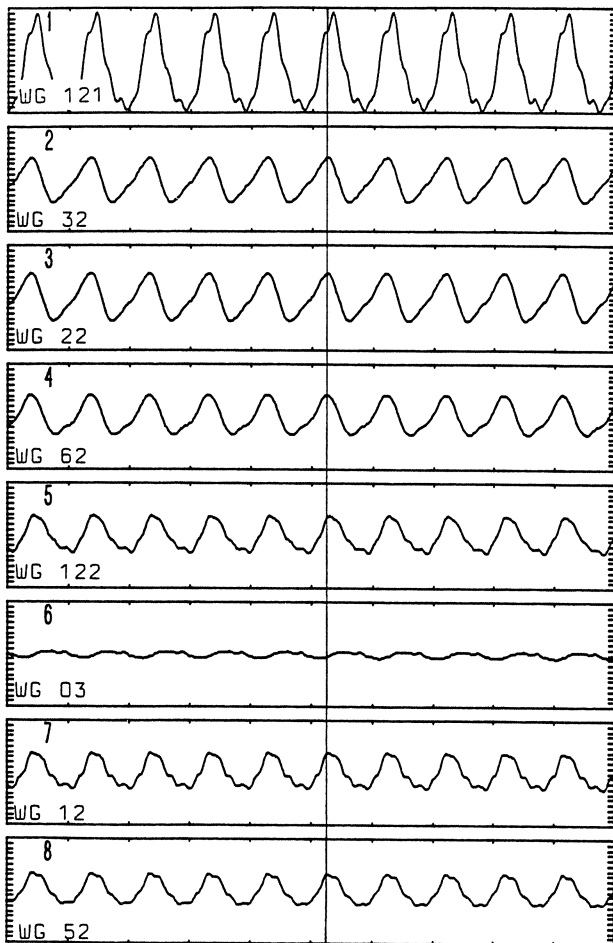
Versuch: E1, S10, $f = 4.05 \text{ Hz}$, Skalierung horizontal: 0.276 s/div



Skalierung horizontal: 0.553 s/div

Versuch: E 1, S1
Frequenz: 3.07 Hz
L 2



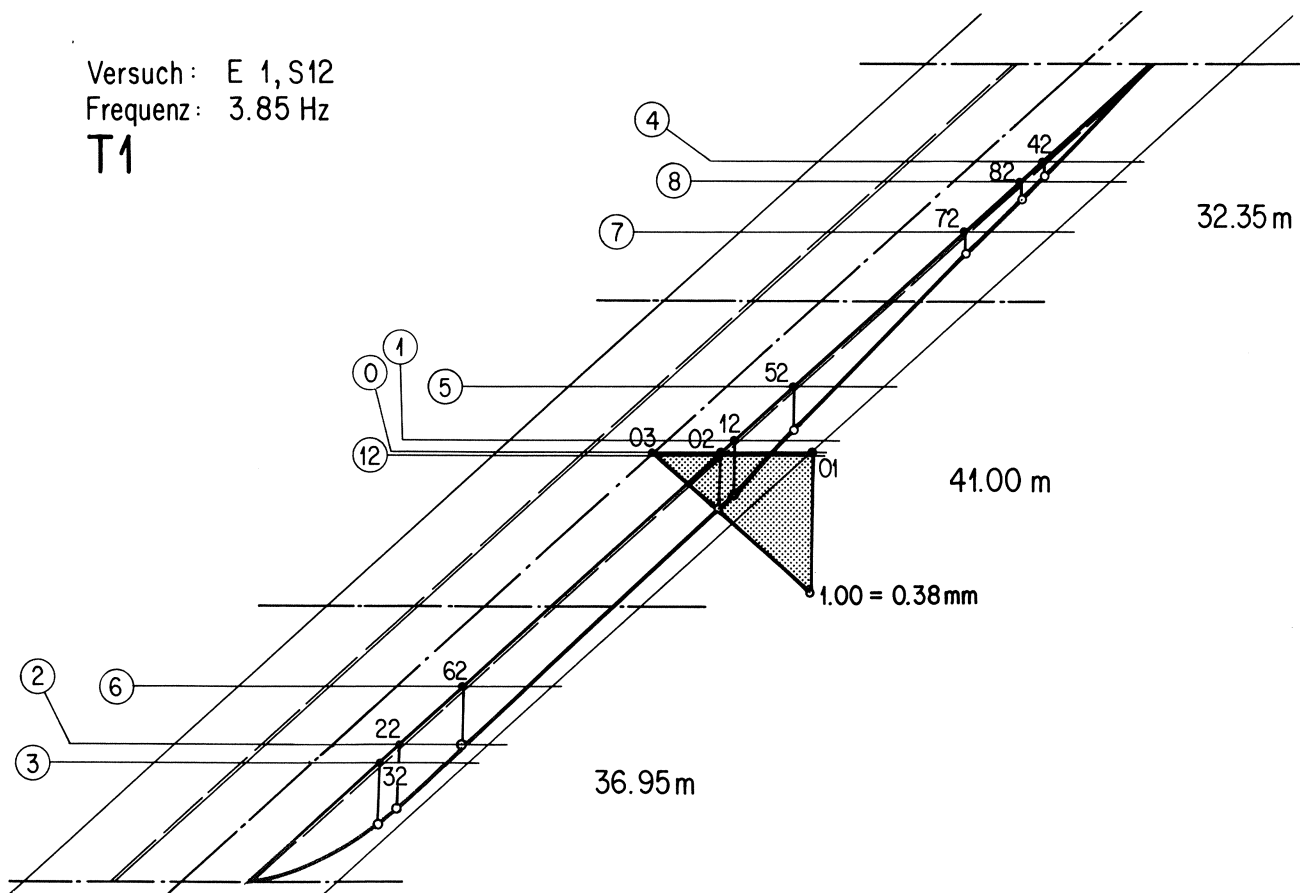


Skalierung horizontal: 0.270 s/div

Versuch: E 1, S12

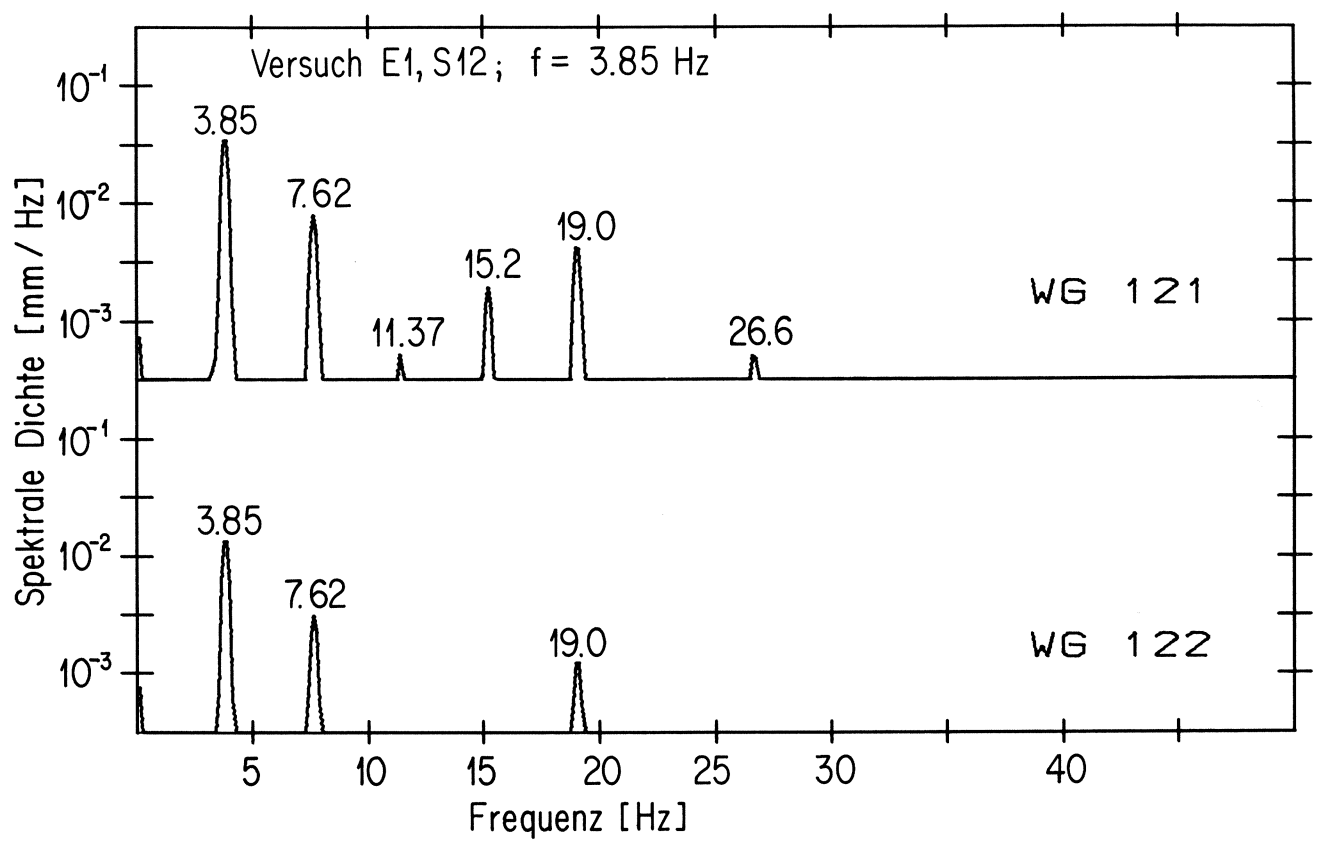
Frequenz: 3.85 Hz

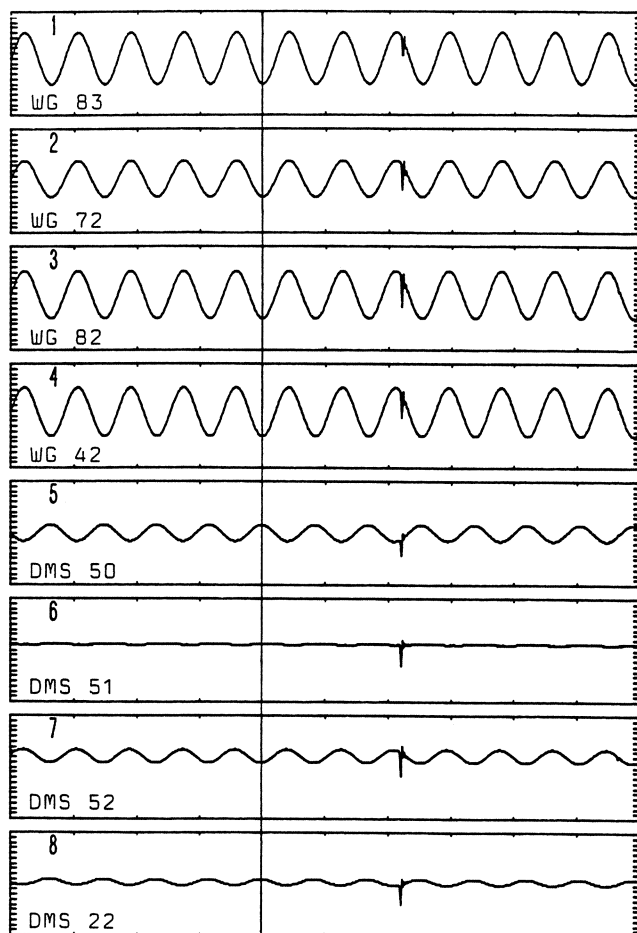
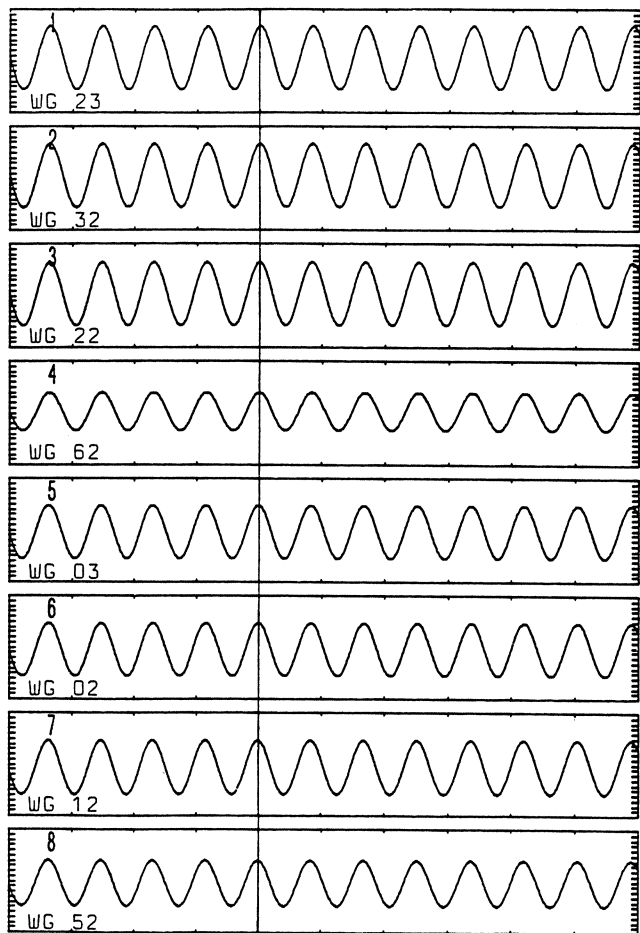
T1



A1.6

A1.7



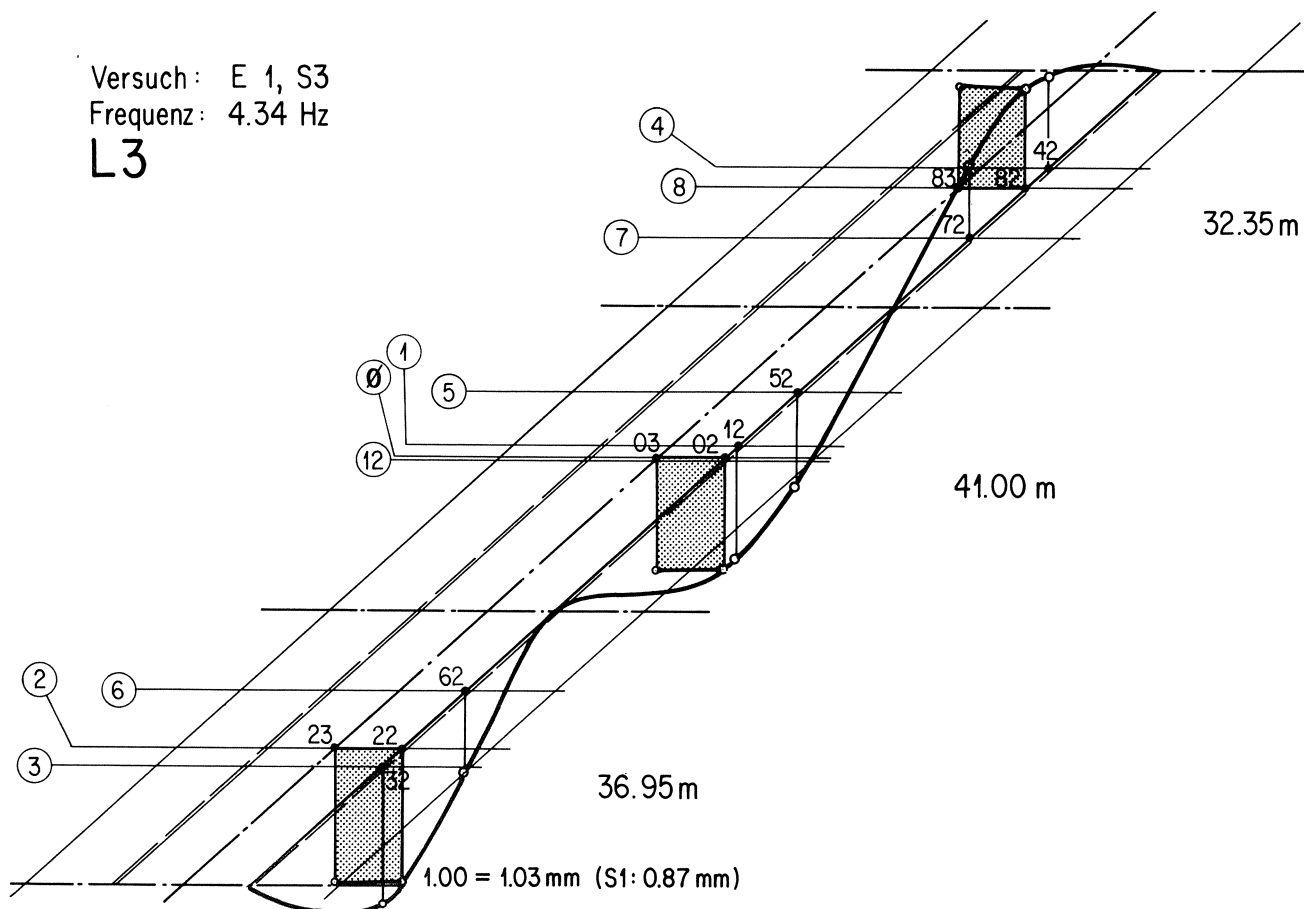


Skalierung horizontal: 0.276 s/div

Versuch: E 1, S3

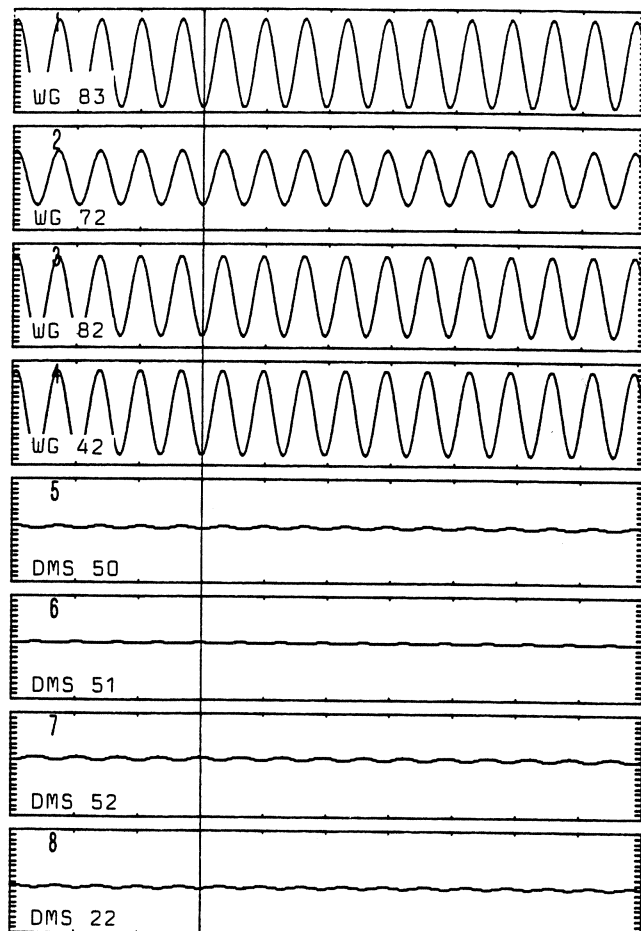
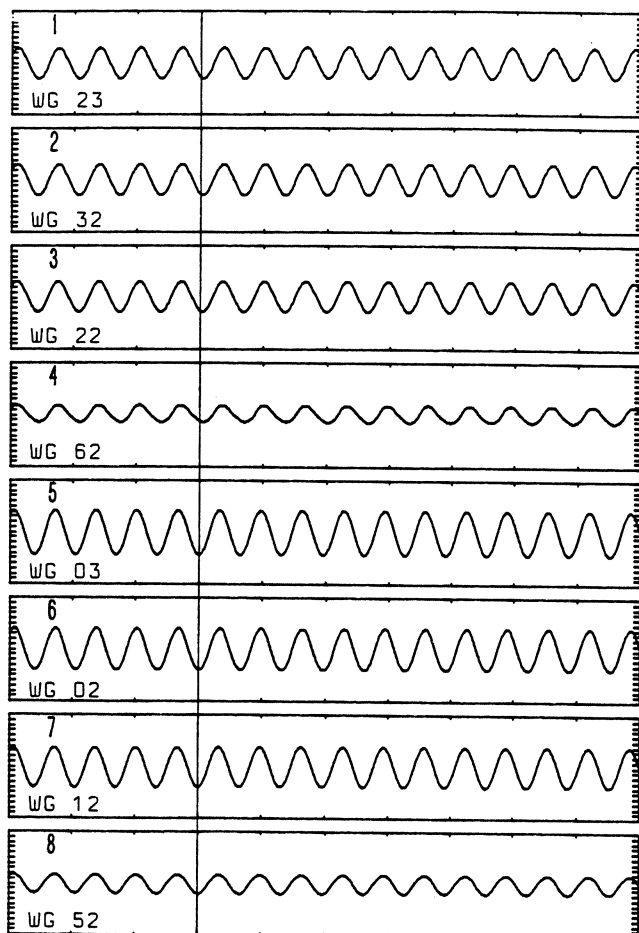
Frequenz: 4.34 Hz

L3



A1. 9

A1.10

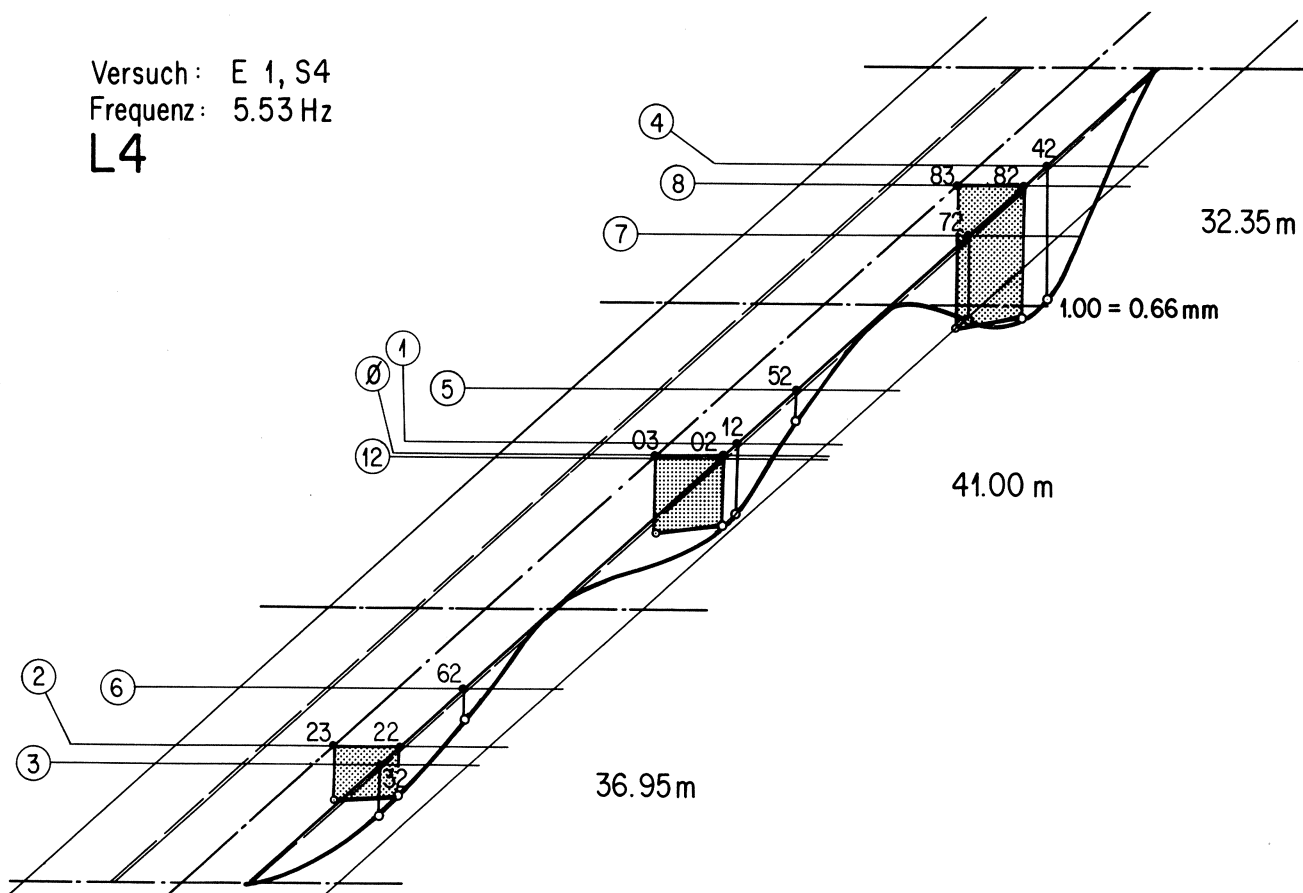


Skalierung horizontal: 0.276 s/div

Versuch: E 1, S4

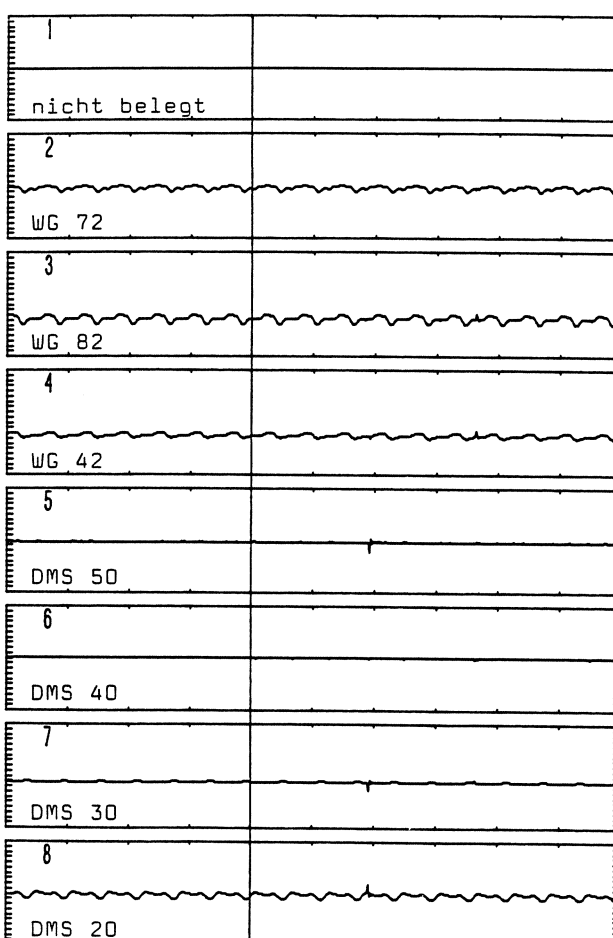
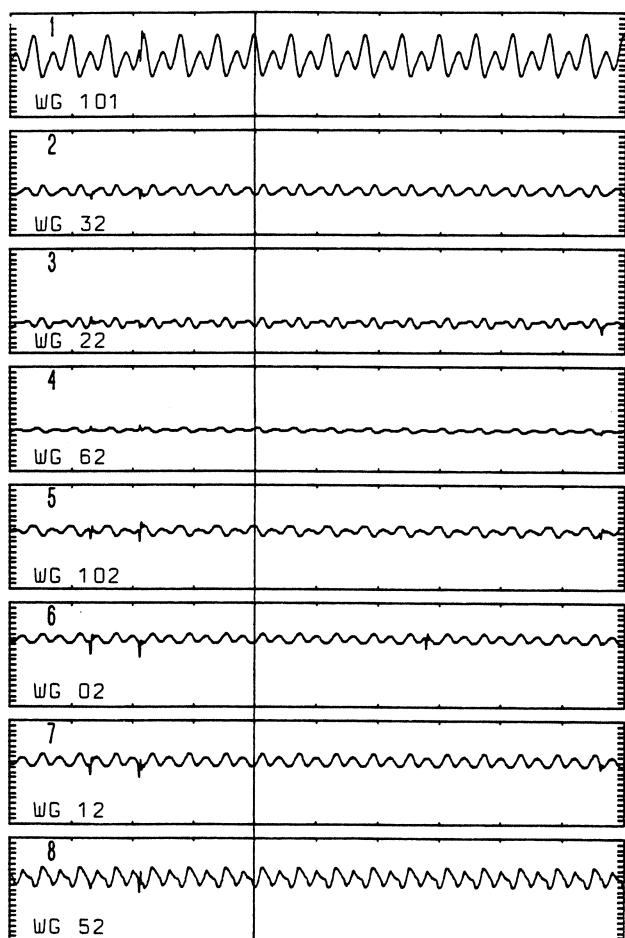
Frequenz: 5.53 Hz

L4

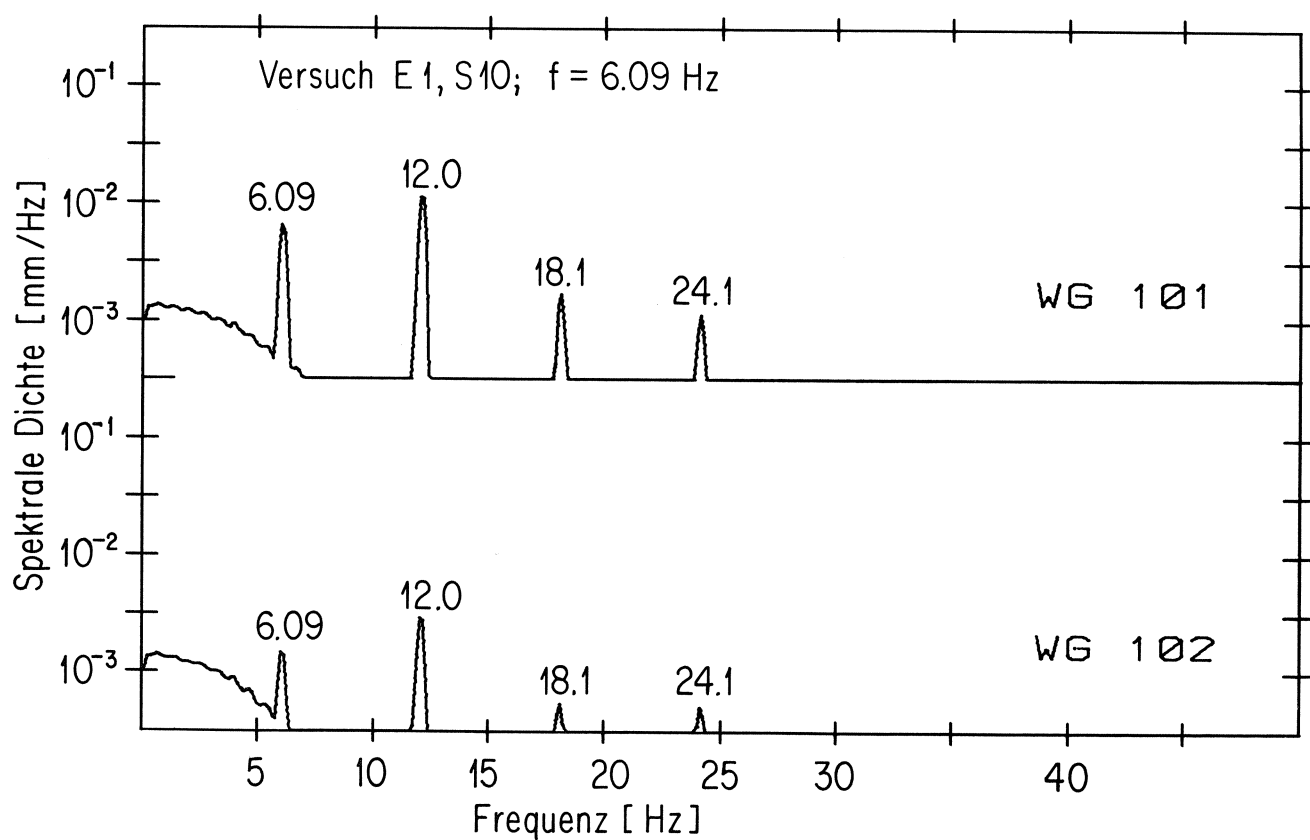


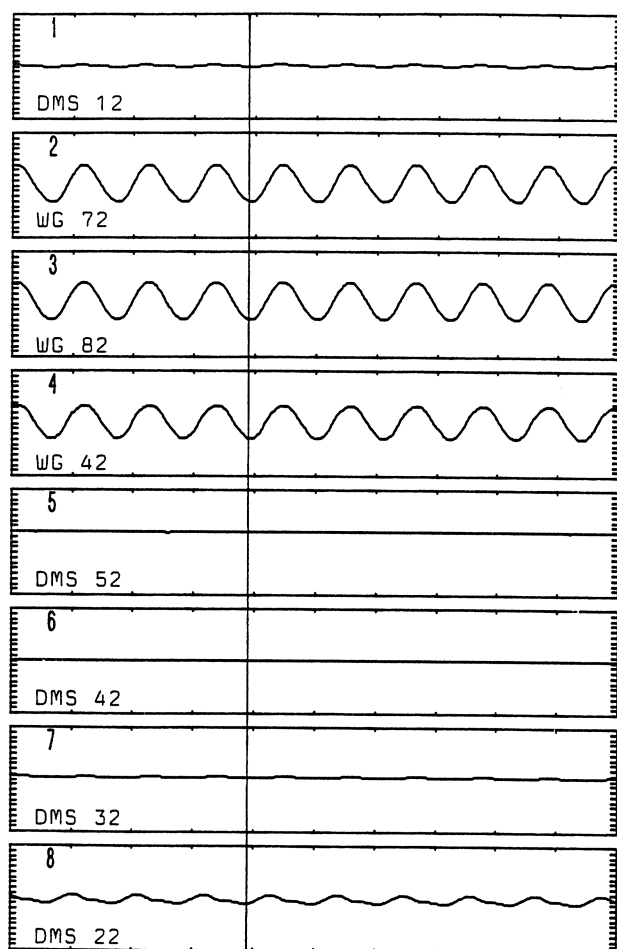
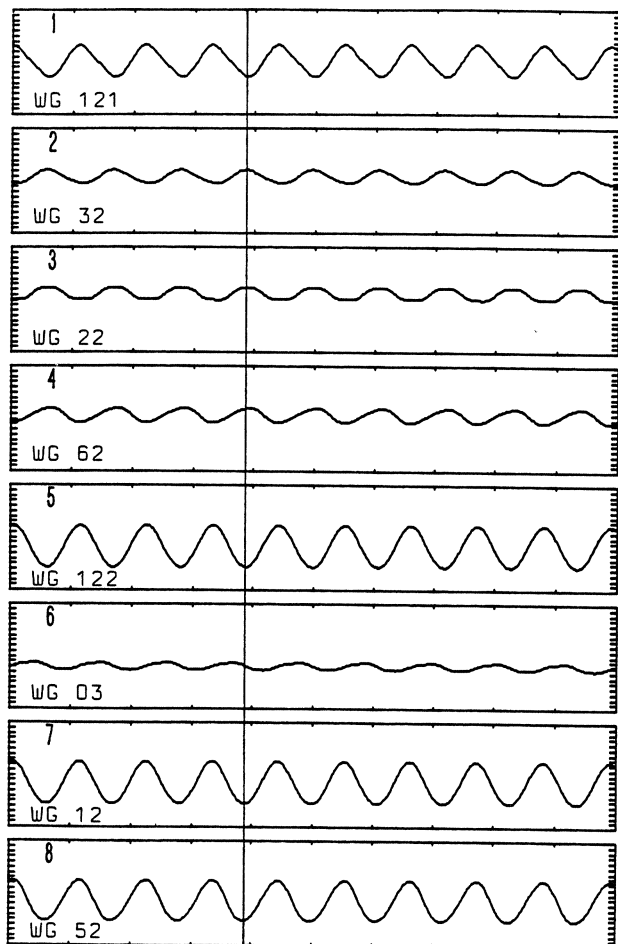
A1.11

A1.12



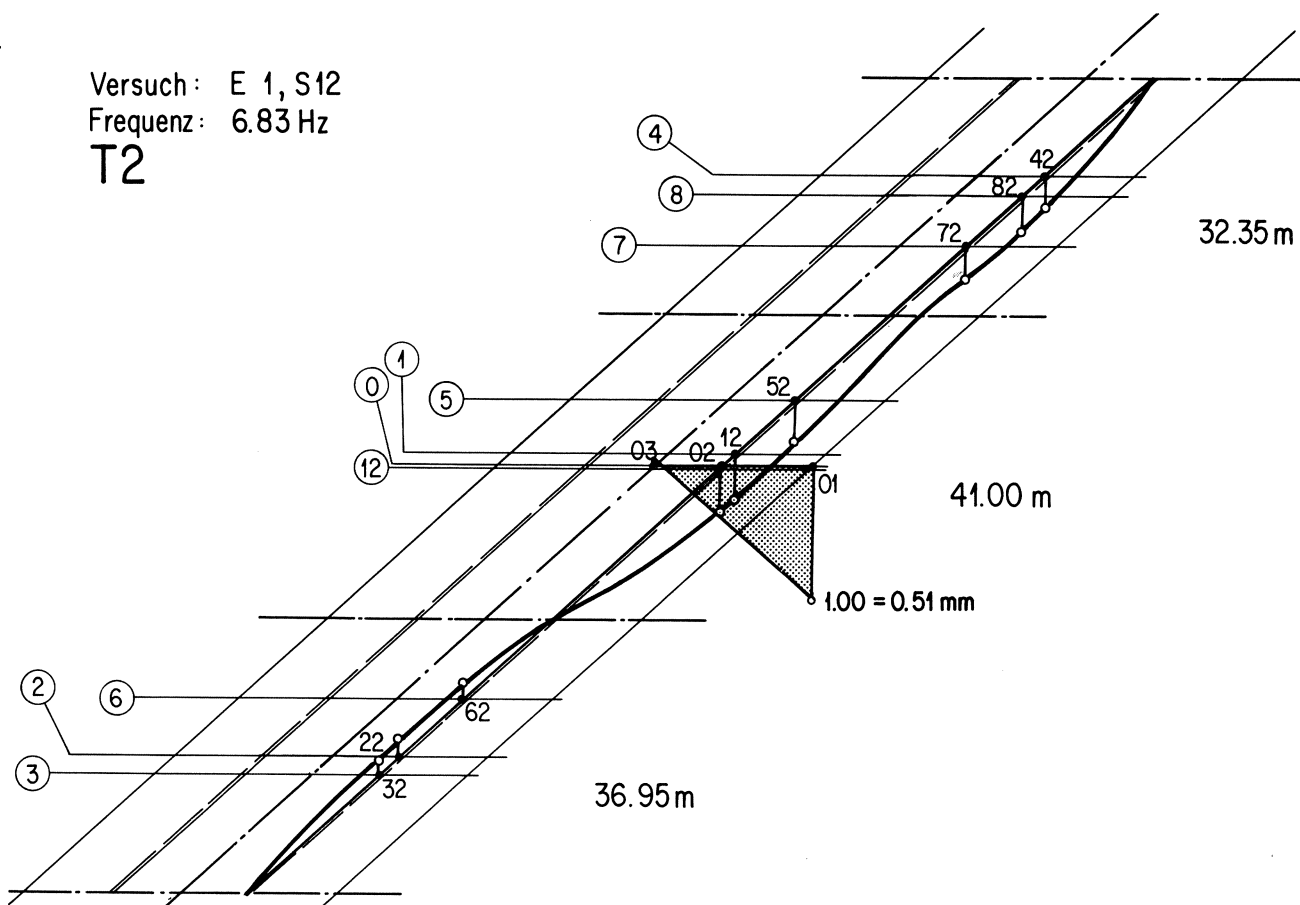
Skalierung horizontal: 0.276 s/div

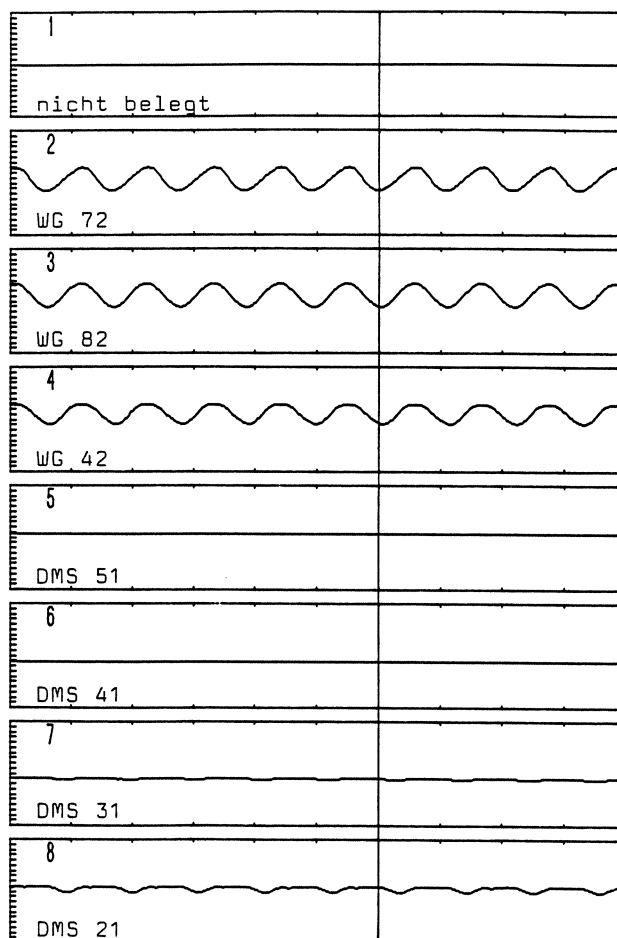
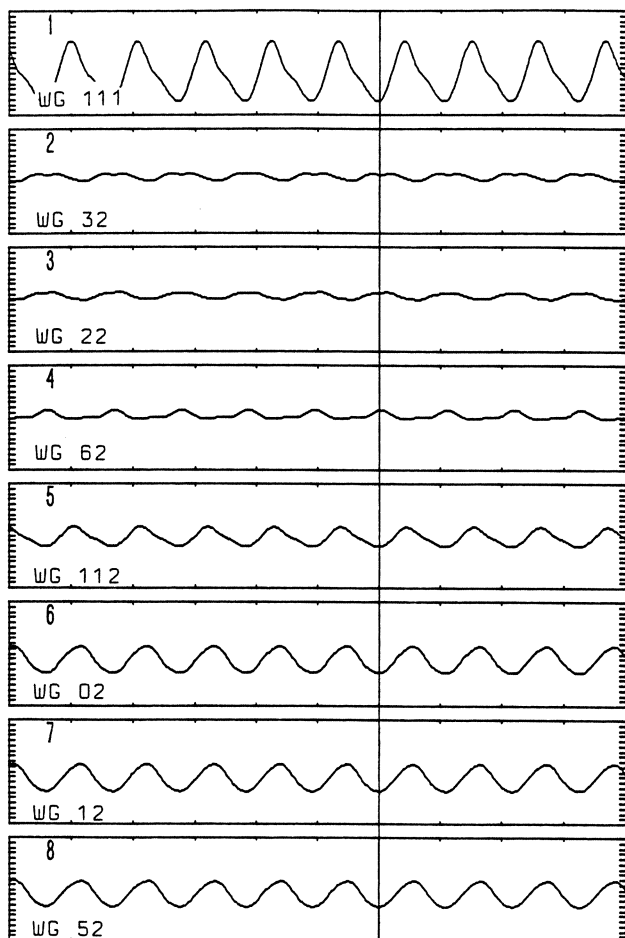




Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S12
Frequenz: 6.83 Hz
T2



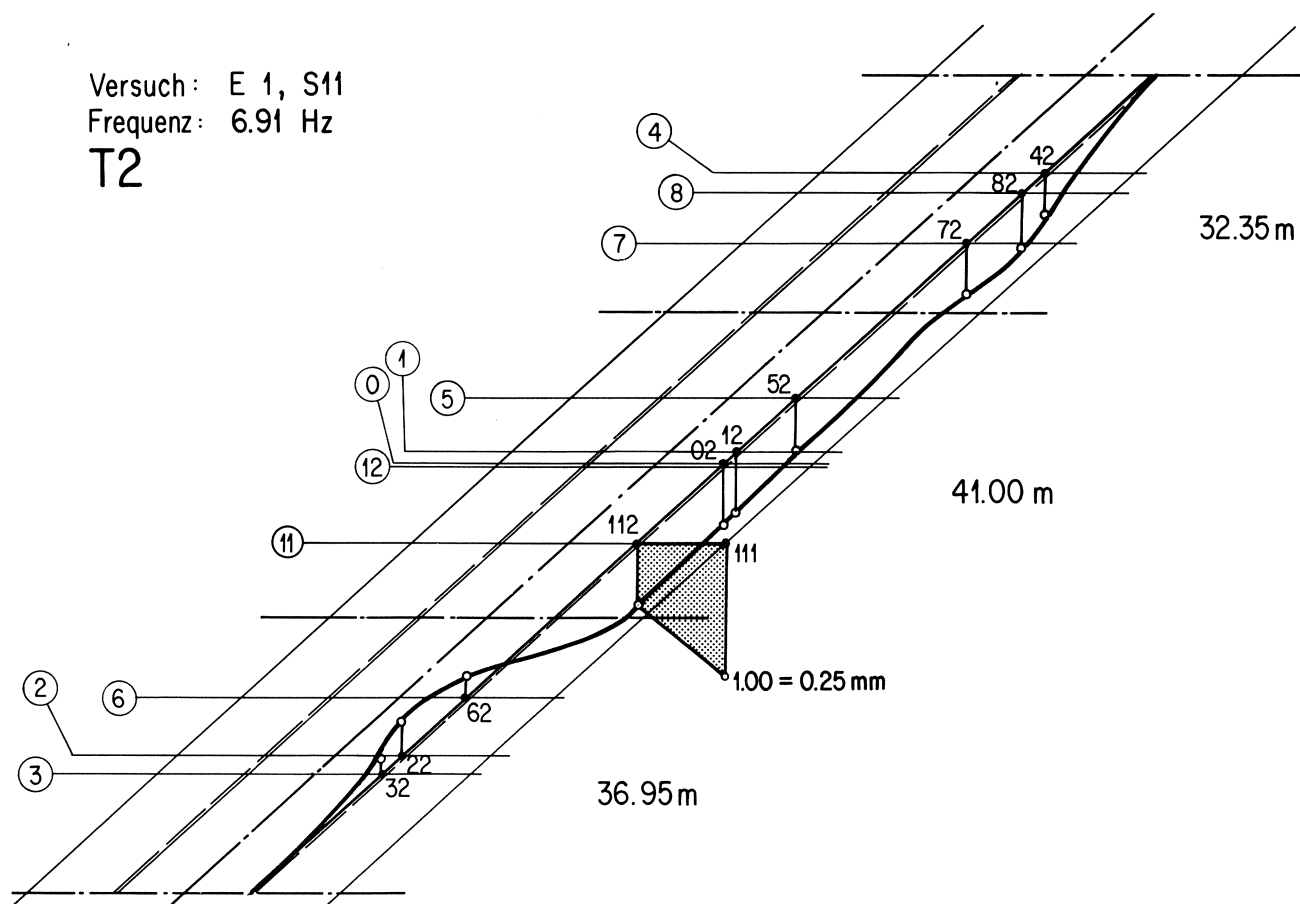


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S11

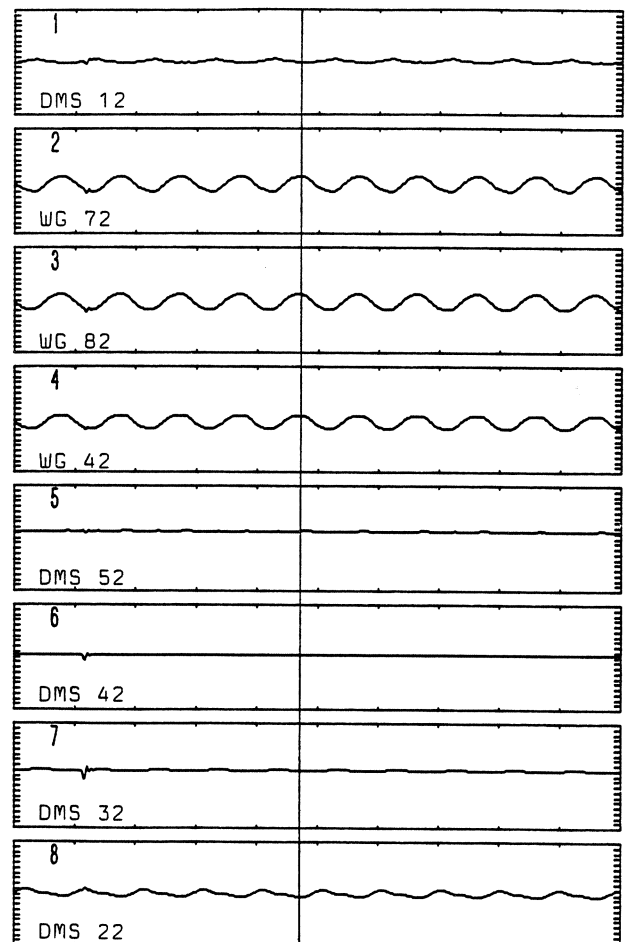
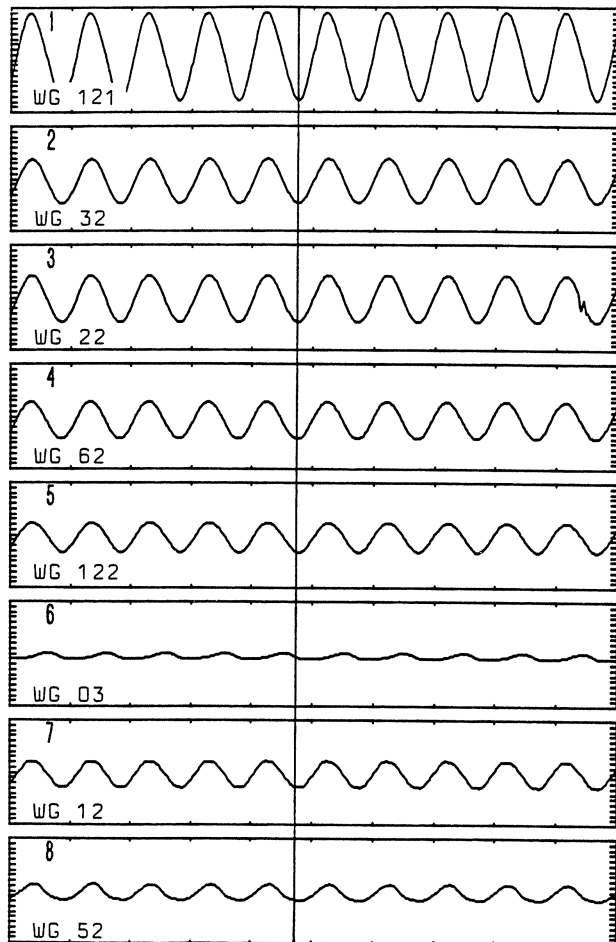
Frequenz: 6.91 Hz

T2



A1.17

A1.18

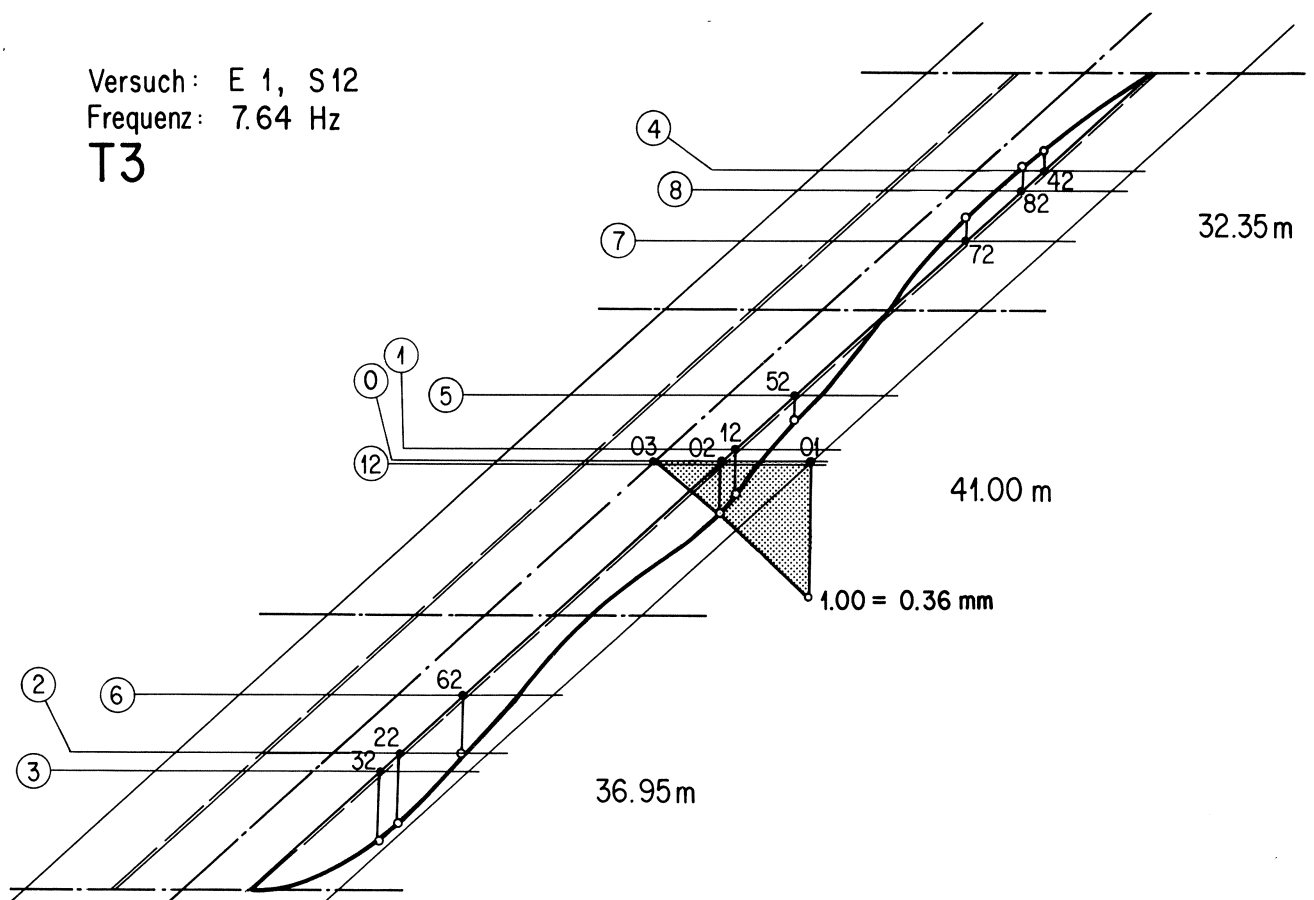


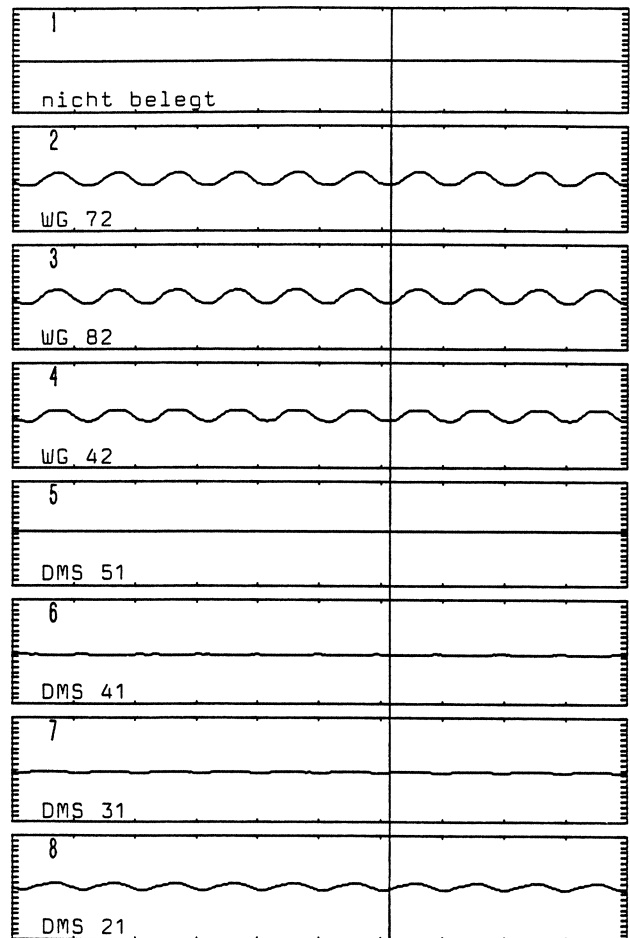
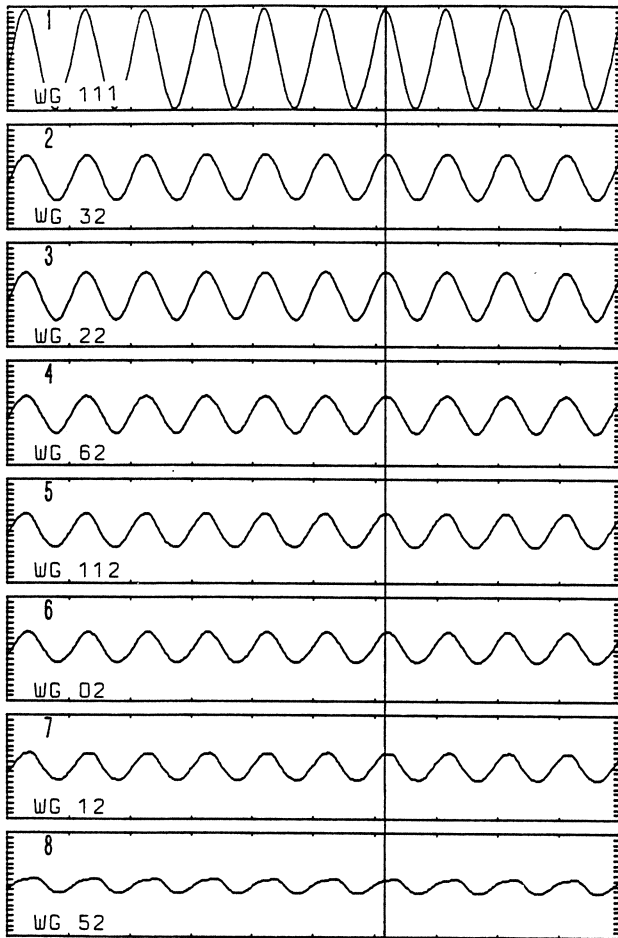
Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S12

Frequenz: 7.64 Hz

T3



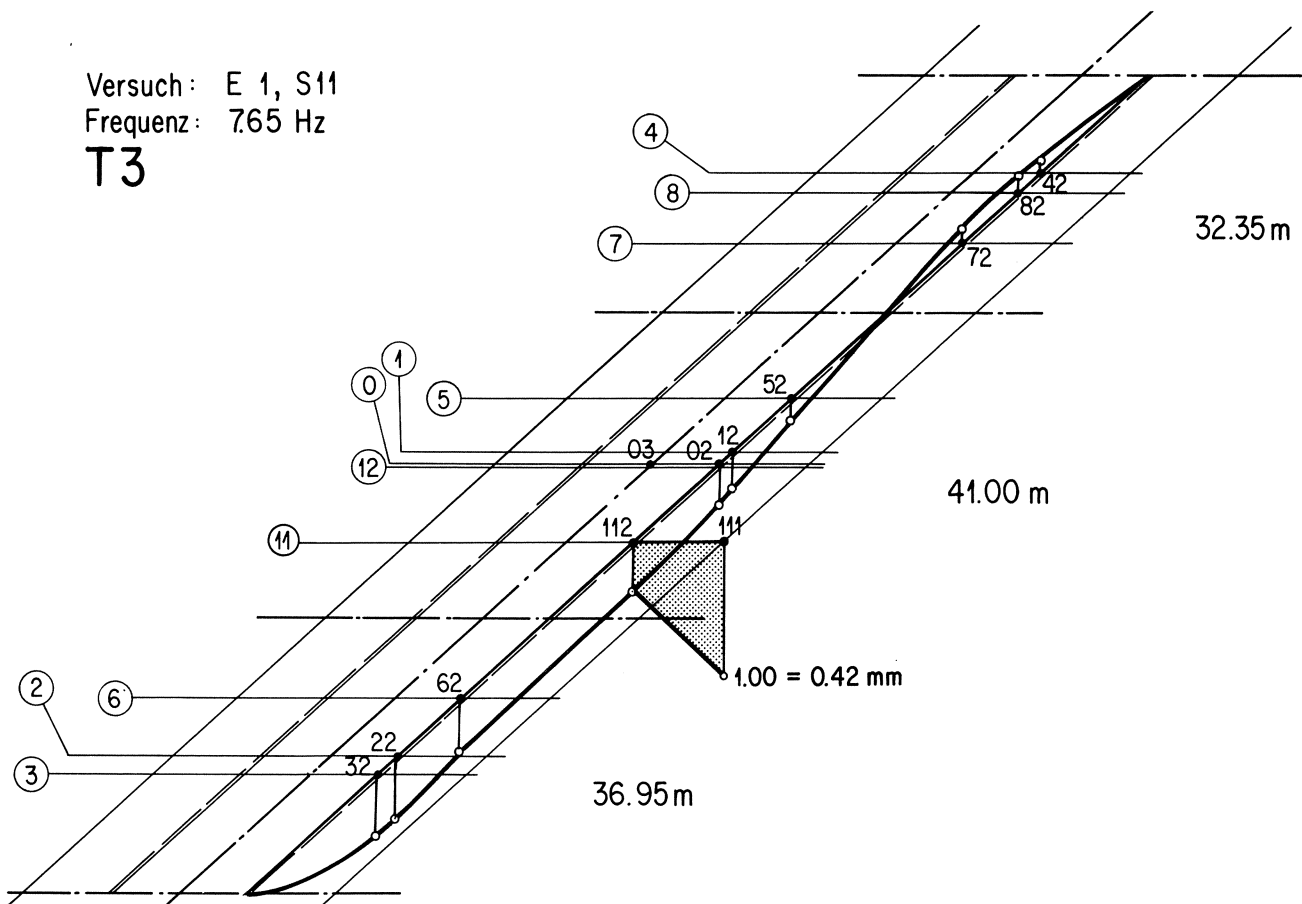


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S11

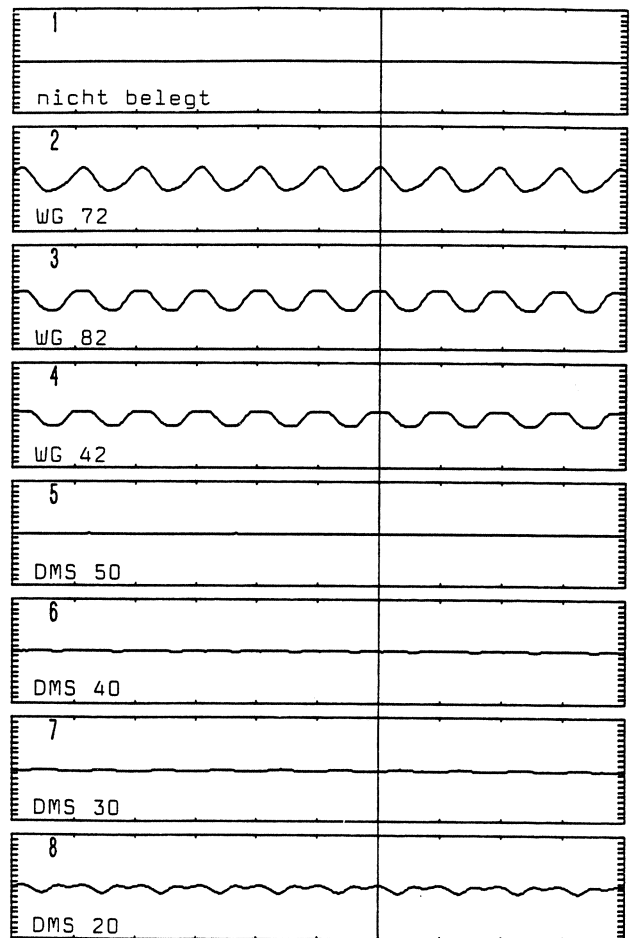
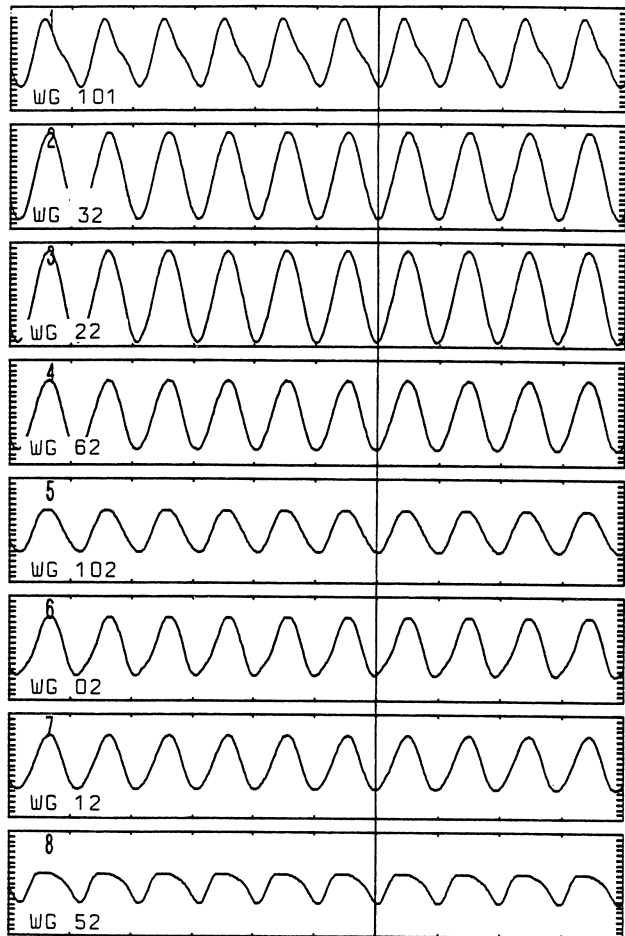
Frequenz: 765 Hz

T3



A1.21

A1.22

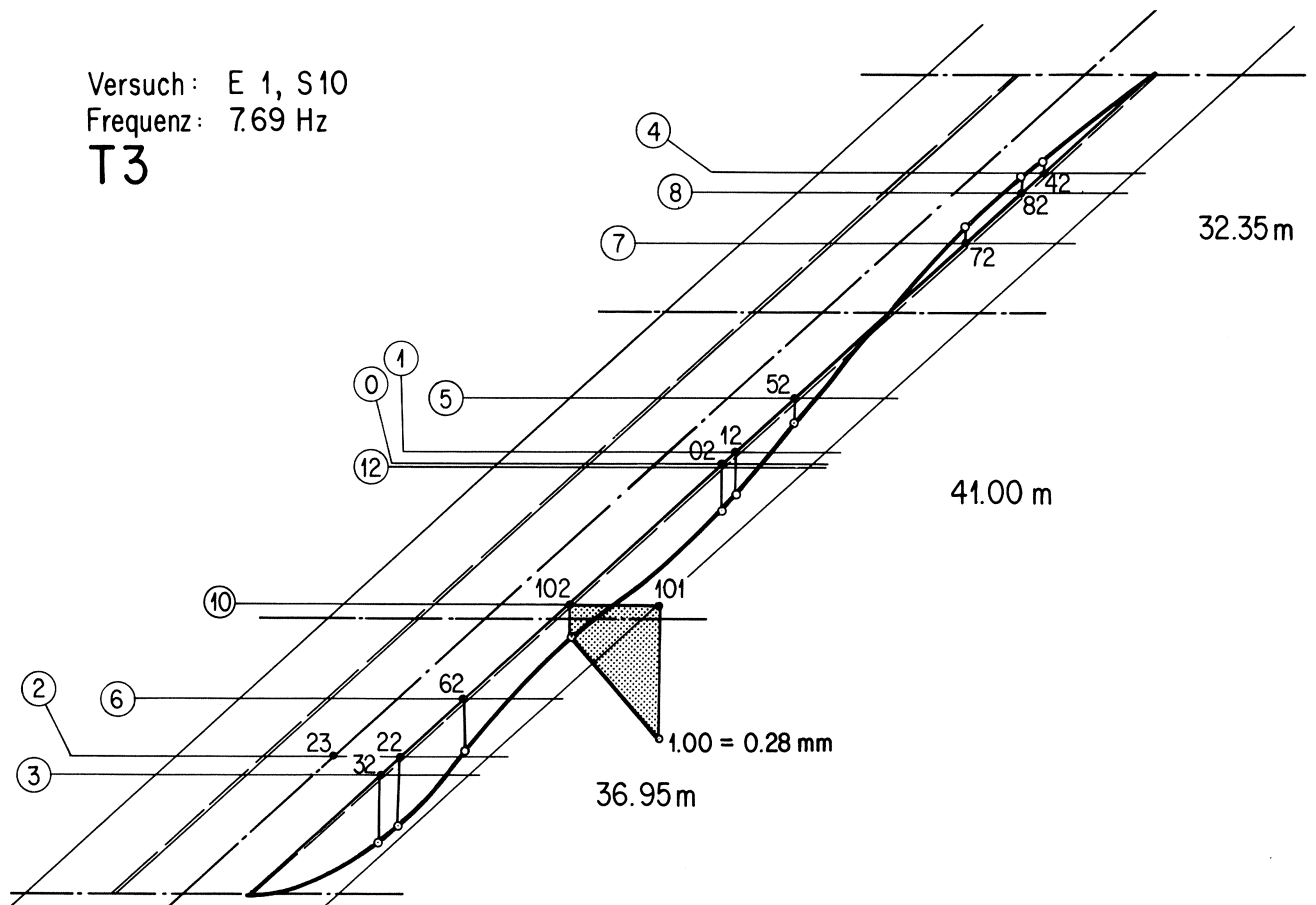


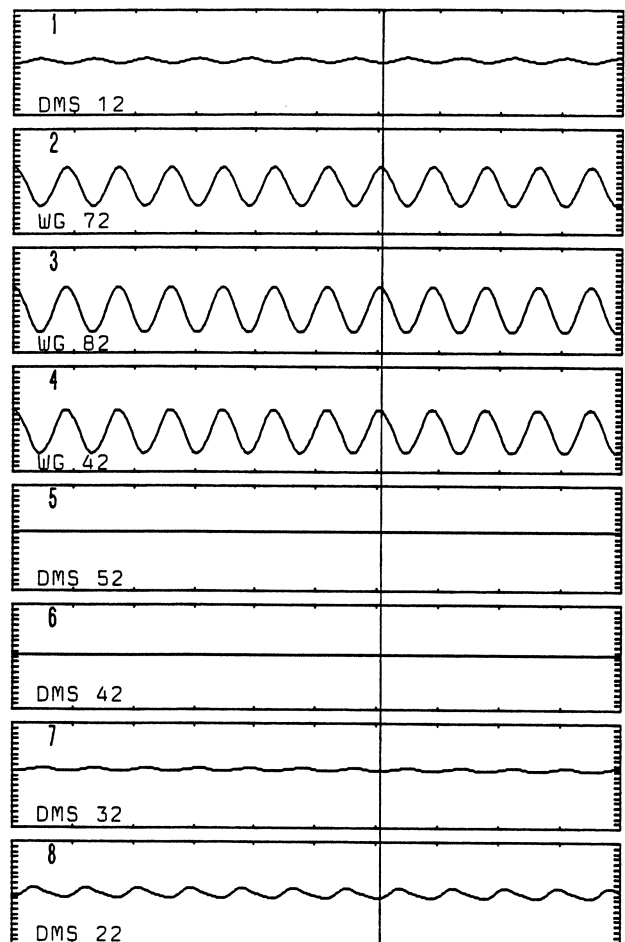
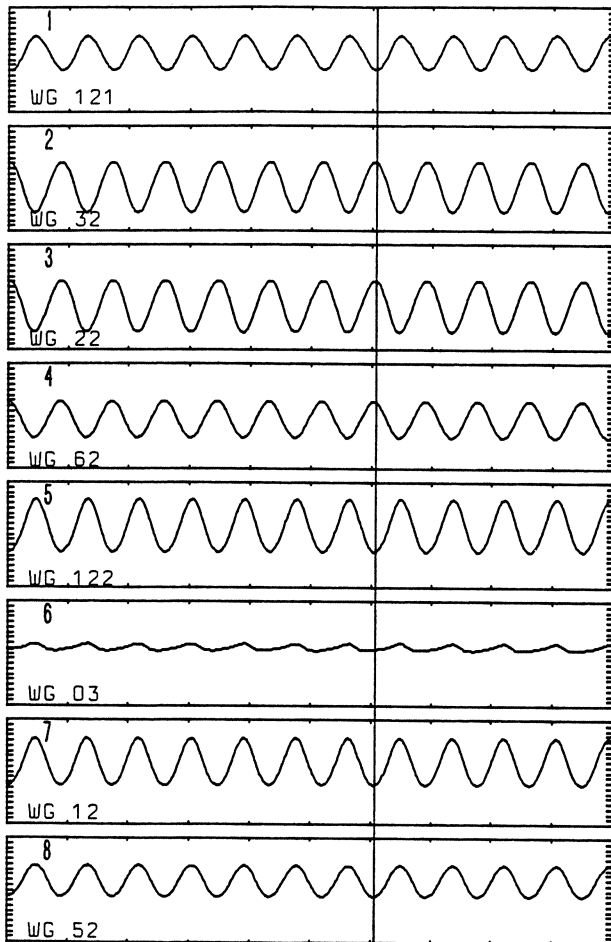
Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S10

Frequenz: 7.69 Hz

T3



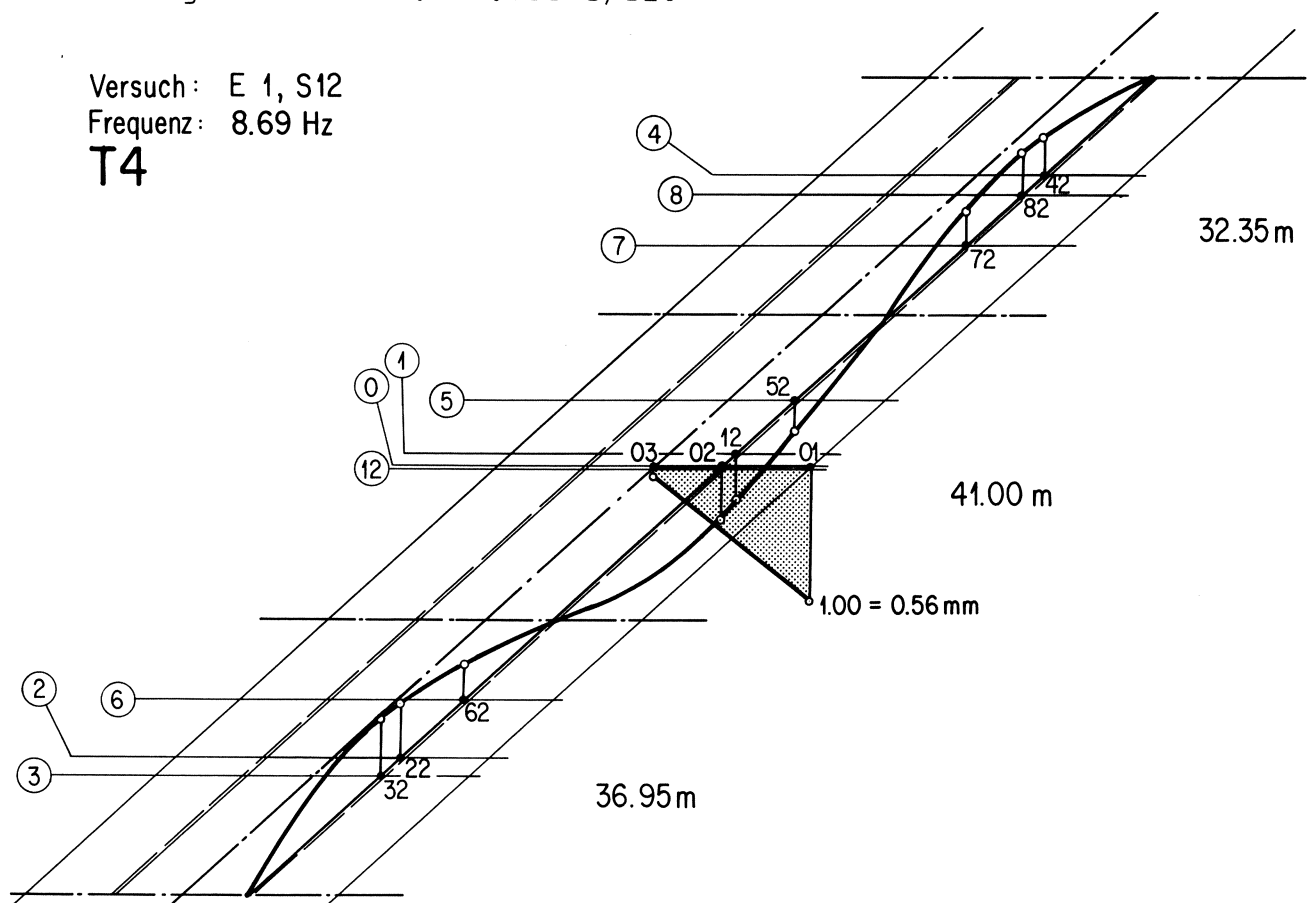


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S12

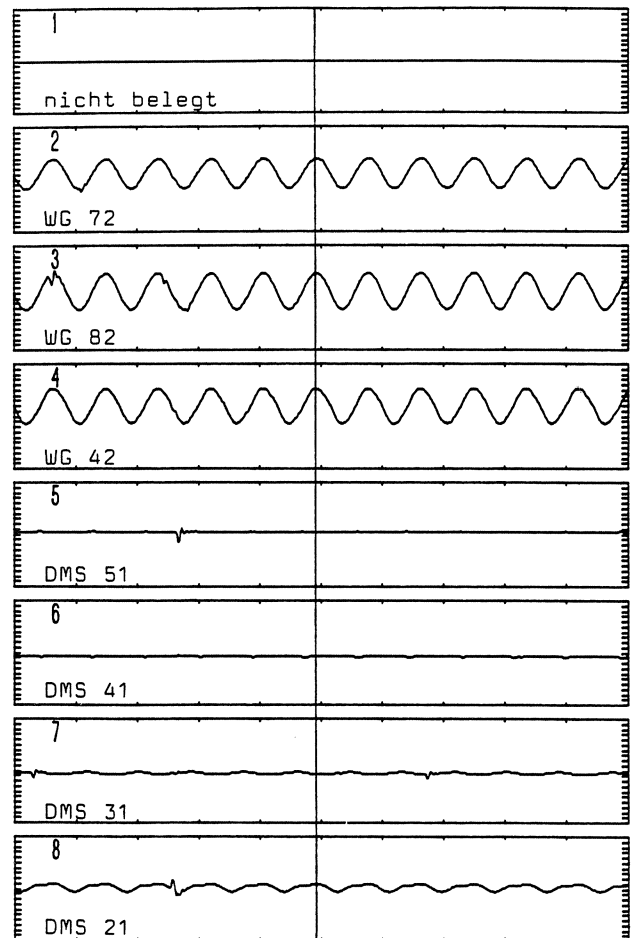
Frequenz: 8.69 Hz

T4

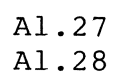


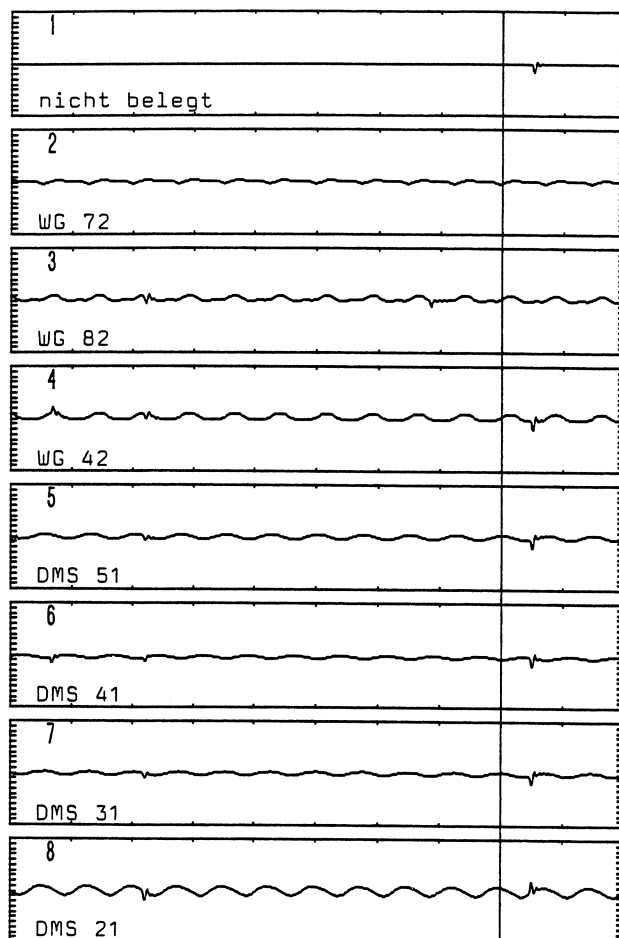
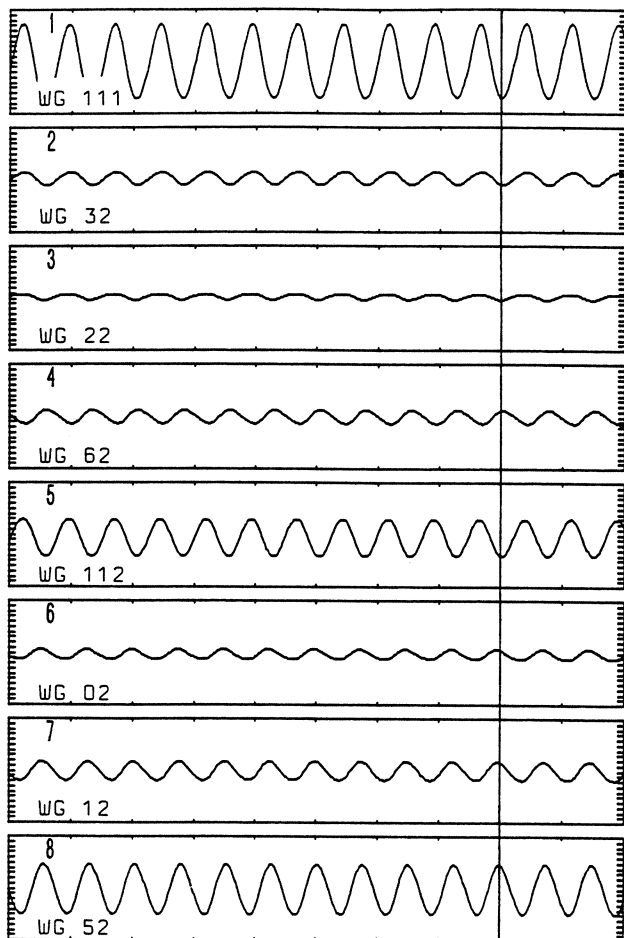
A1.25

A1.26



Versuch: E 1, S11
Frequenz: 8.73 Hz
T4



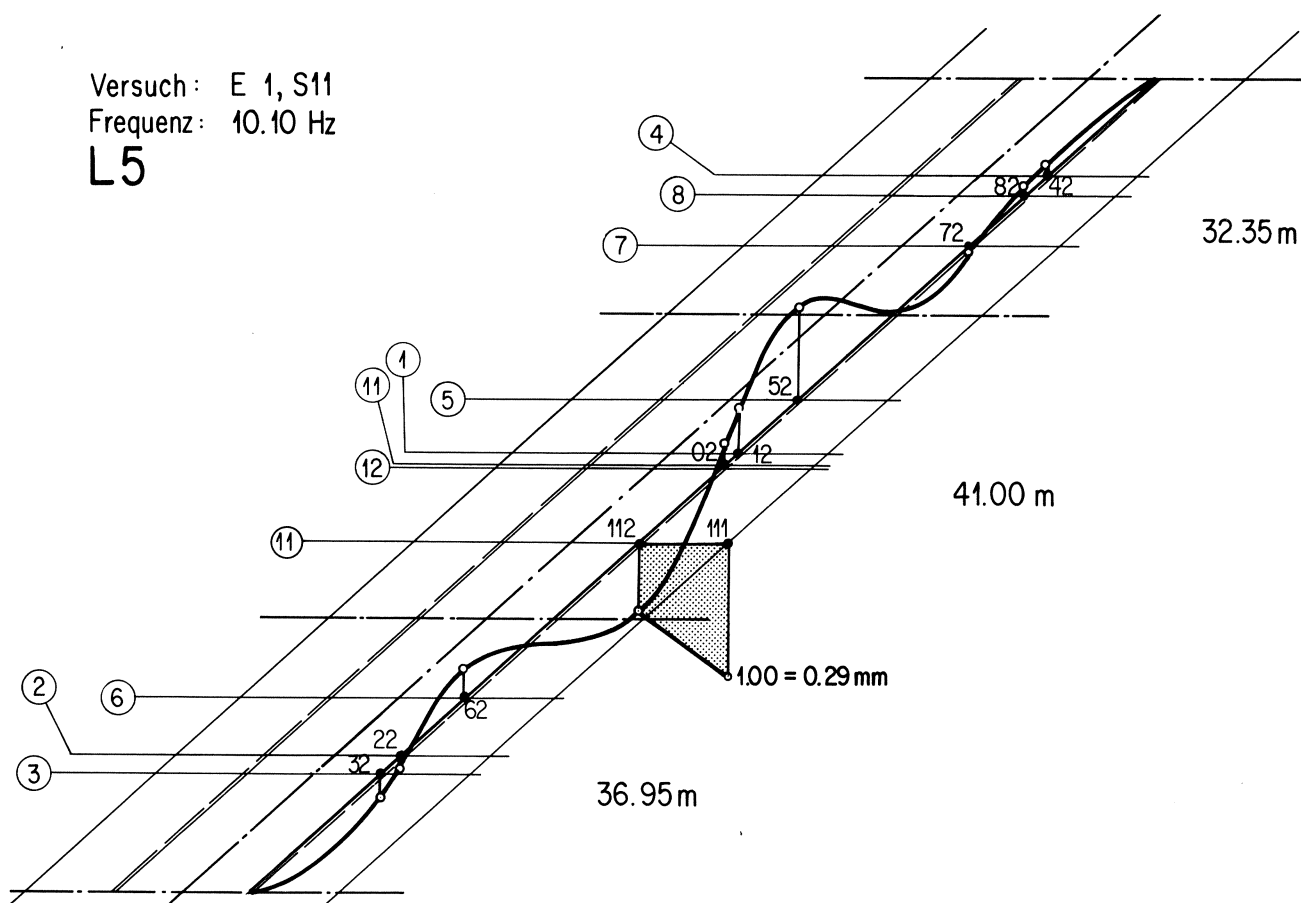


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S11

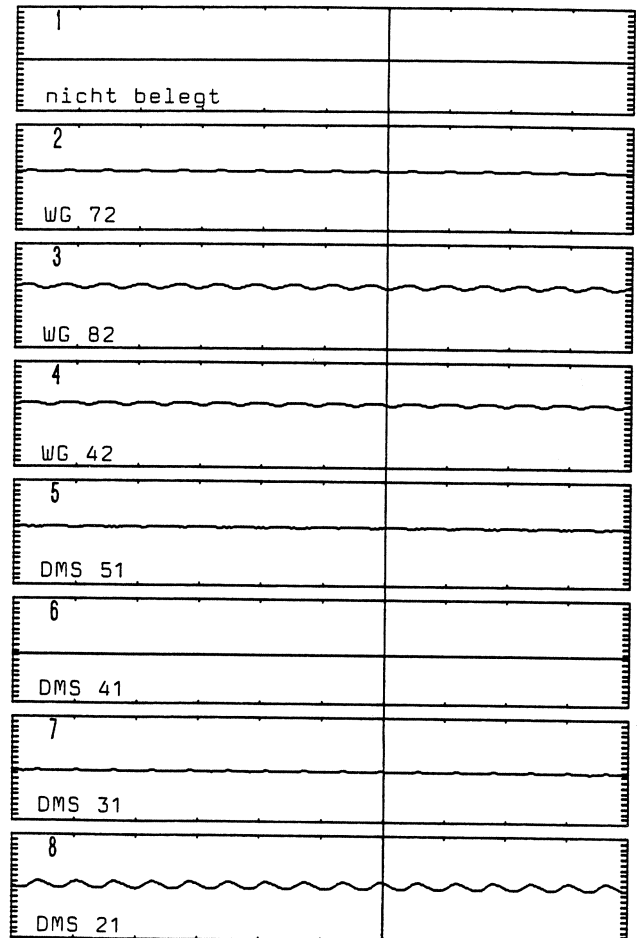
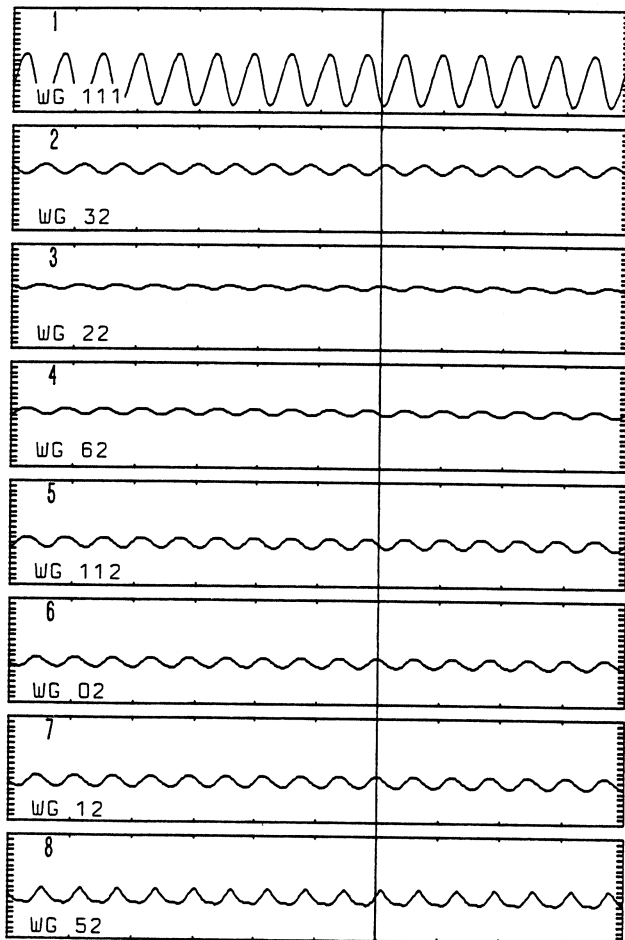
Frequenz: 10.10 Hz

L5



A1.29

A1.30

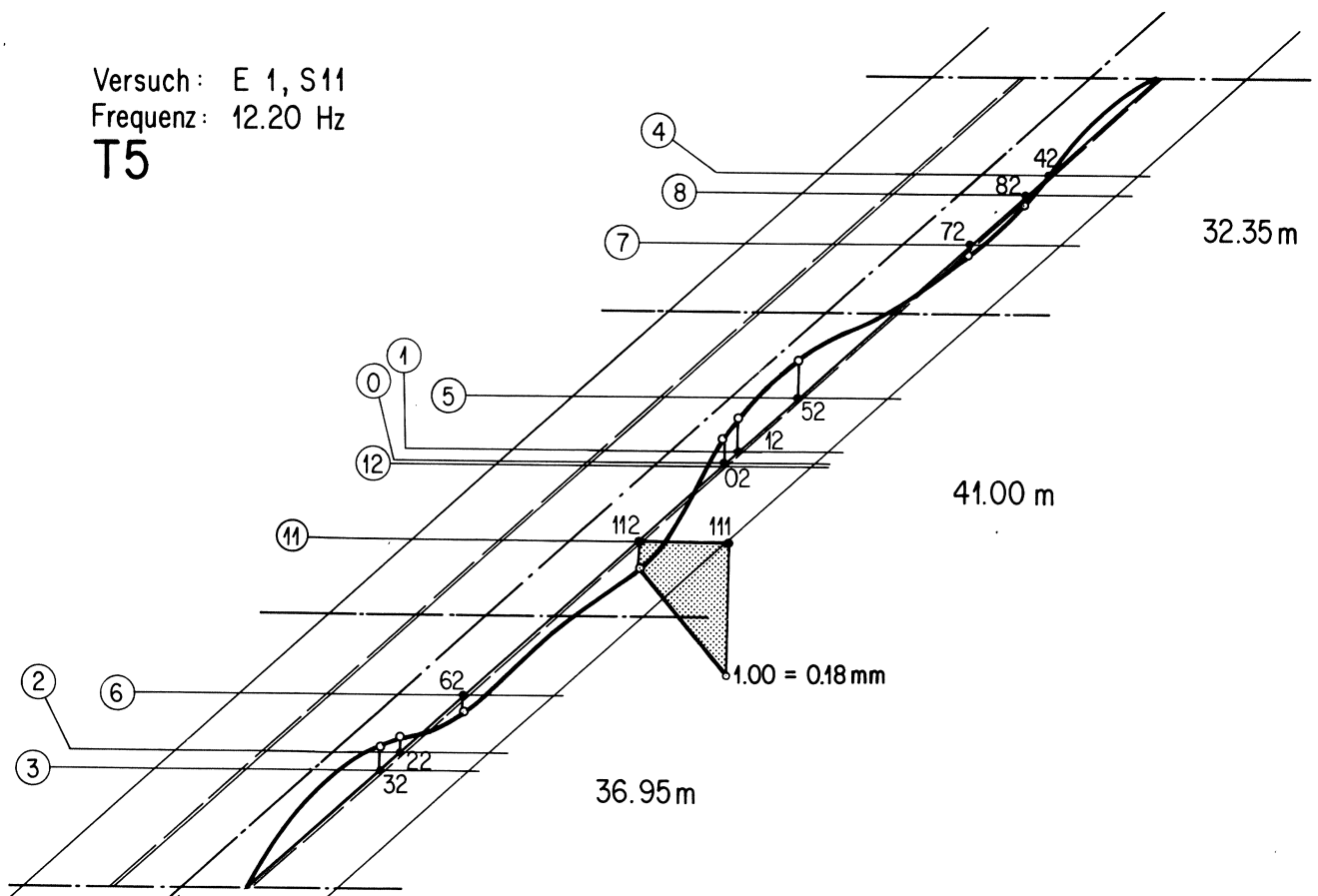


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S11

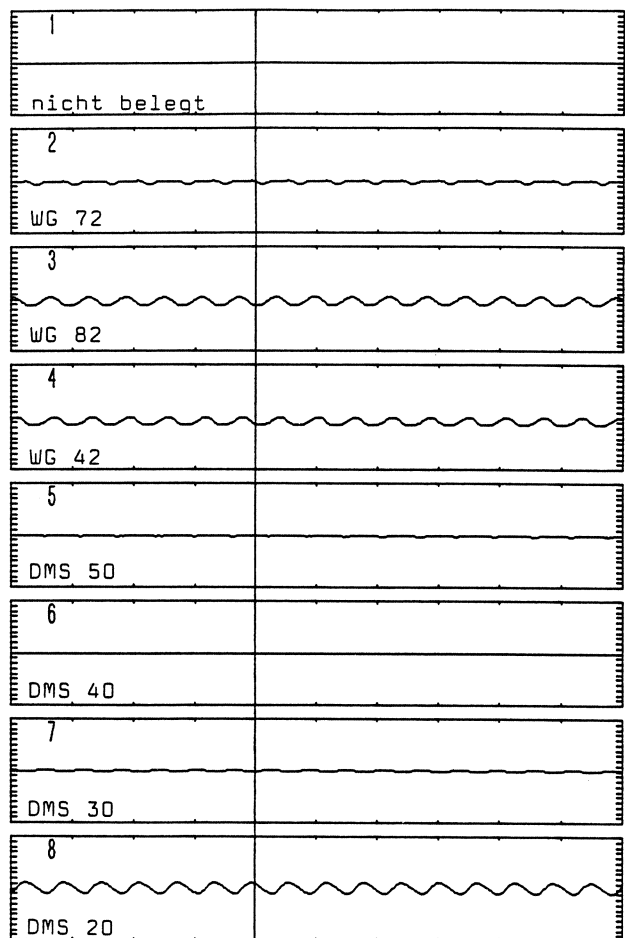
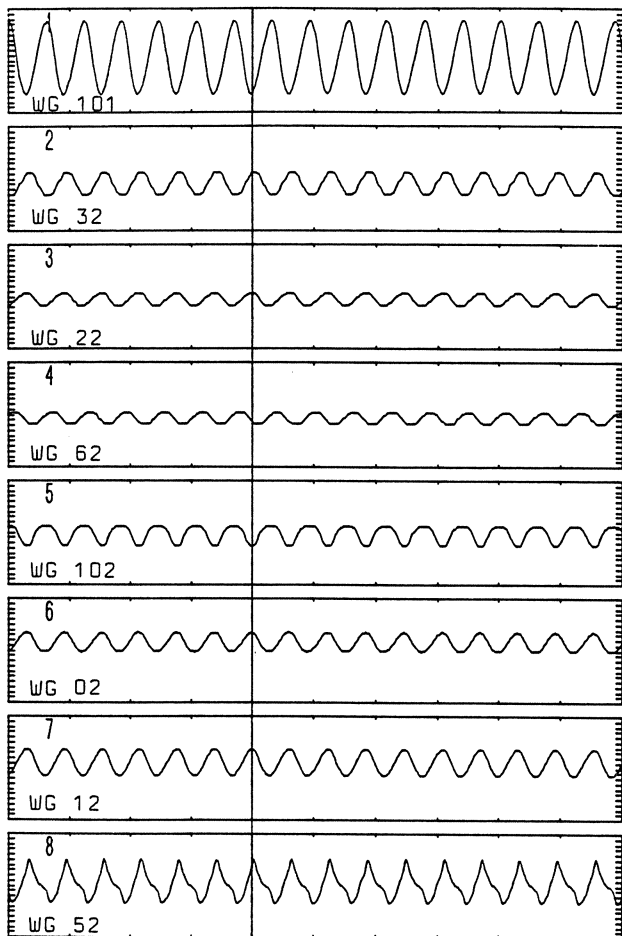
Frequenz: 12.20 Hz

T5



A1 31

A1 32

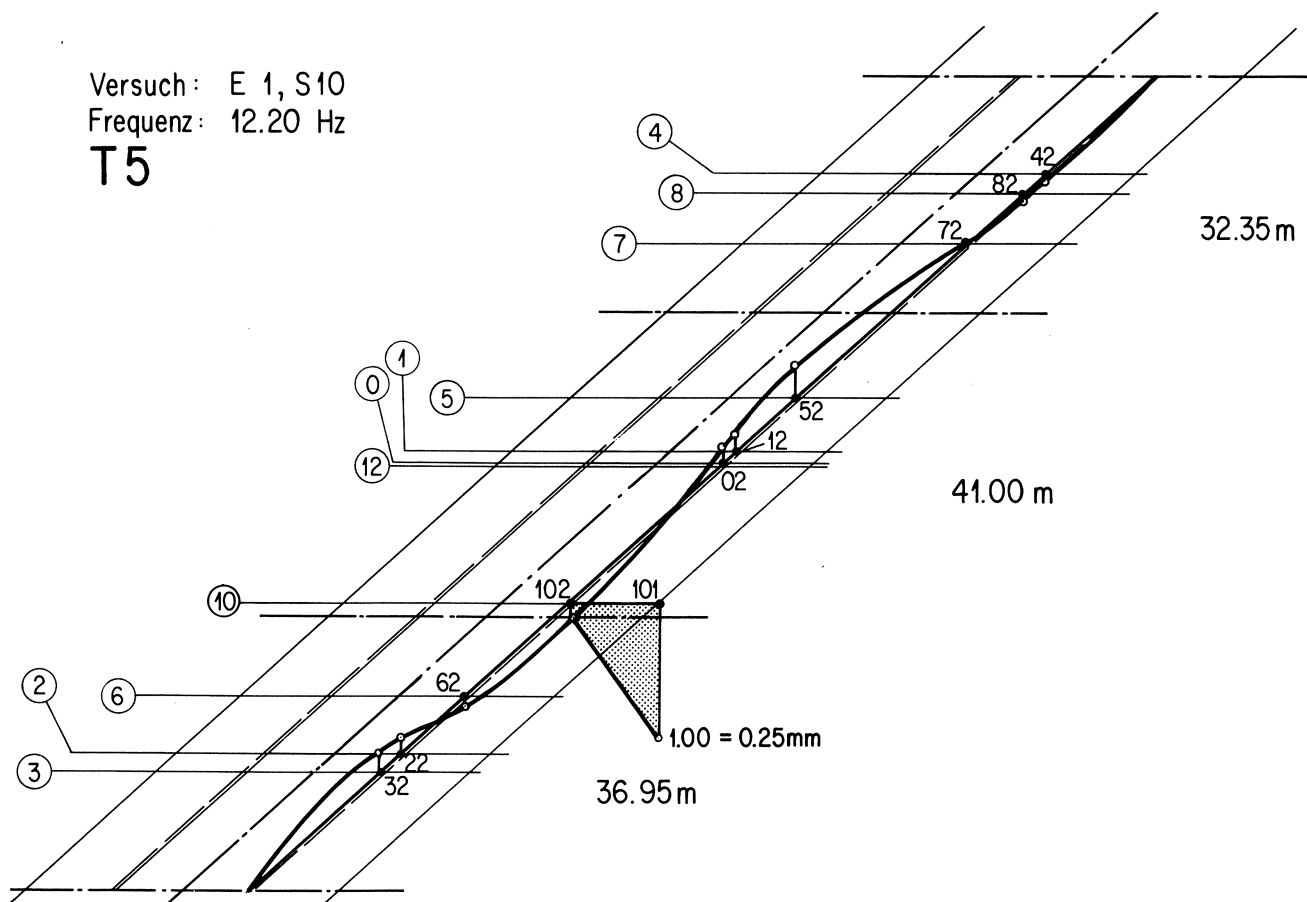


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S10

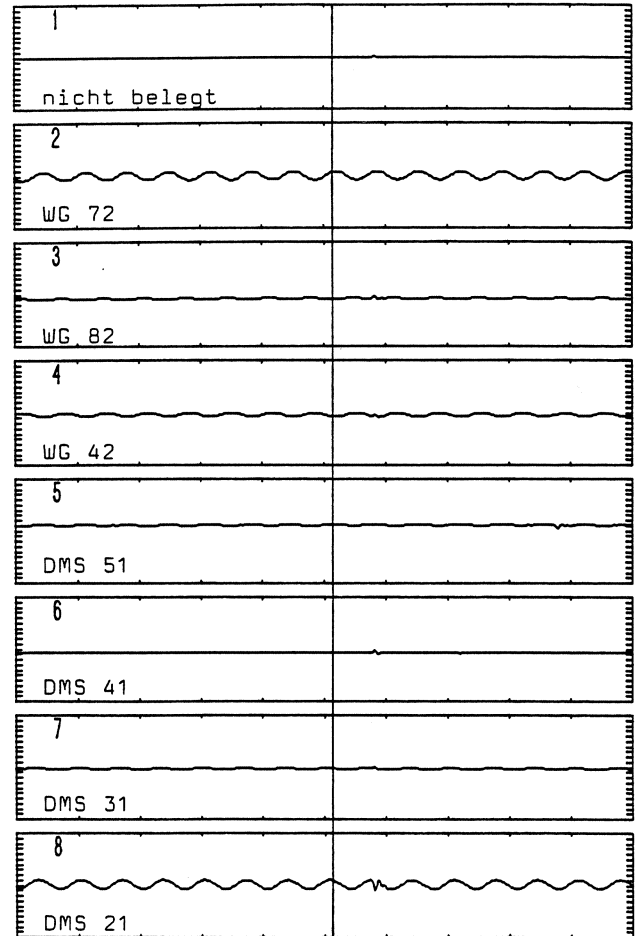
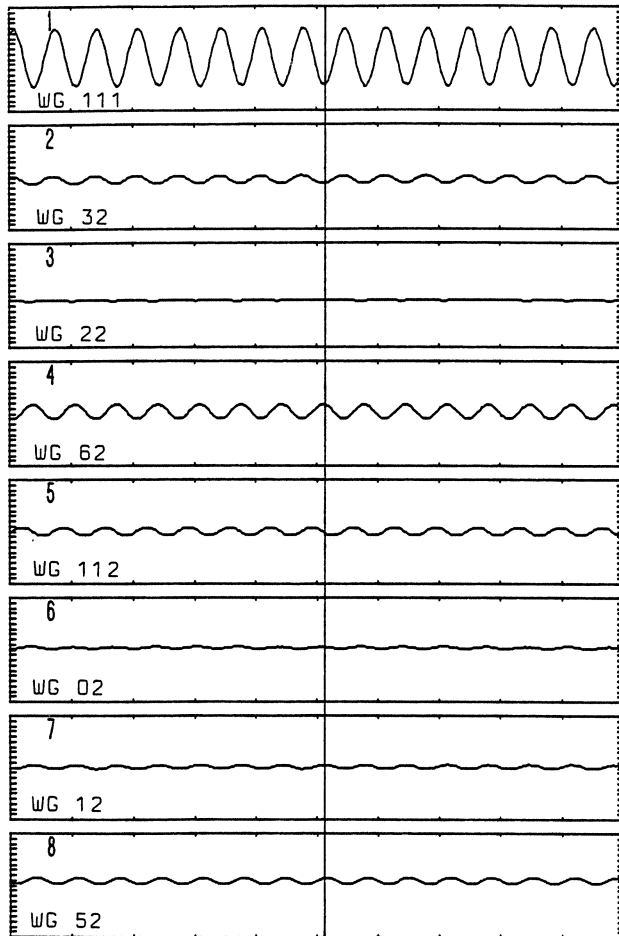
Frequenz: 12.20 Hz

T5



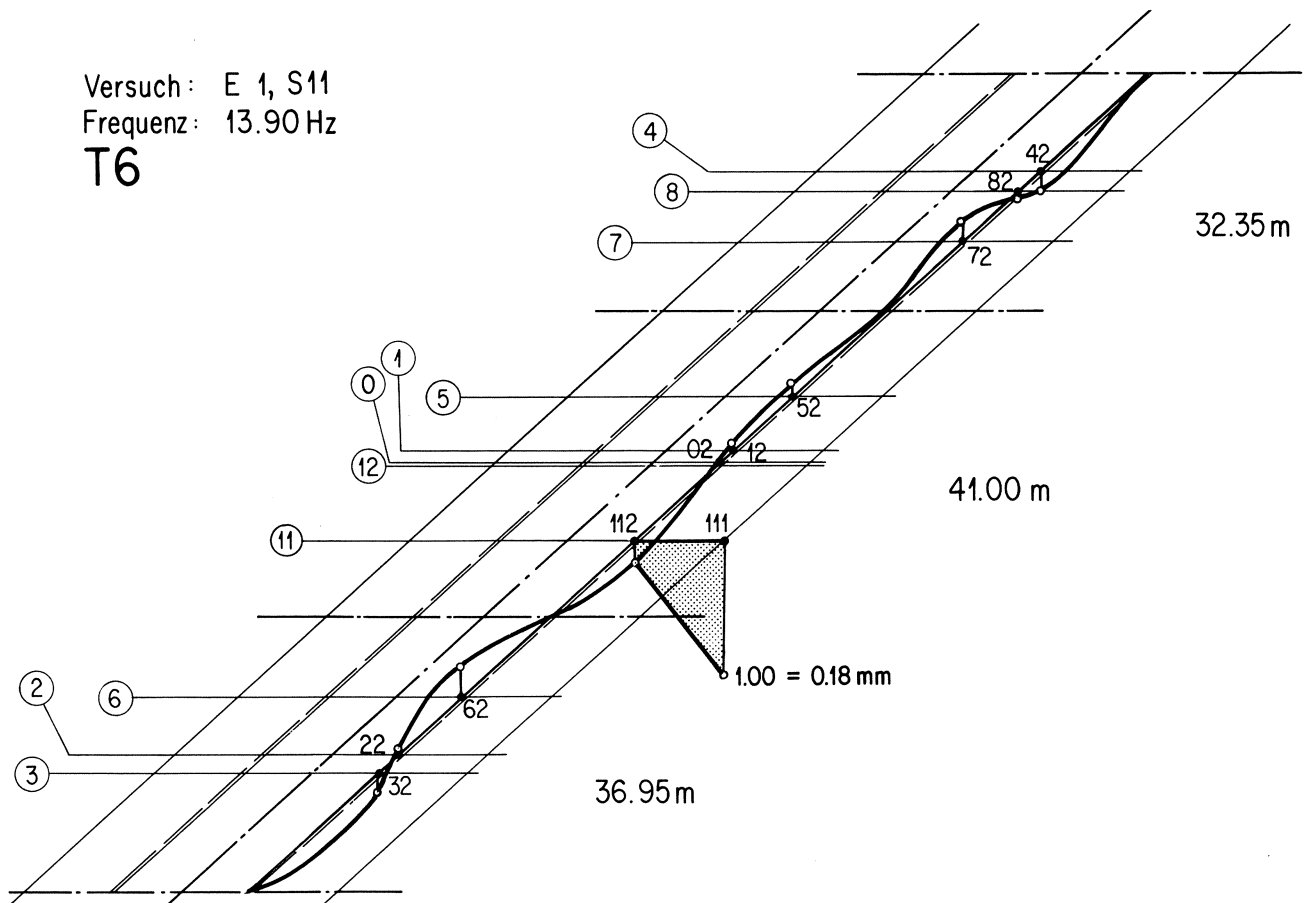
A1.33

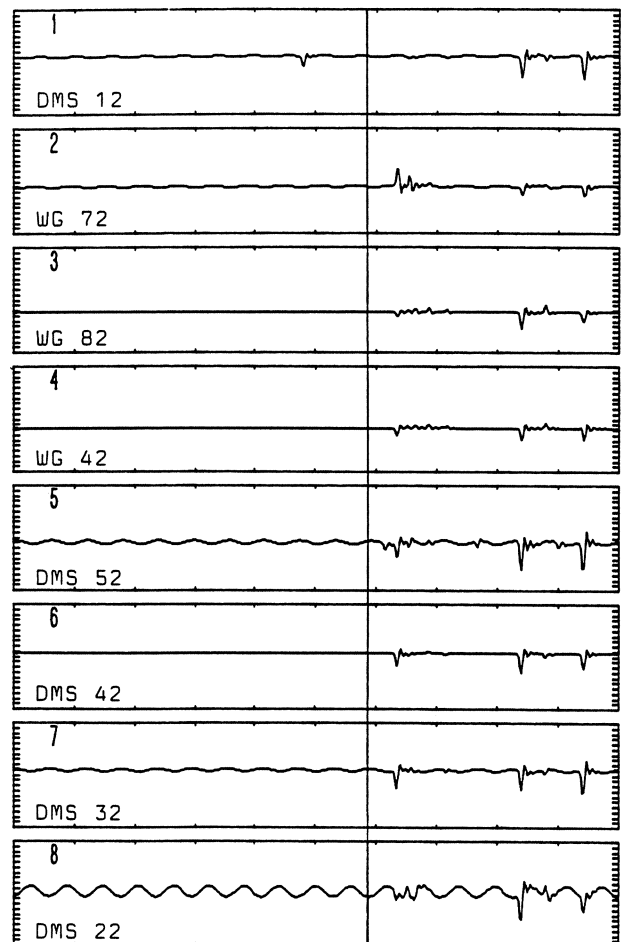
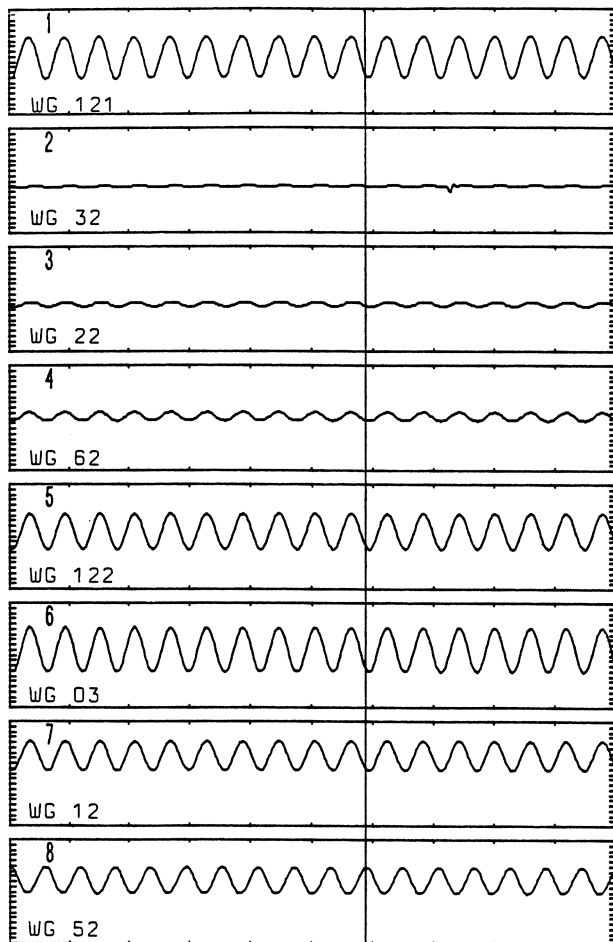
A1.34



Skalierung horizontal: 0.108 s/div

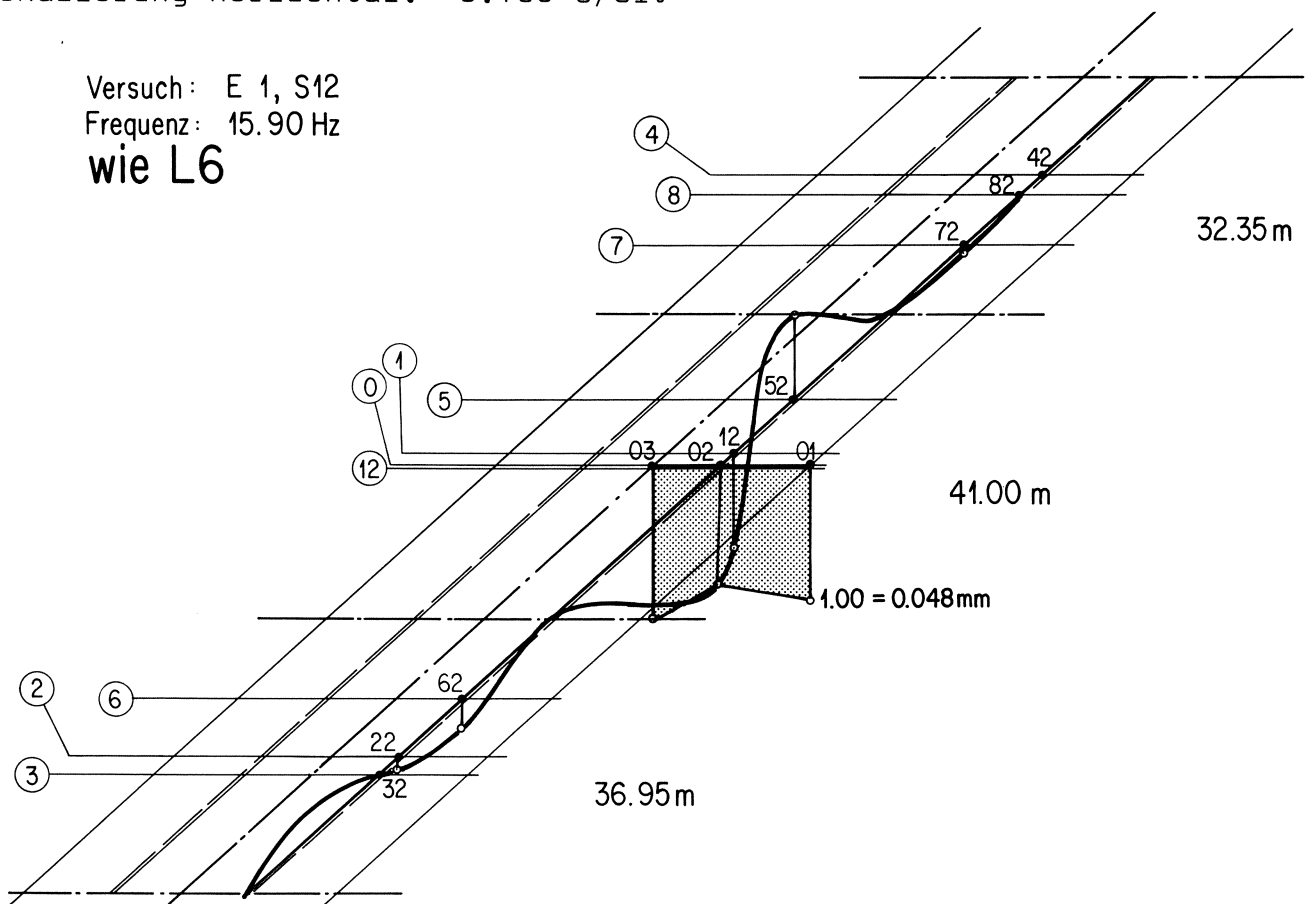
Versuch: E 1, S11
Frequenz: 13.90 Hz
T6

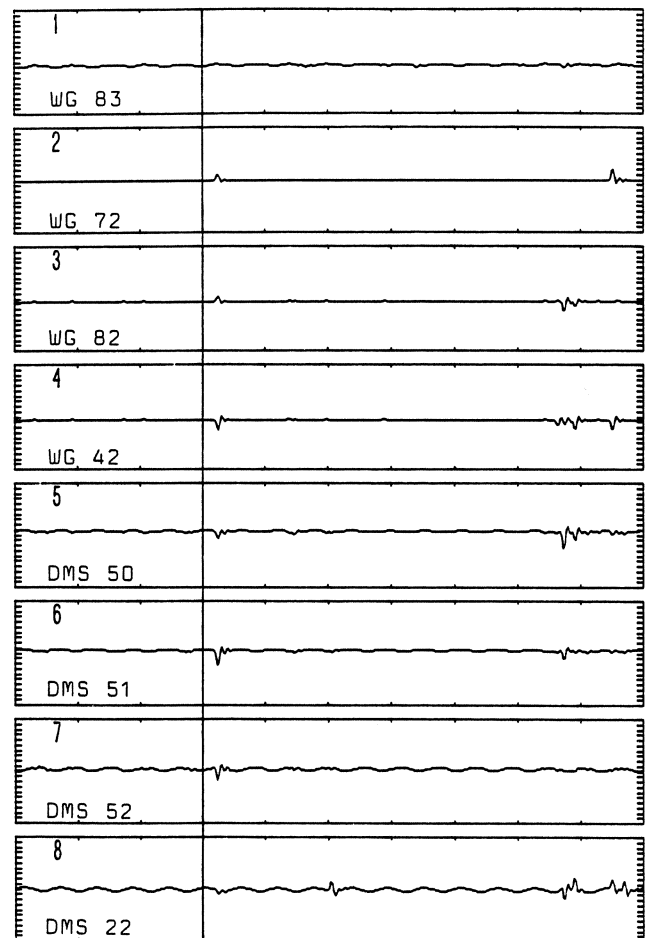
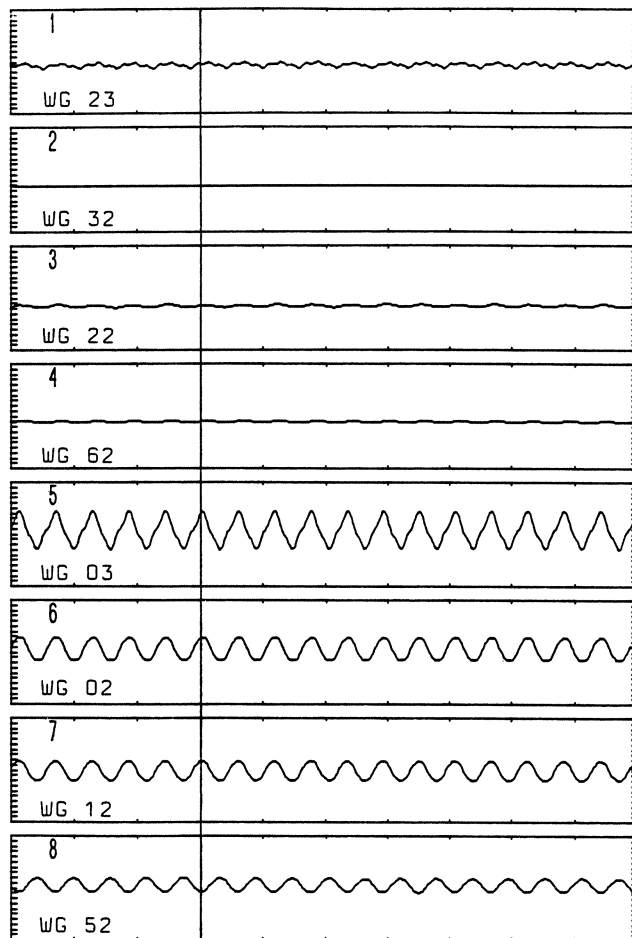




Skalierung horizontal: 0.108 s/div

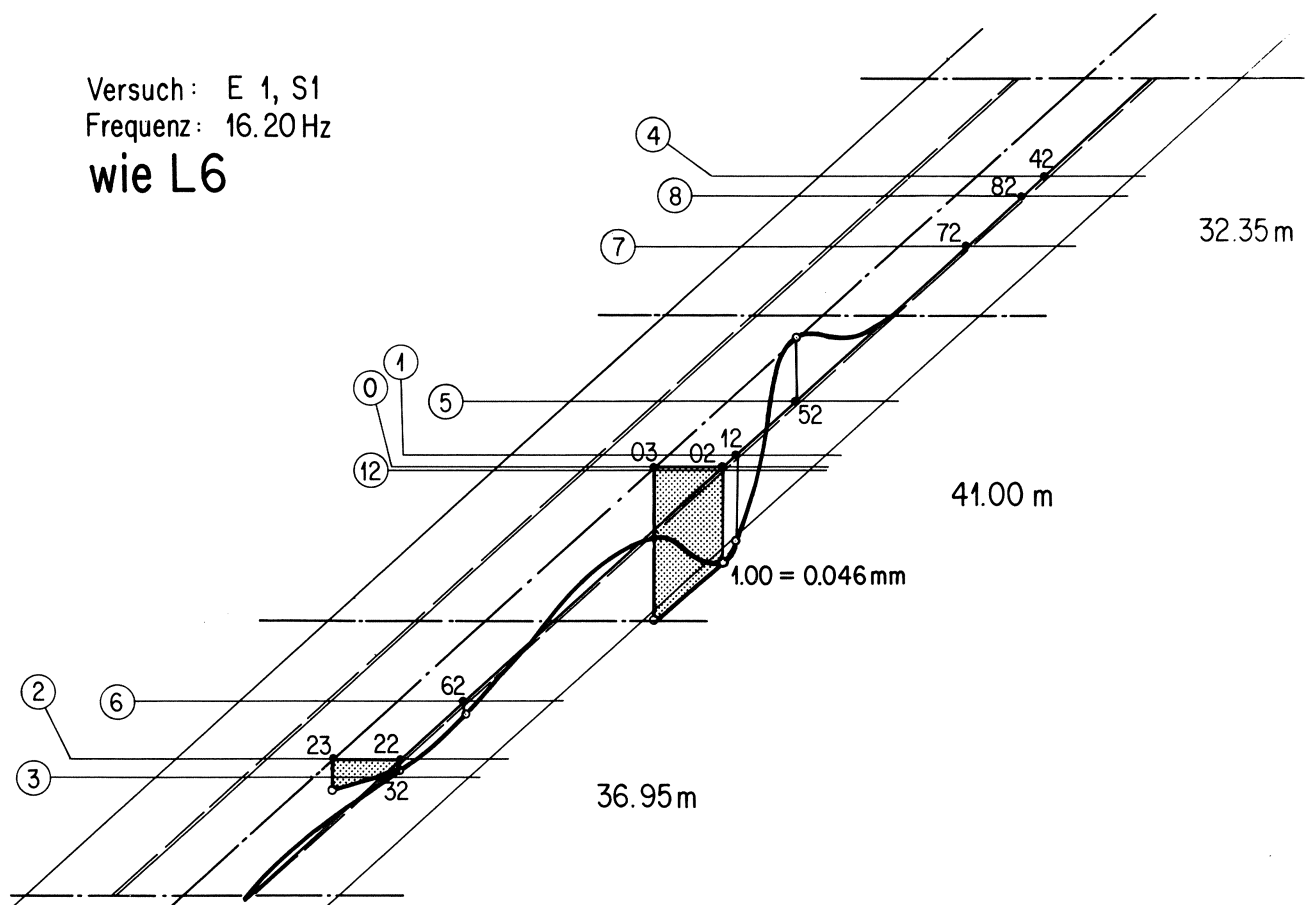
Versuch: E 1, S12
Frequenz: 15.90 Hz
wie L6

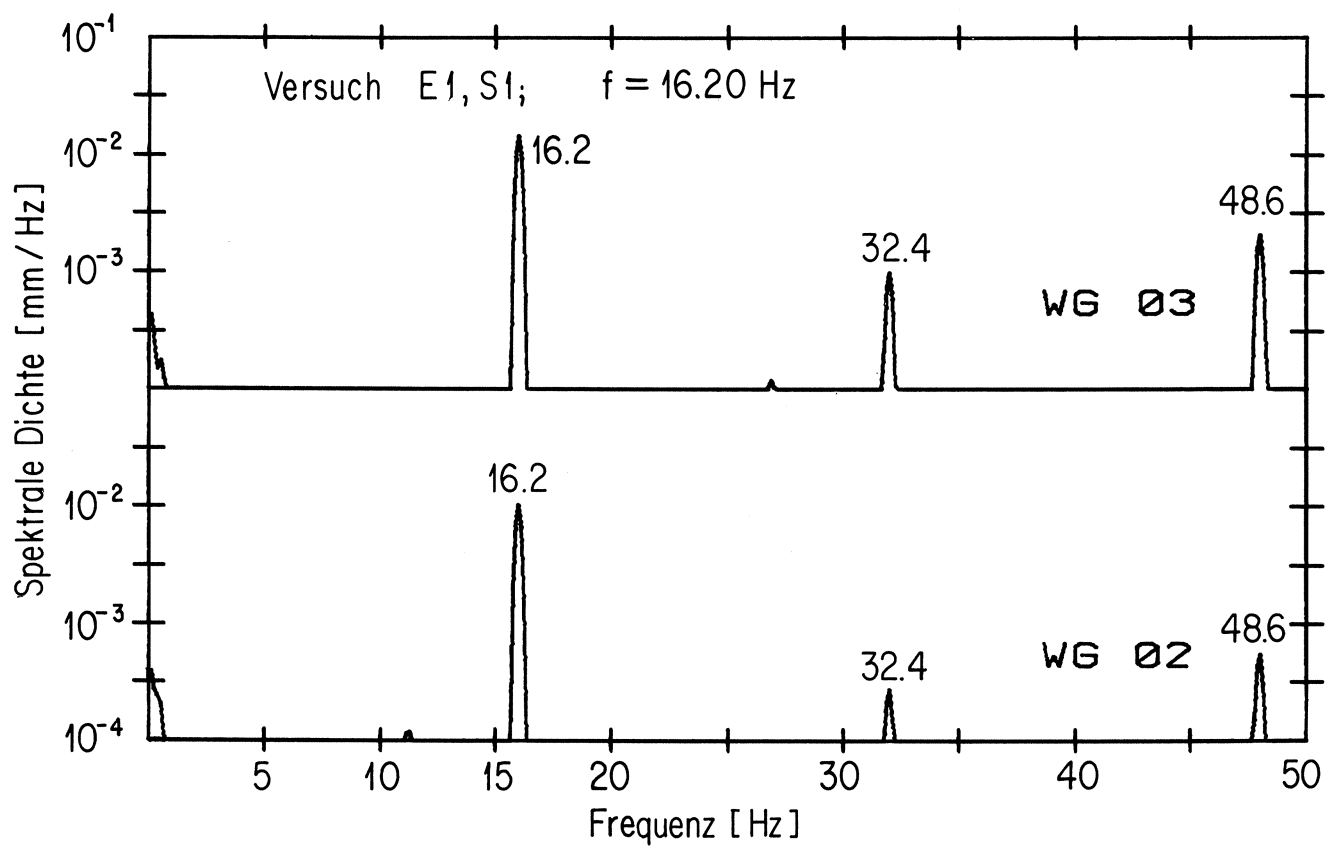


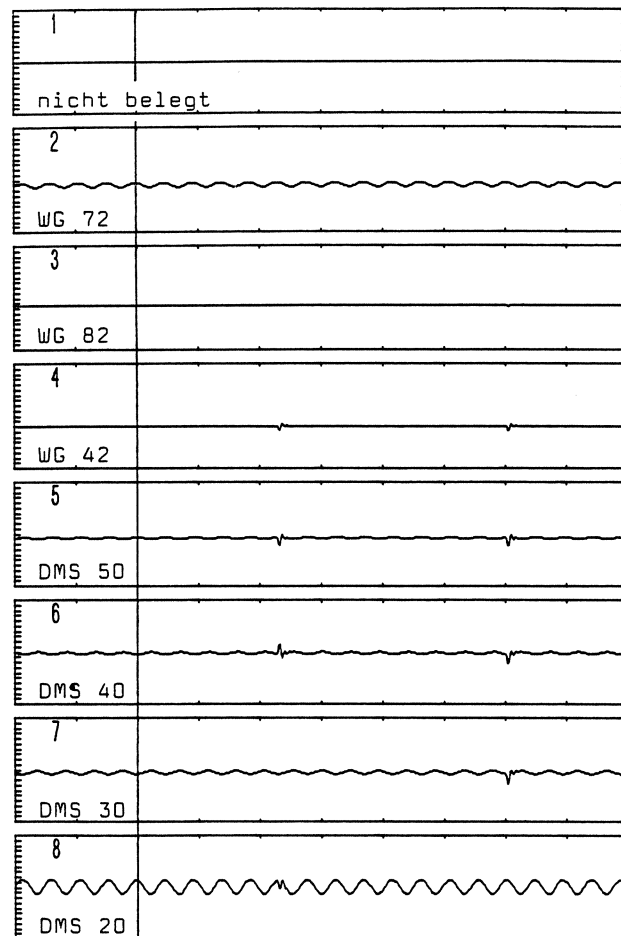
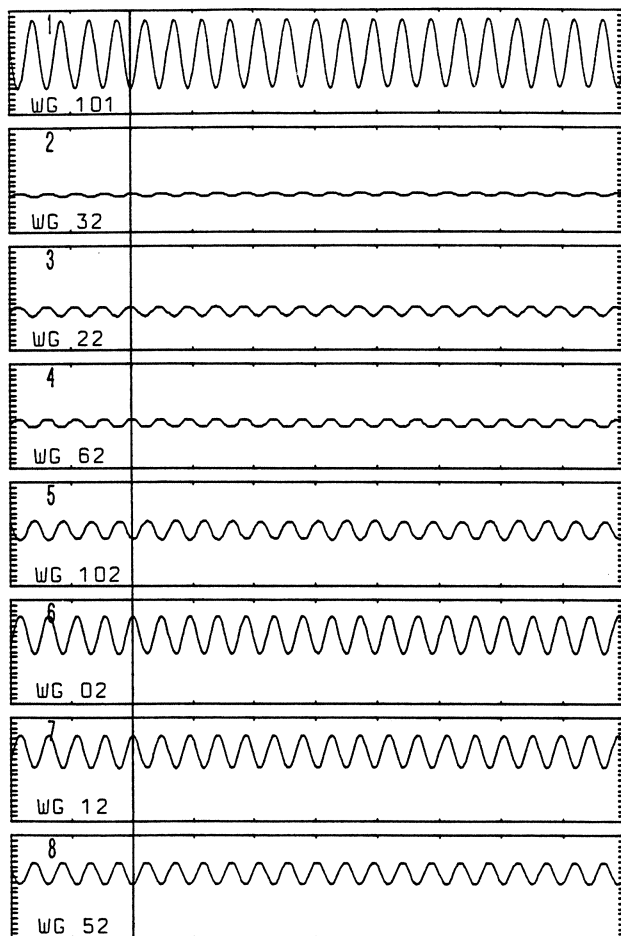


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E 1, S1
Frequenz: 16.20 Hz
wie L6





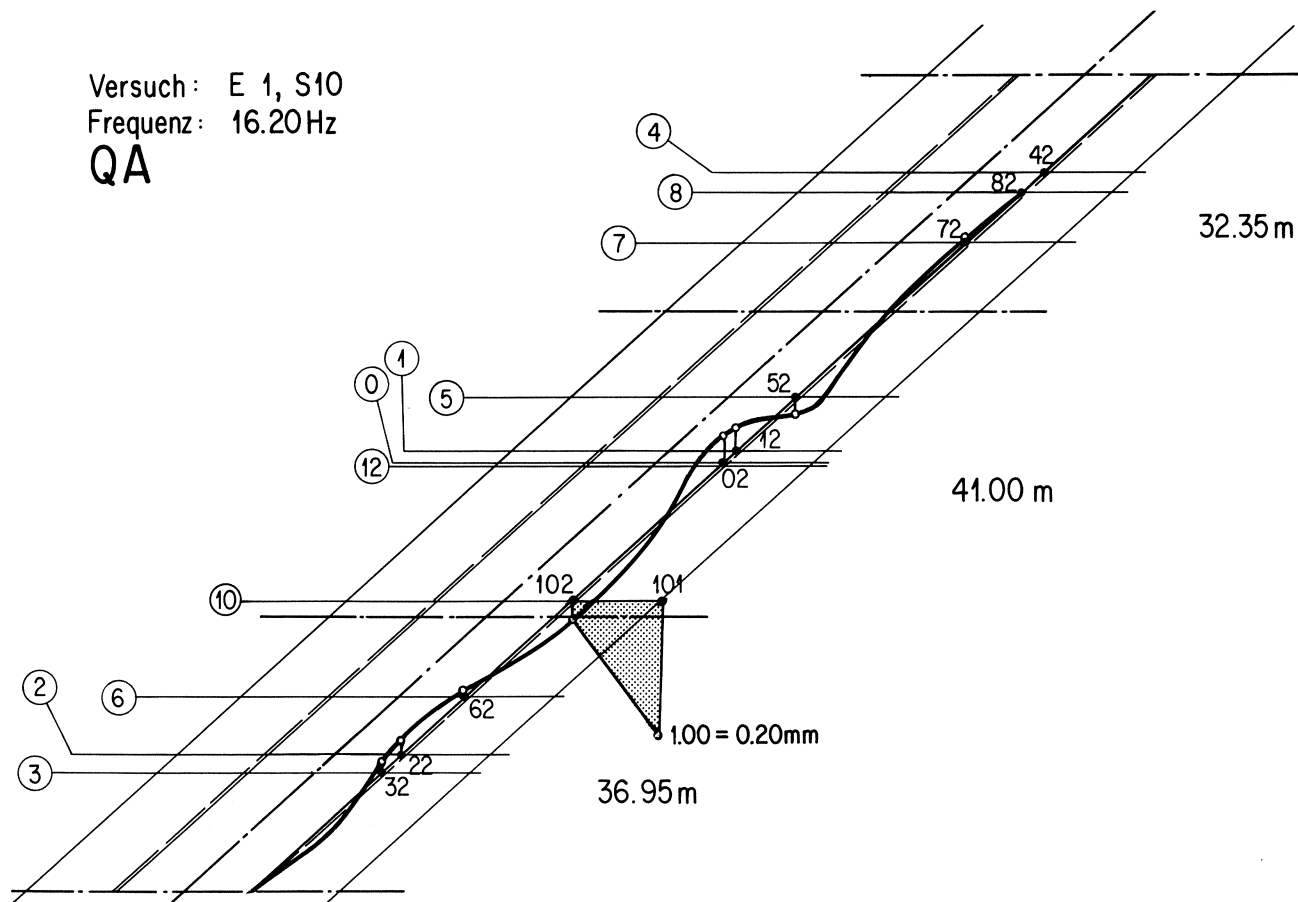


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E 1, S10

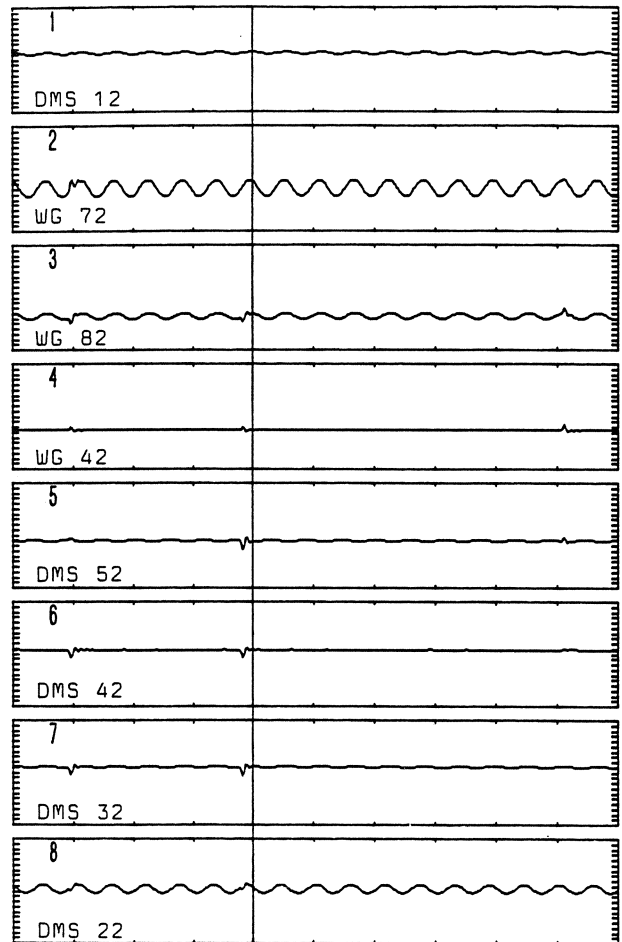
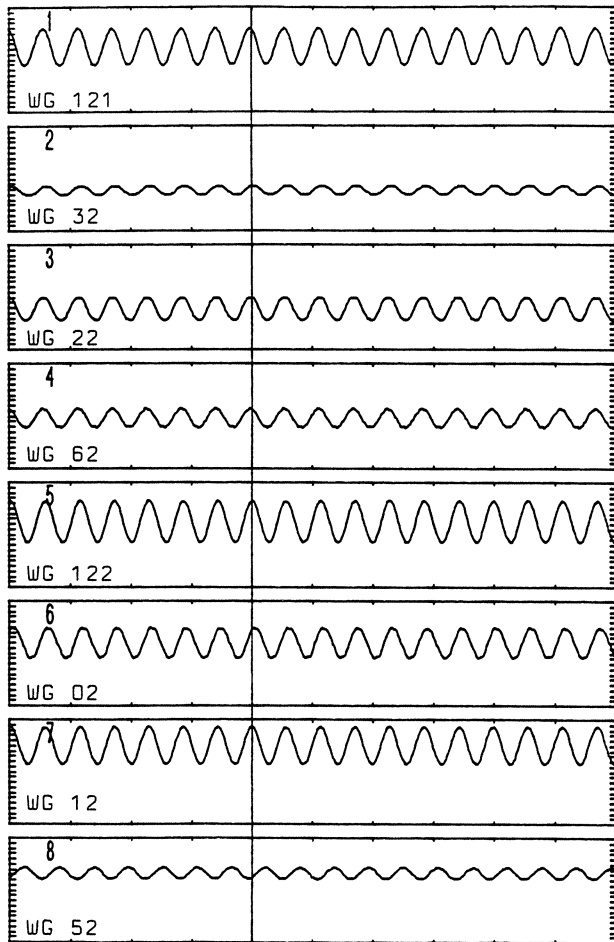
Frequenz: 16.20Hz

QA



A1.42

A1.43

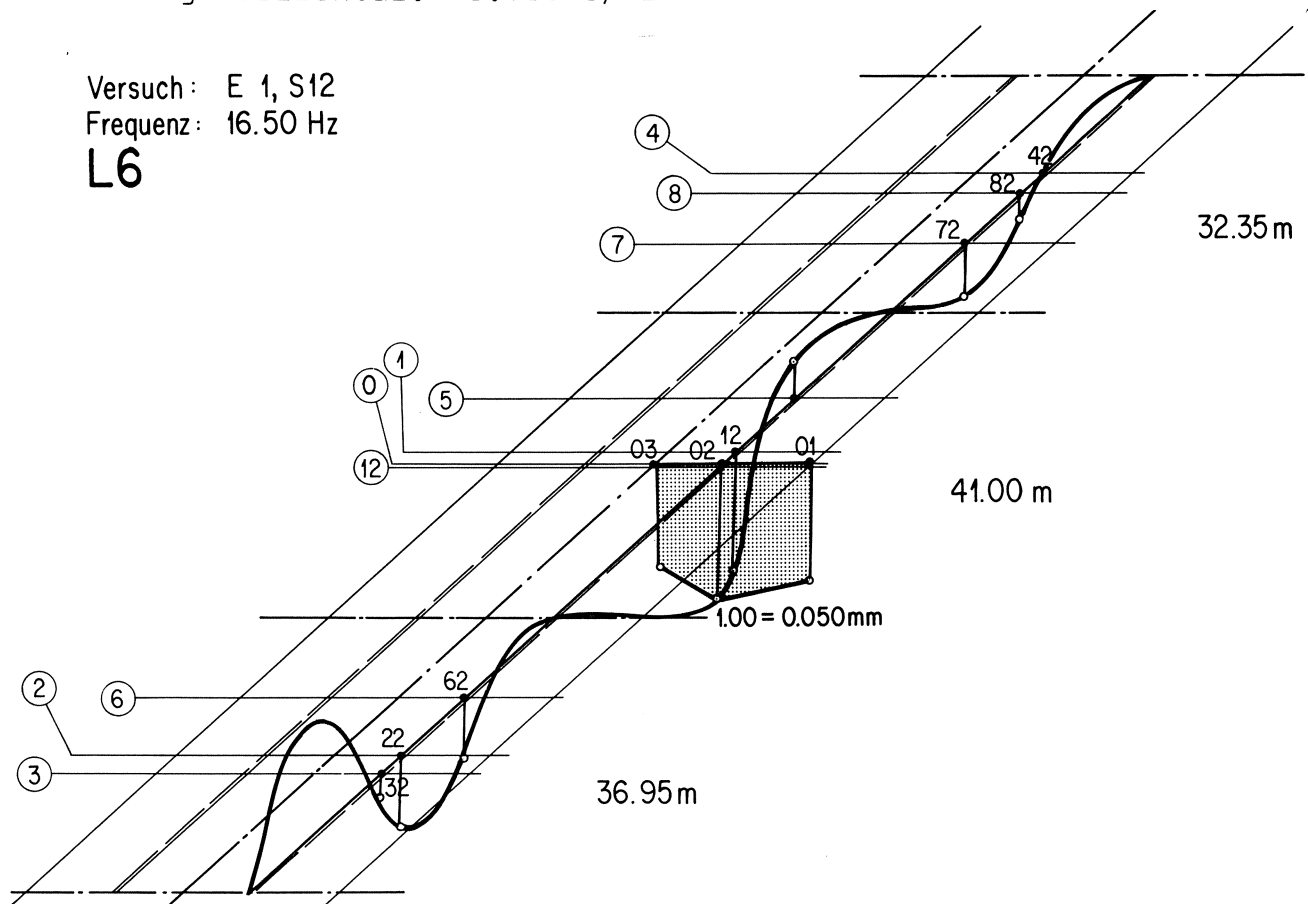


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E 1, S12

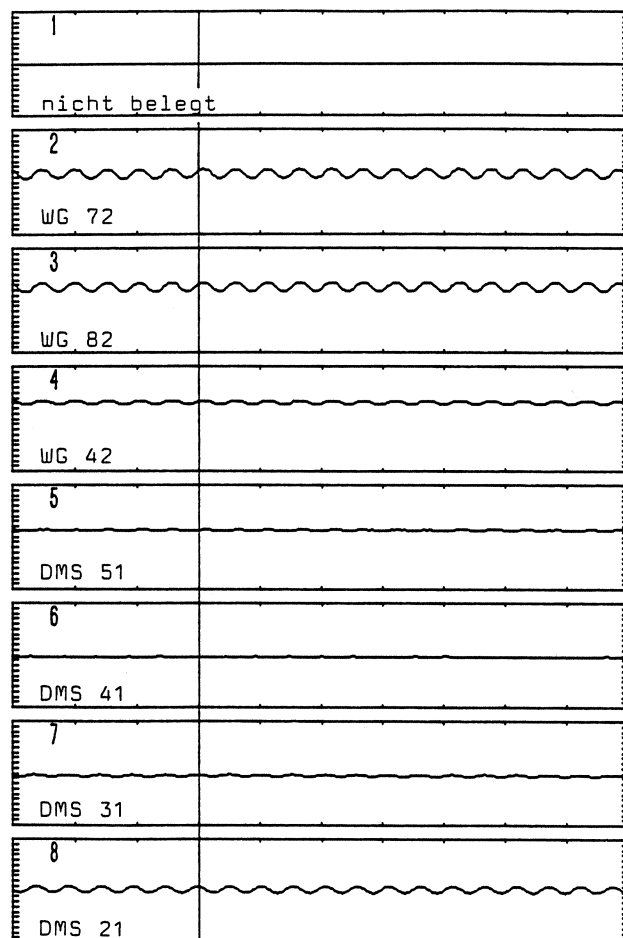
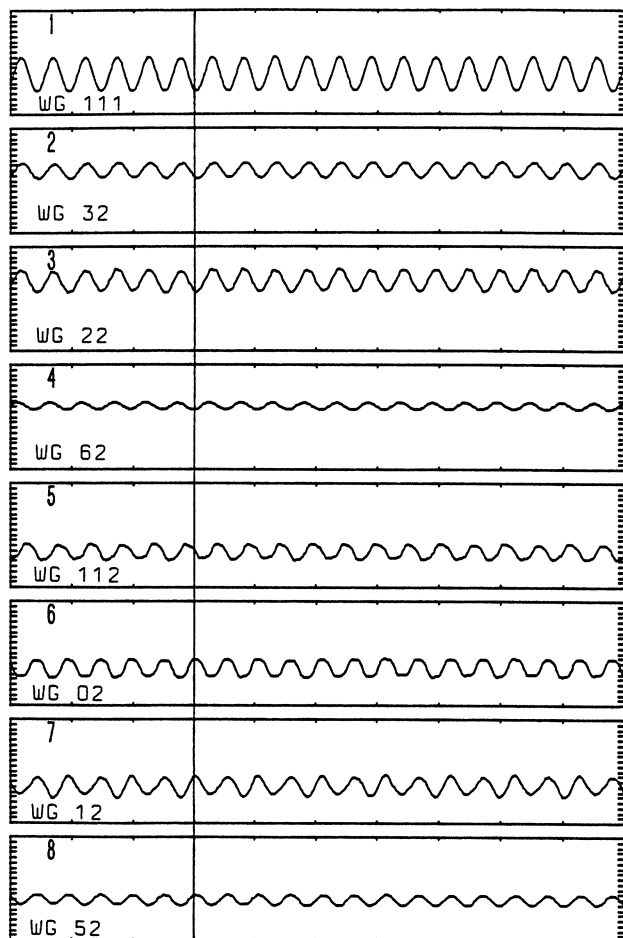
Frequenz: 16.50 Hz

L6



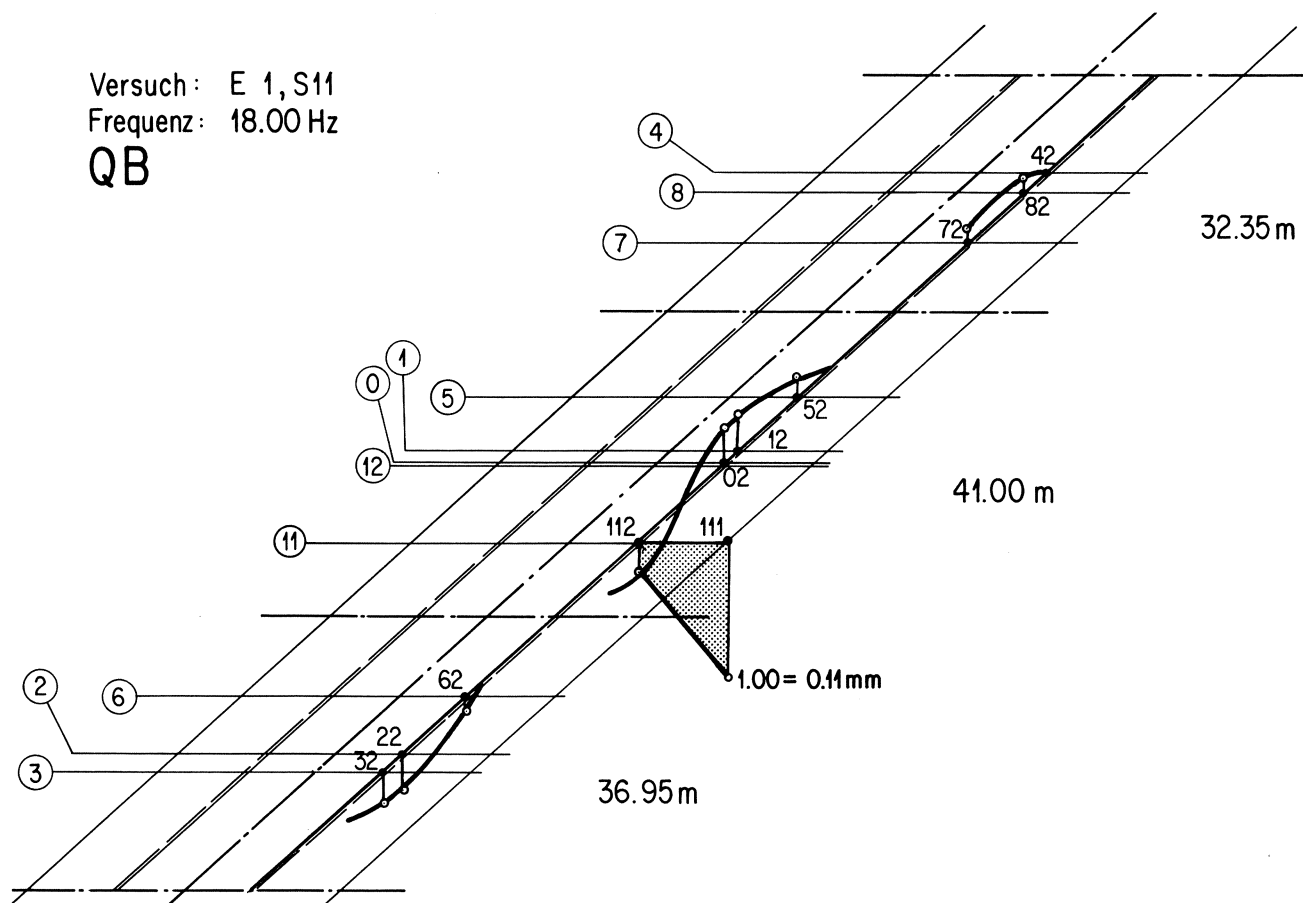
A1.44

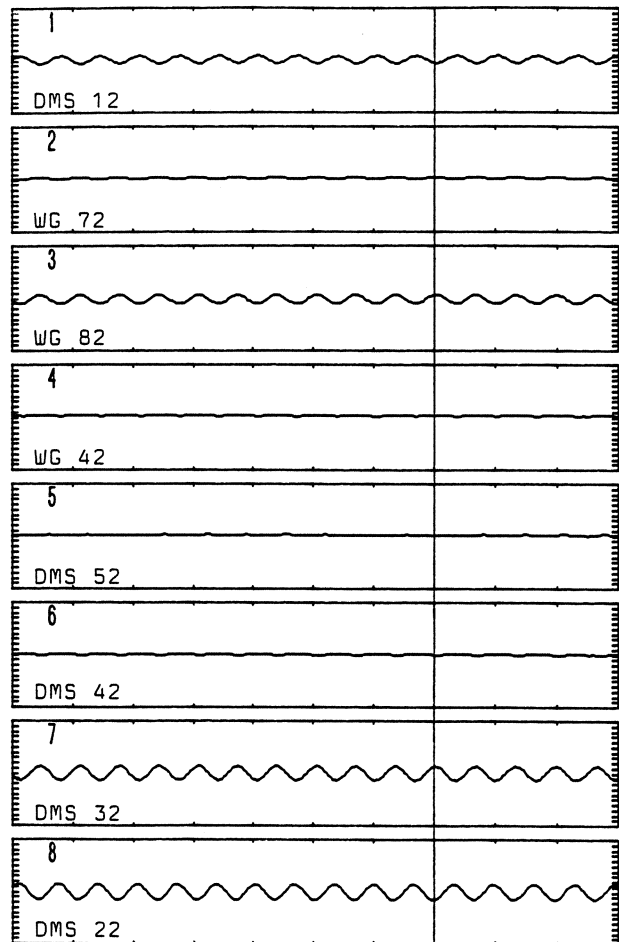
A1.45



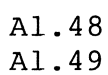
Skalierung horizontal: 0.108 s/div

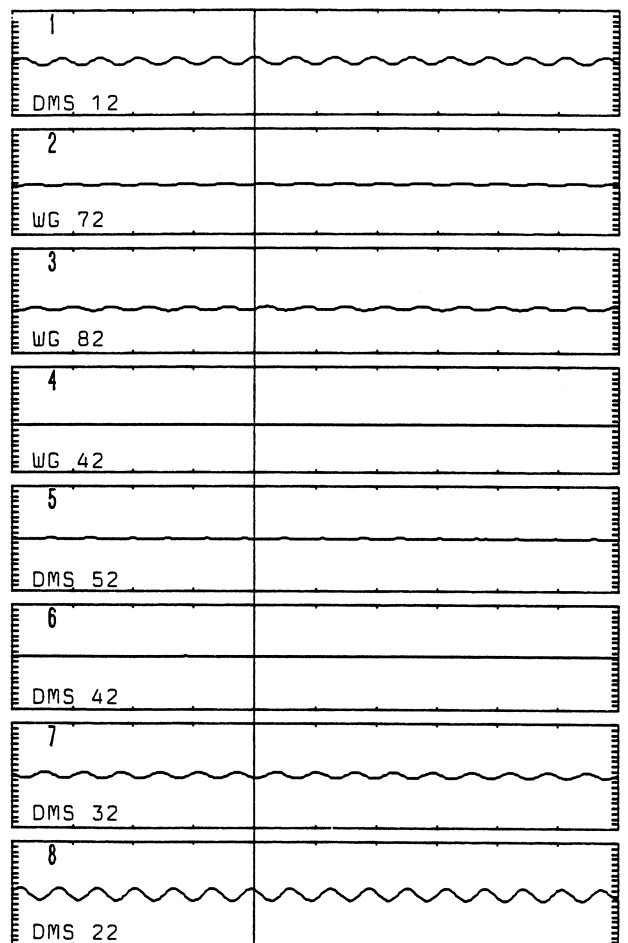
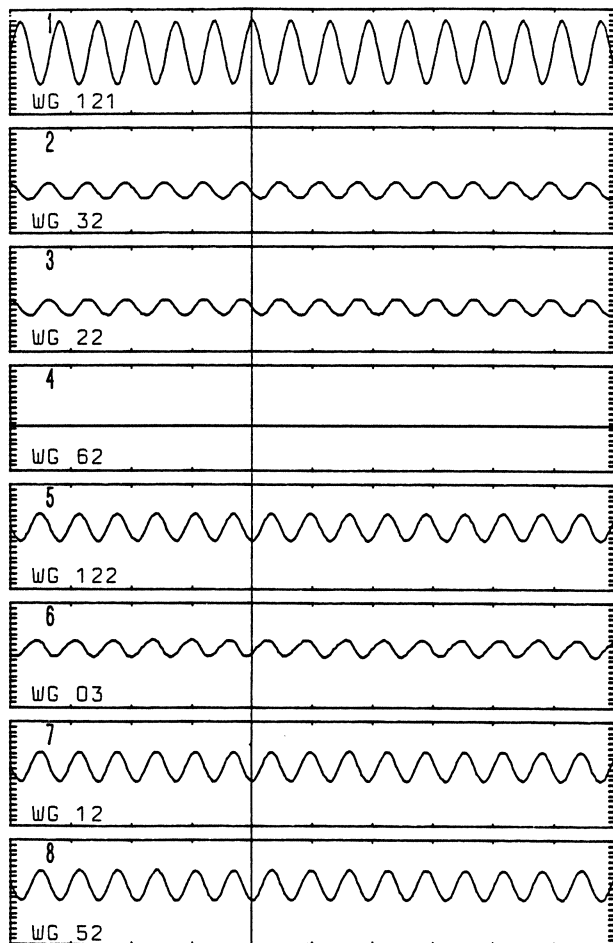
Versuch: E 1, S11
Frequenz: 18.00 Hz
QB





QC



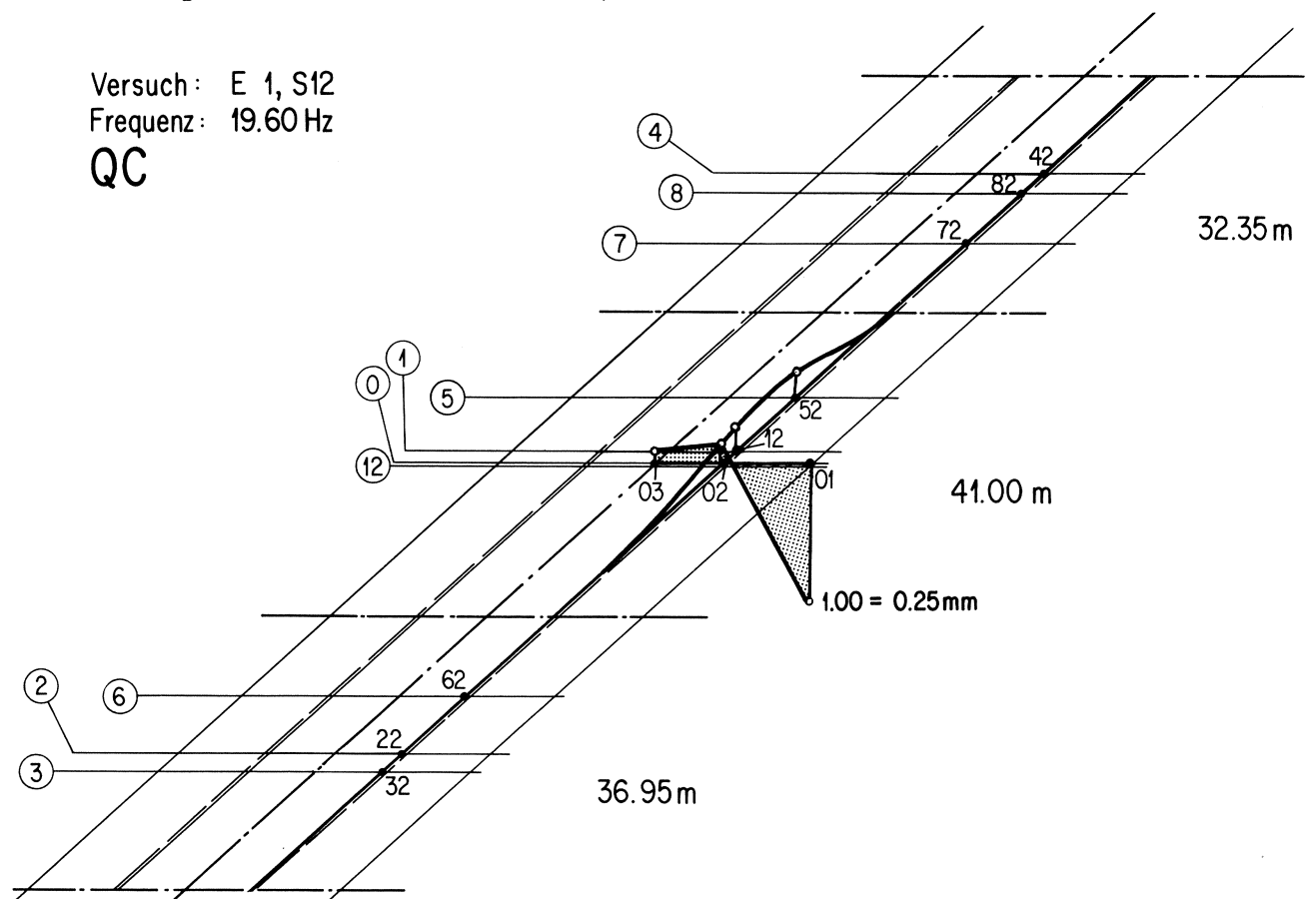


Skalierung horizontal: 0.081 s/div

Versuch: E 1, S12

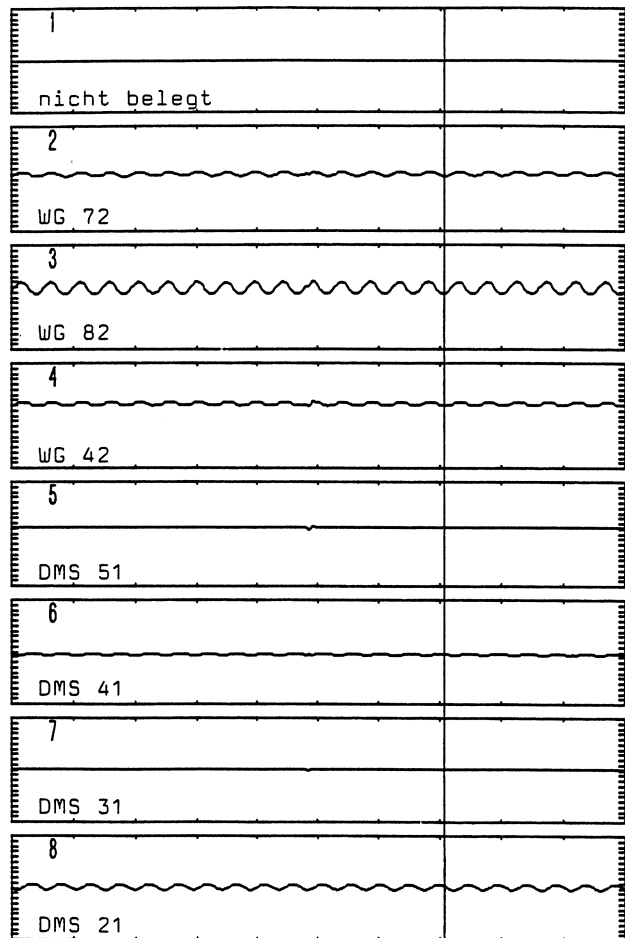
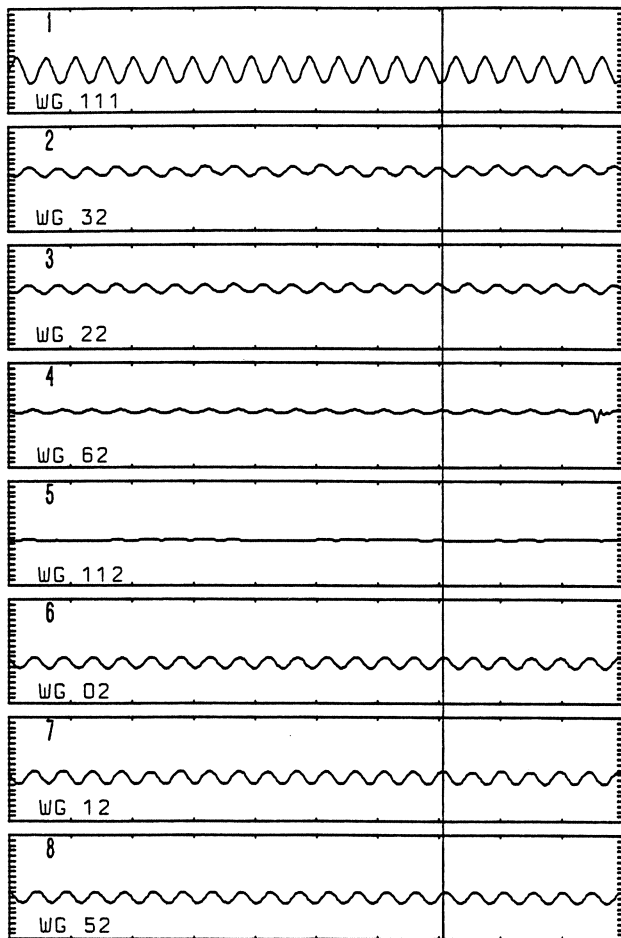
Frequenz: 19.60 Hz

QC



A1.50

A1.51

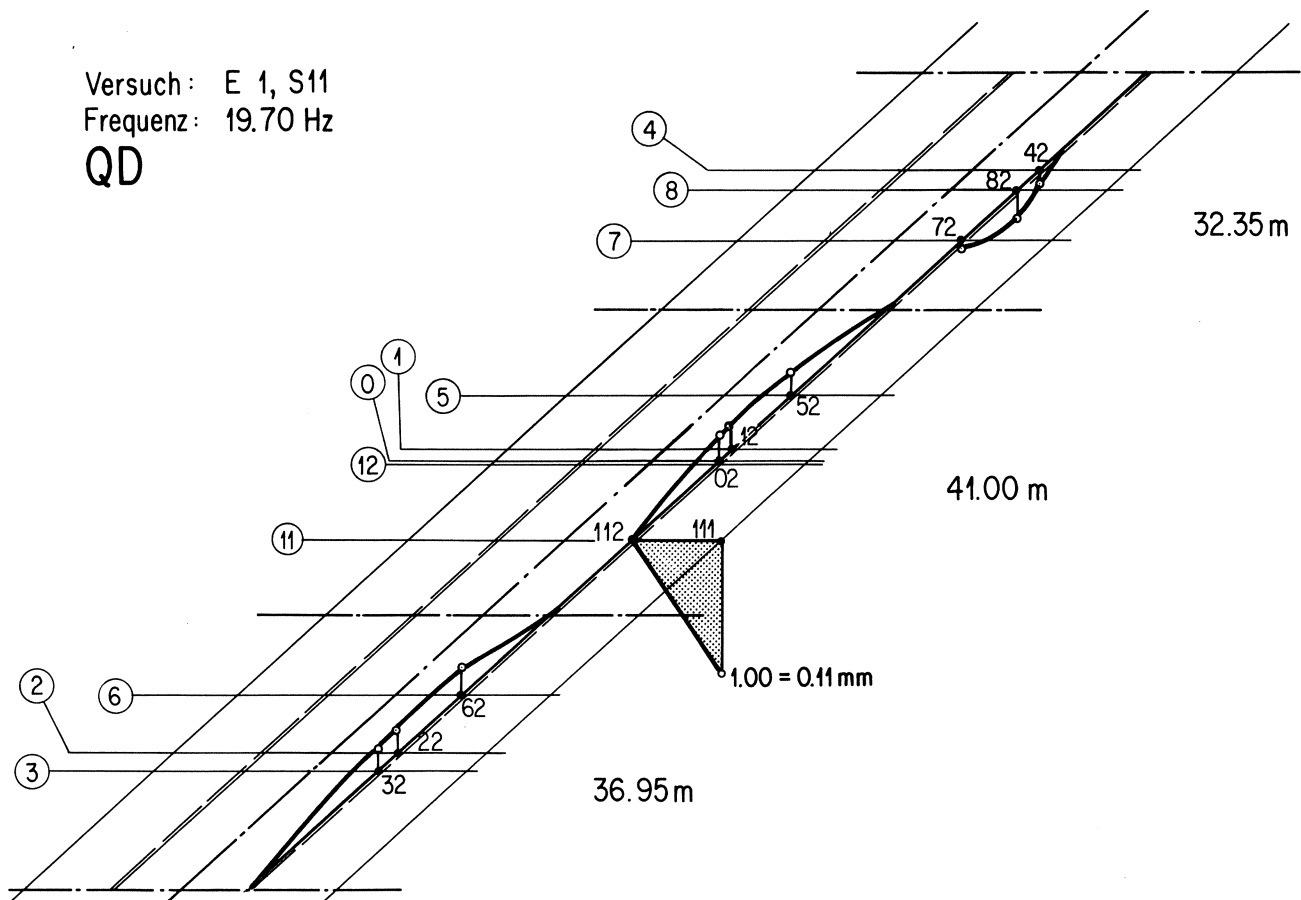


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E 1, S11

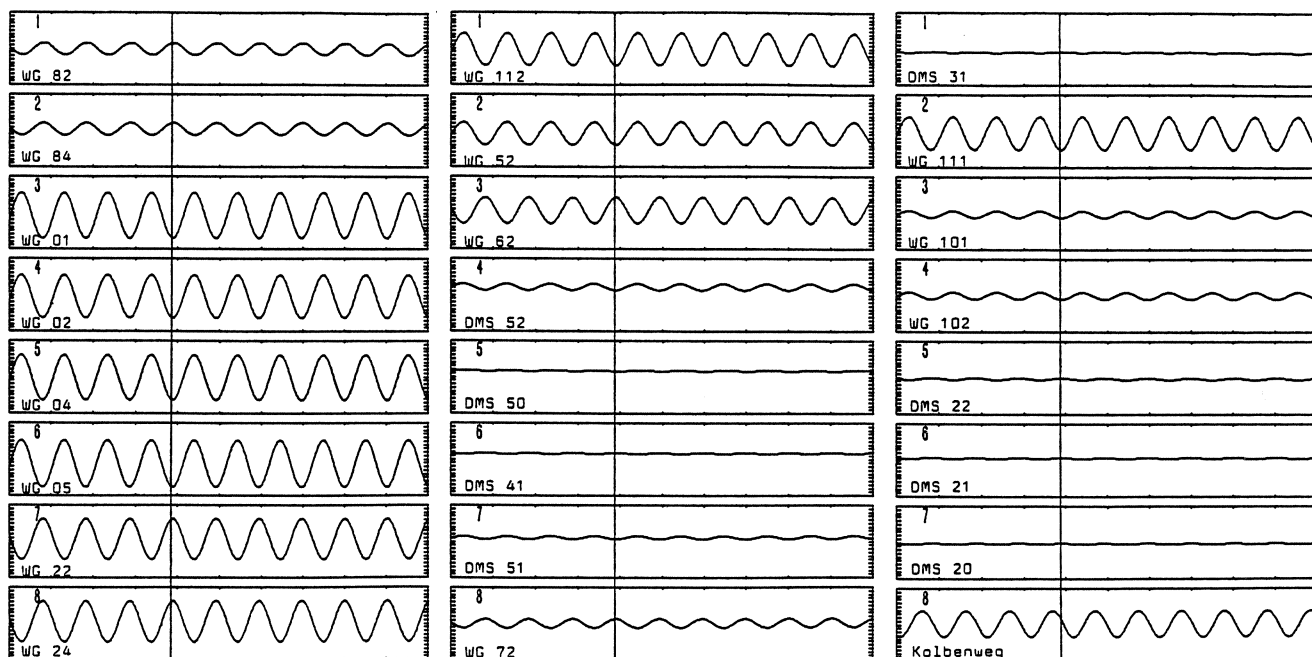
Frequenz: 19.70 Hz

QD



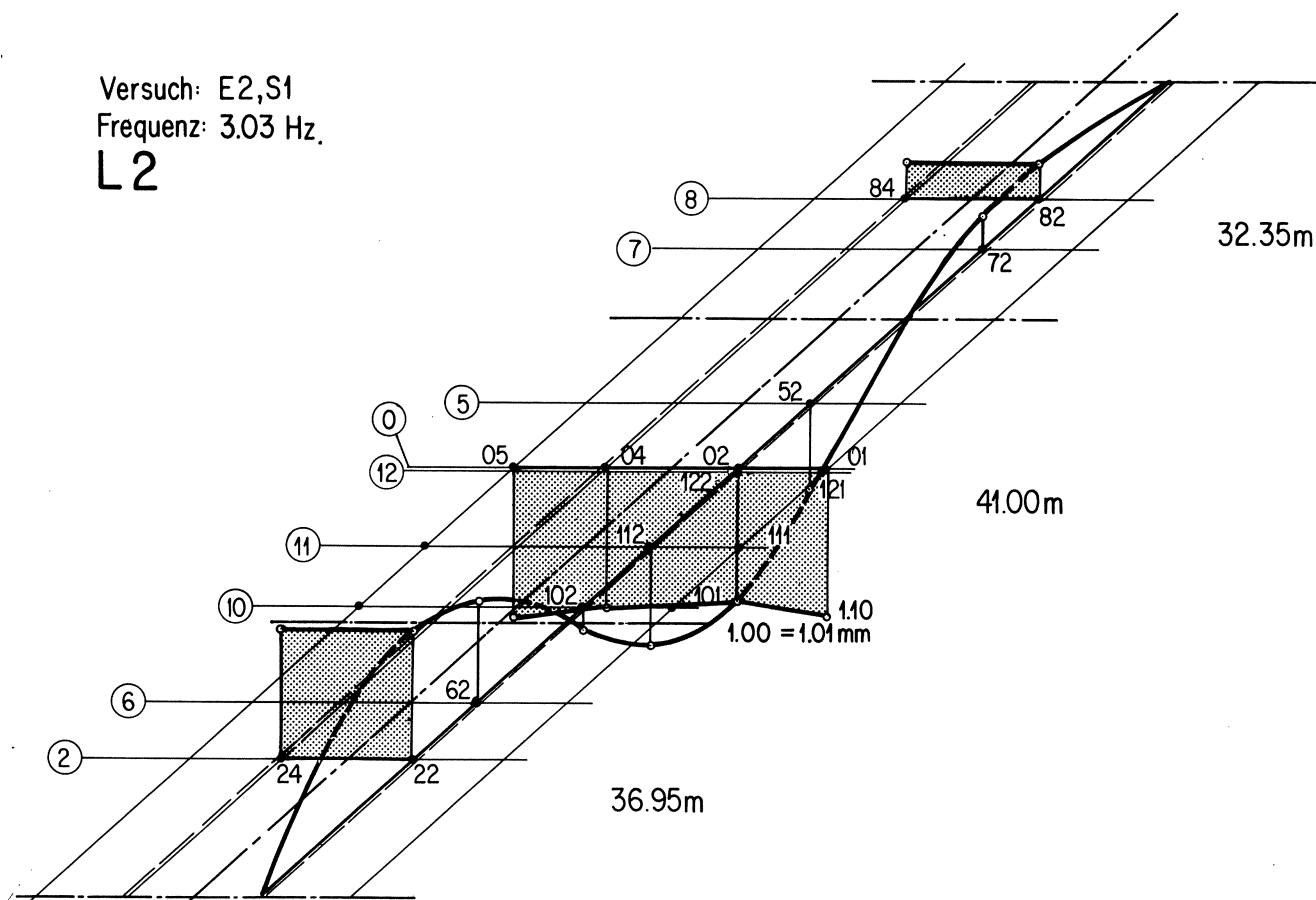
A1.52

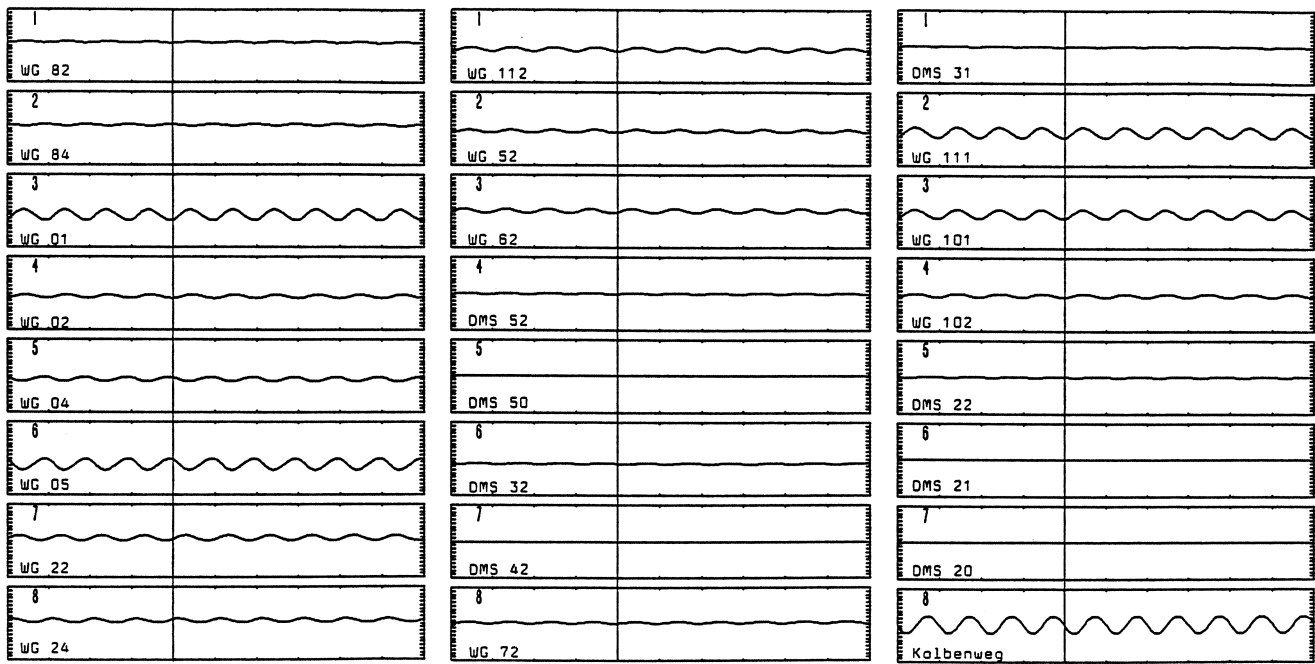
A1.53



Skalierung horizontal: 0.324 s/div

Versuch: E2,S1
Frequenz: 3.03 Hz.
L2



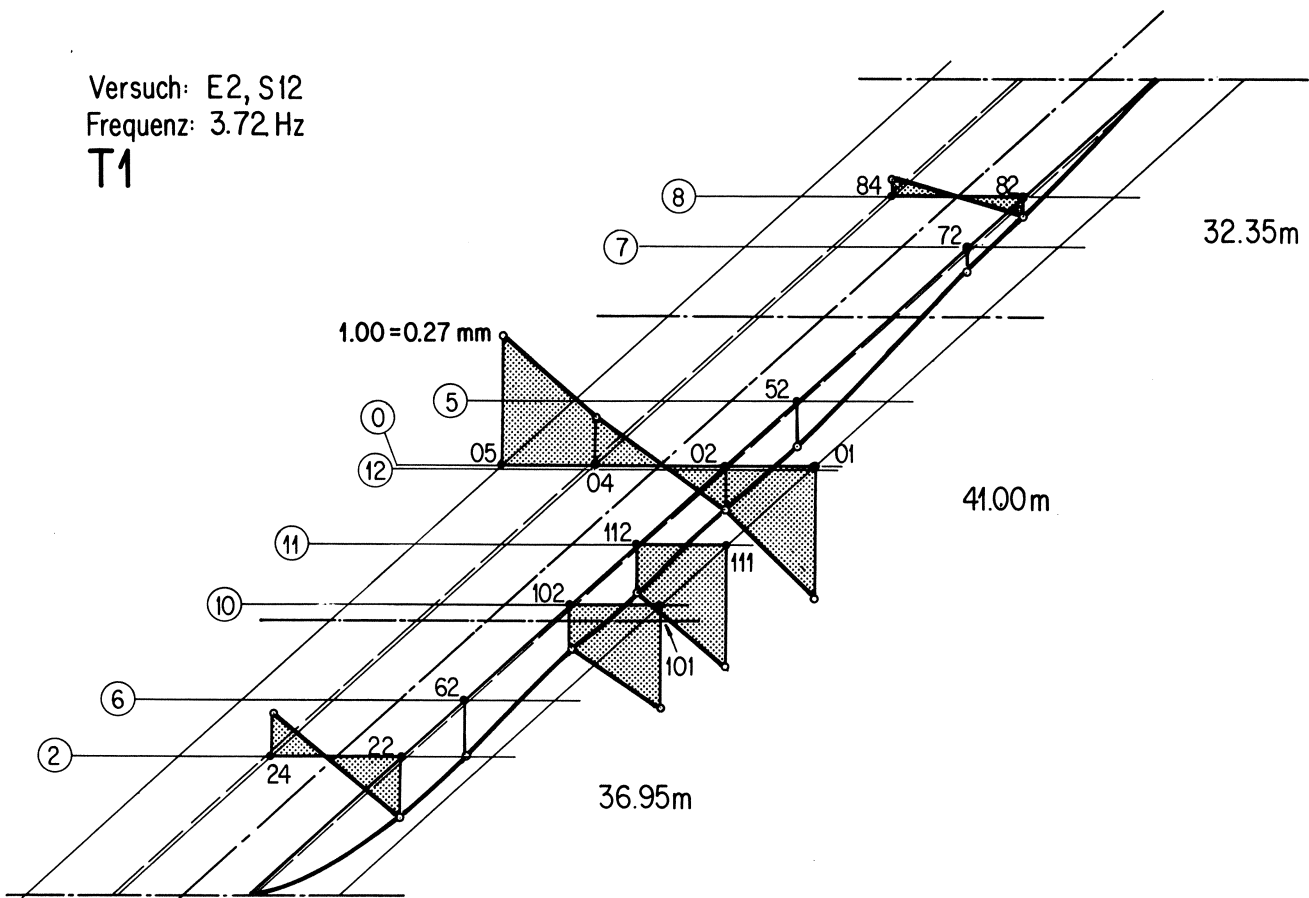


Skalierung horizontal: 0.270 s/div

Versuch: E2, S12

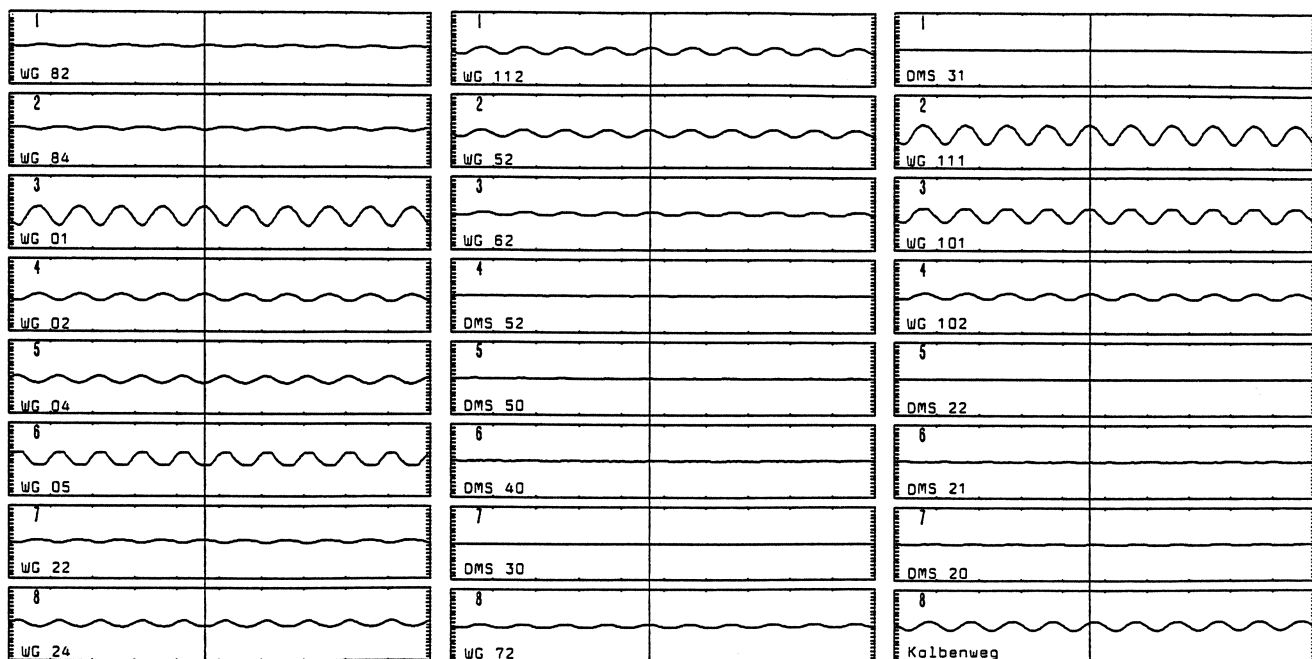
Frequenz: 3.72 Hz

T1



A1.56

A1.57

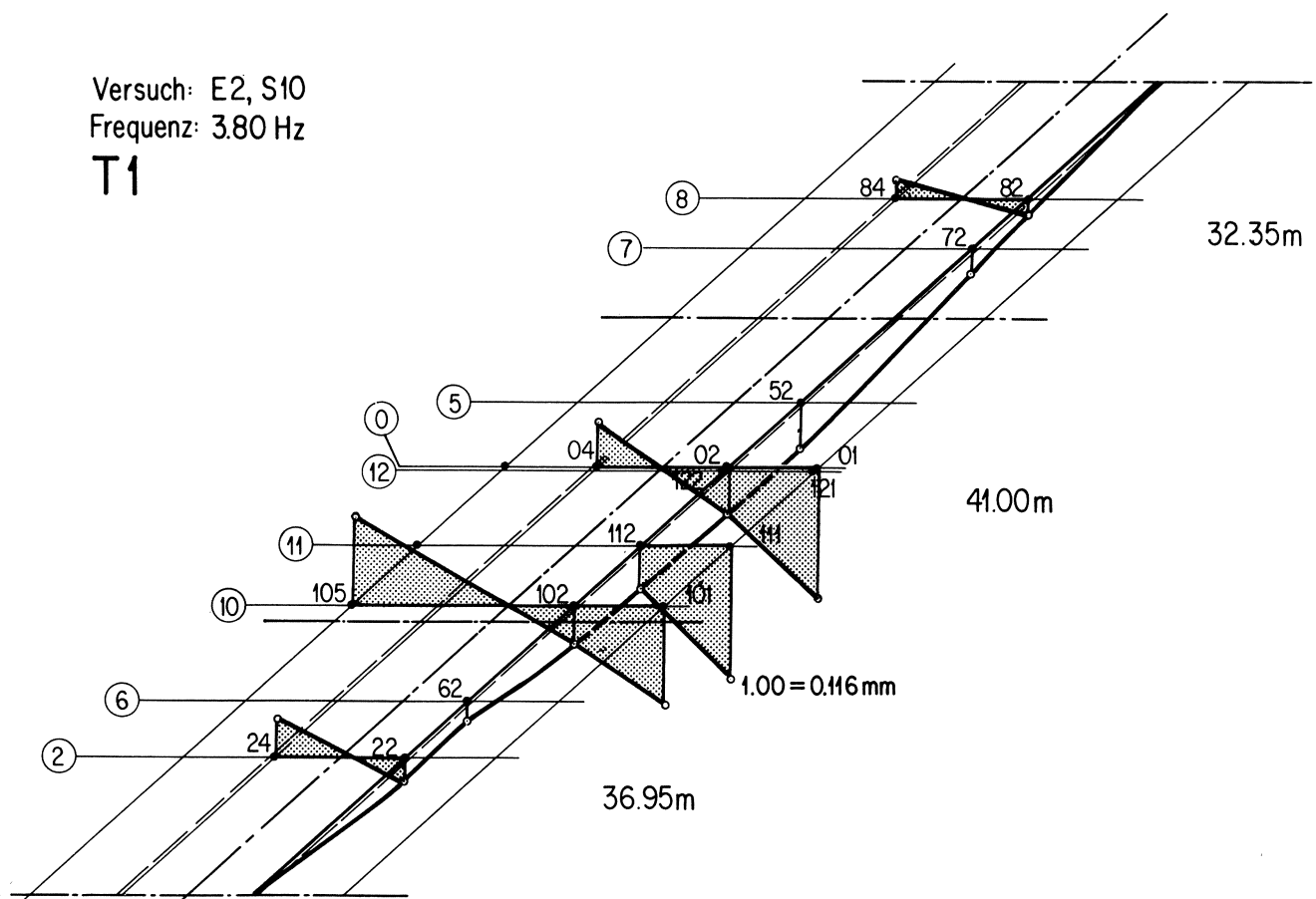


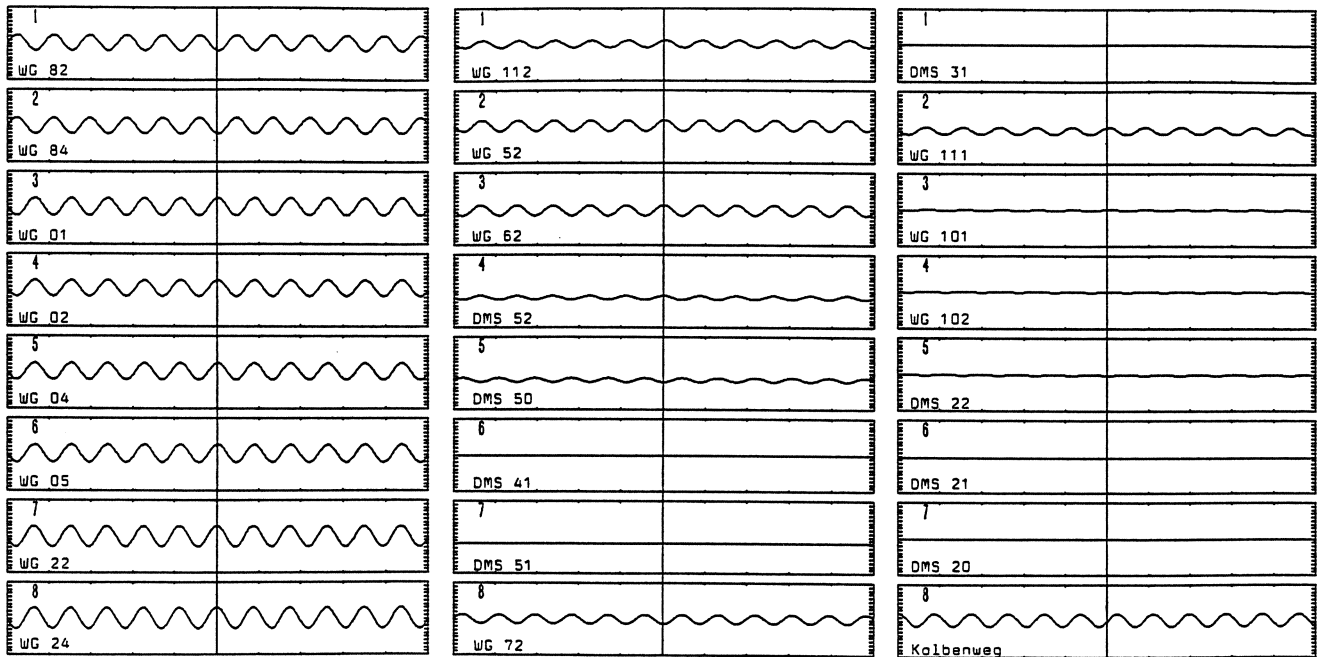
Skalierung horizontal: 0.270 s/div

Versuch: E2, S10

Frequenz: 3.80 Hz

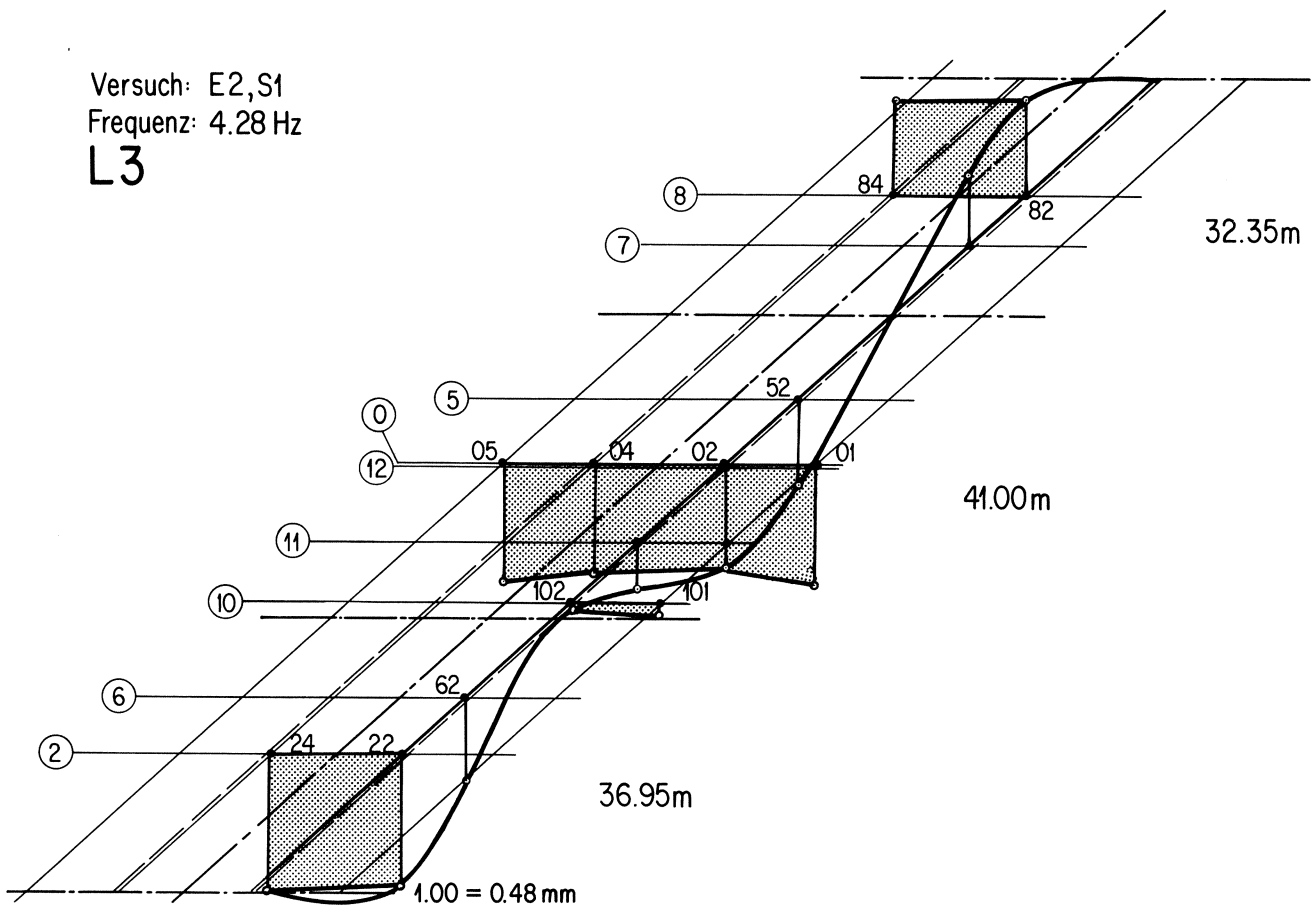
T1



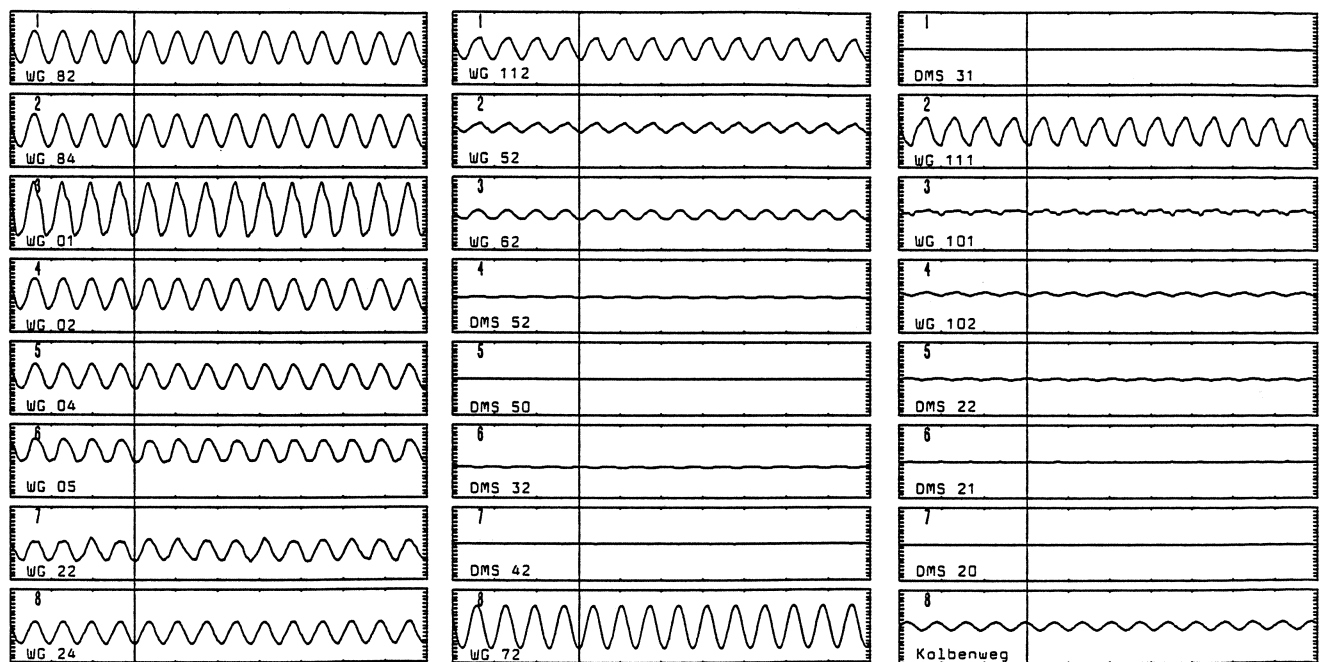


Skalierung horizontal: 0.270 s/div

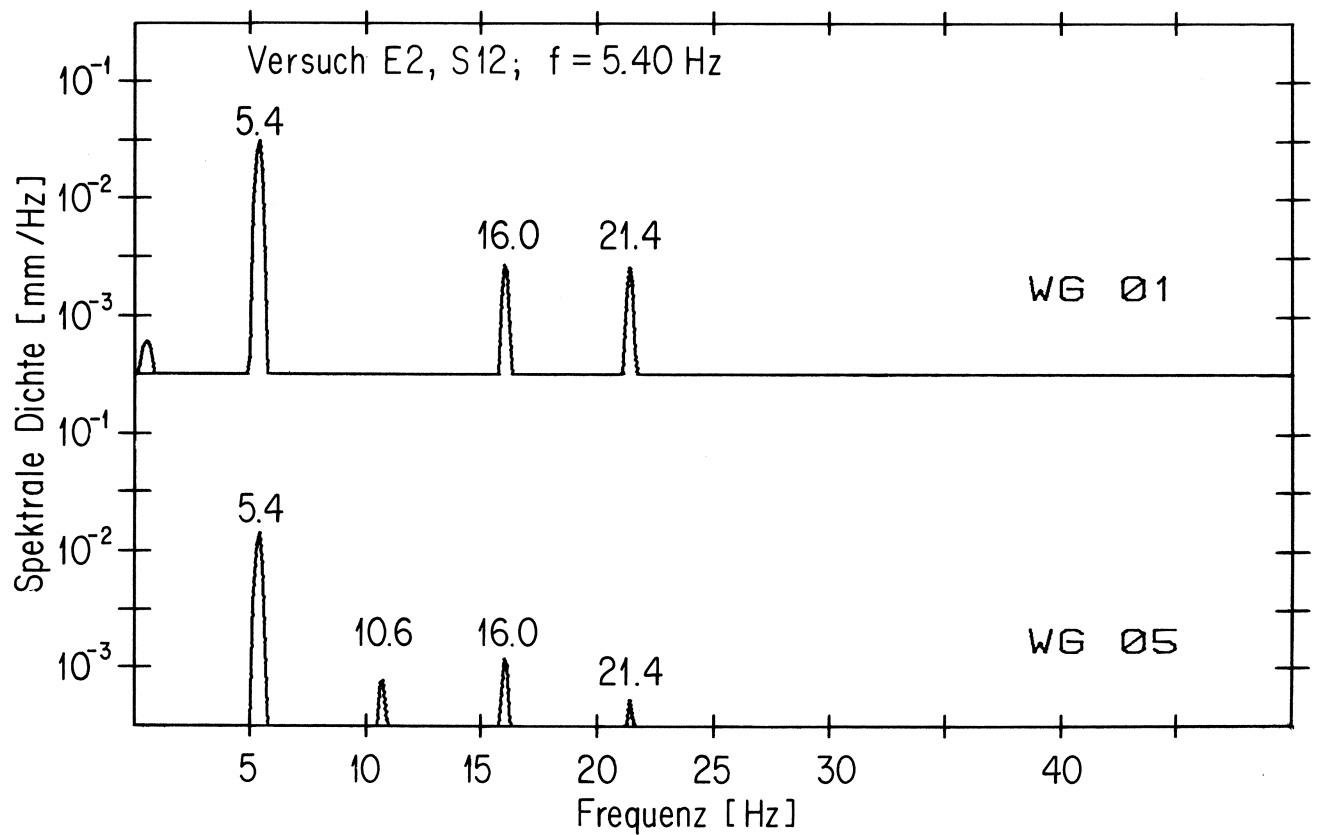
Versuch: E2,S1
Frequenz: 4.28 Hz
L3

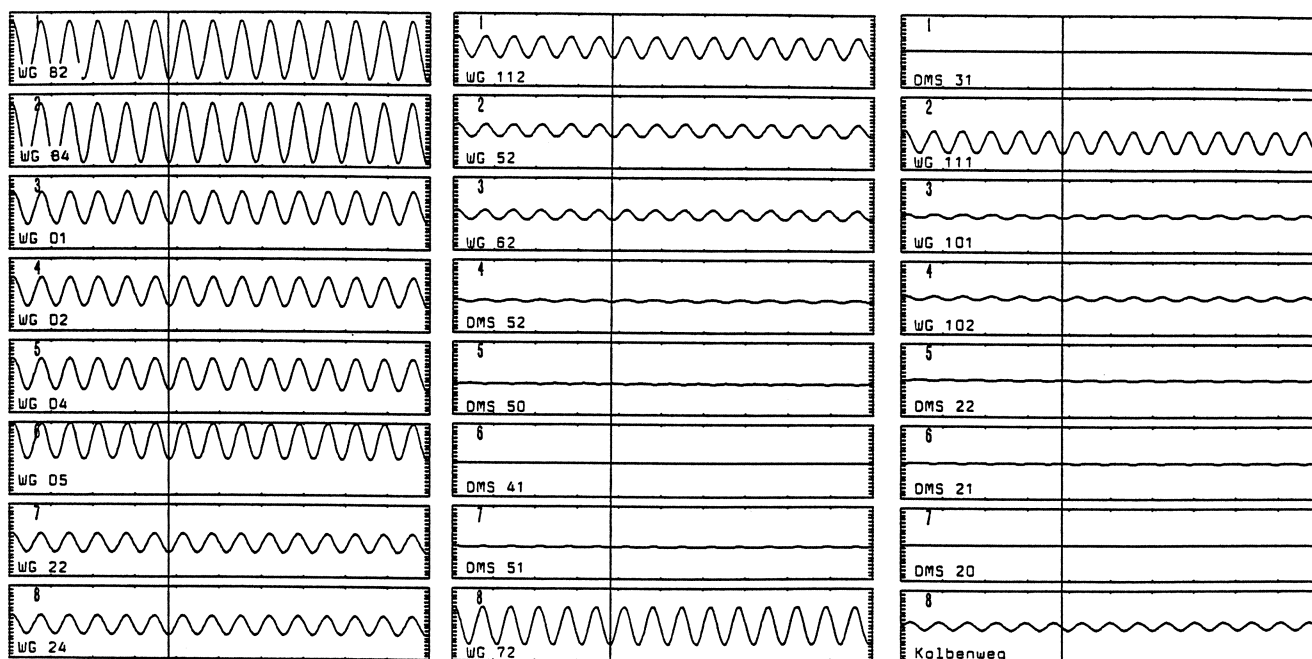


A1.60
A1.61



Versuch: E2, S12, $f = 5.40 \text{ Hz}$, Skalierung horizontal: 0.270 s/div

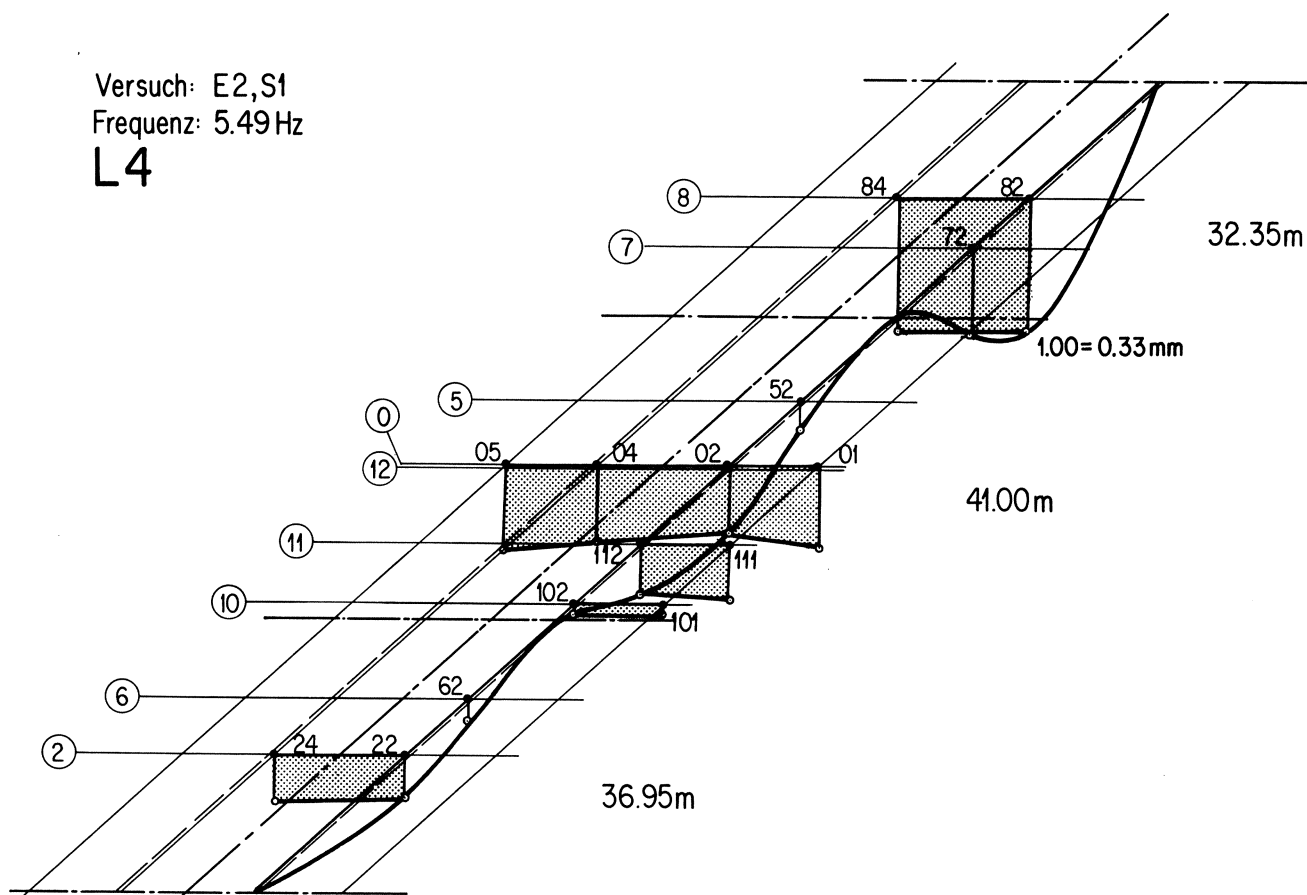




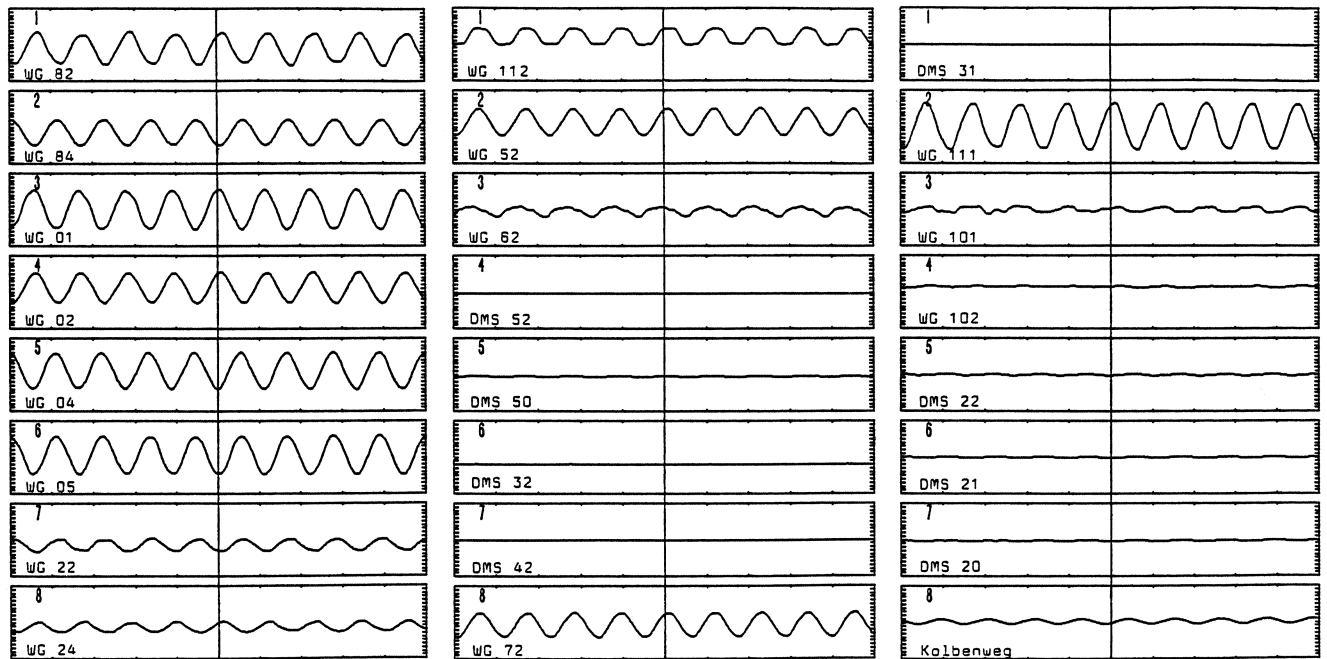
Skalierung horizontal: 0.270 s/div

Versuch: E2,S1
Frequenz: 5.49 Hz

L4

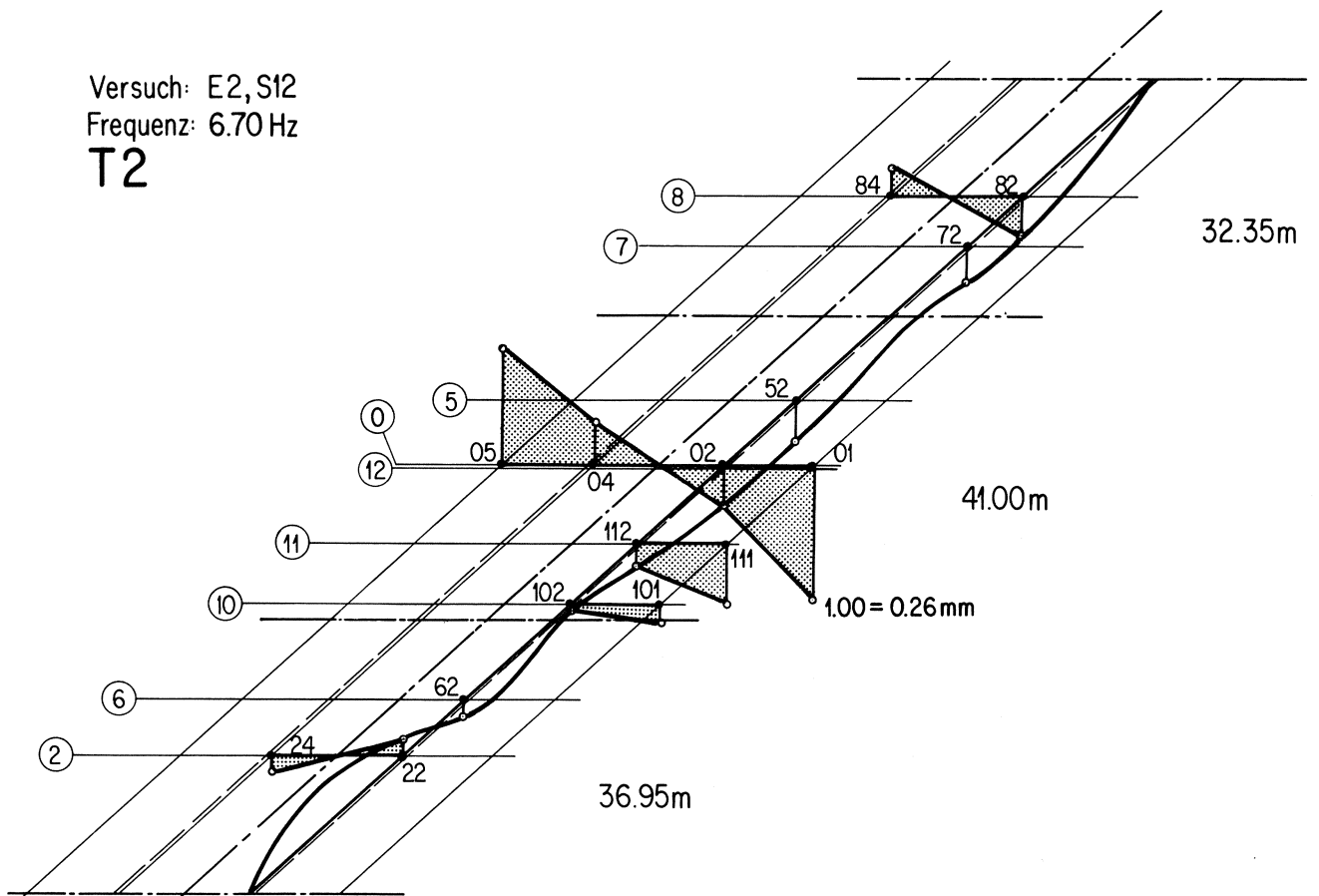


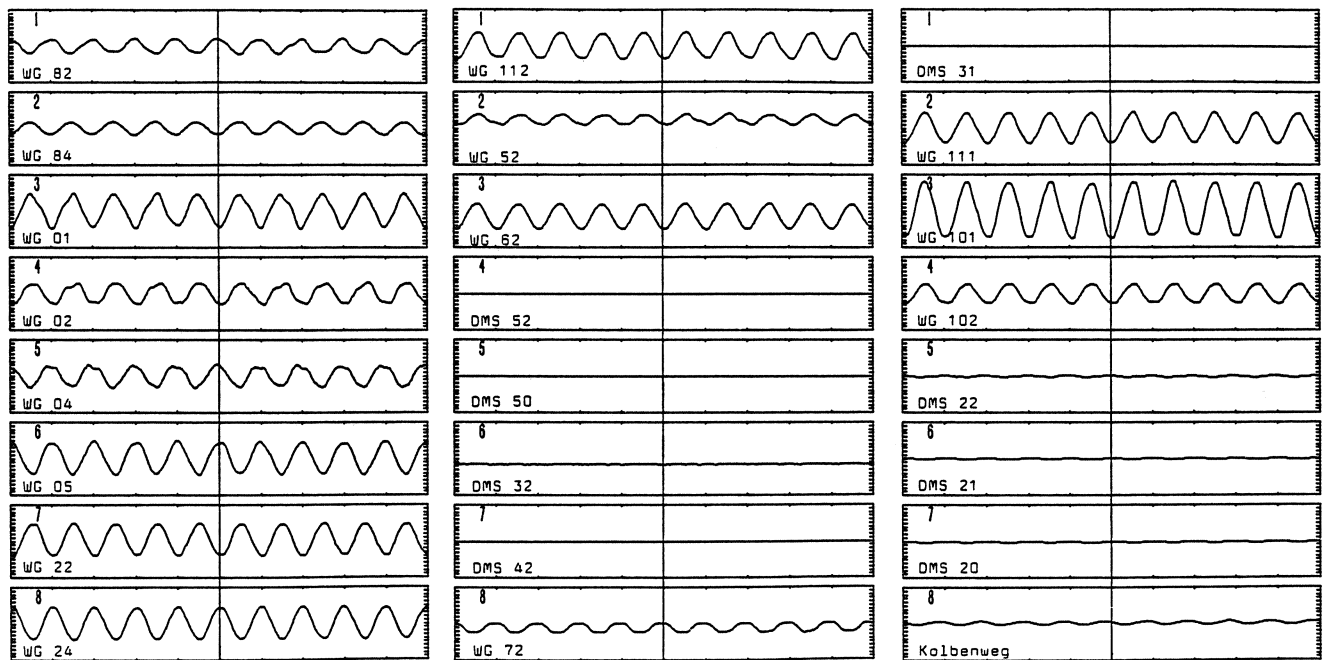
A1.64
A1.65



Skalierung horizontal: 0.135 s/div

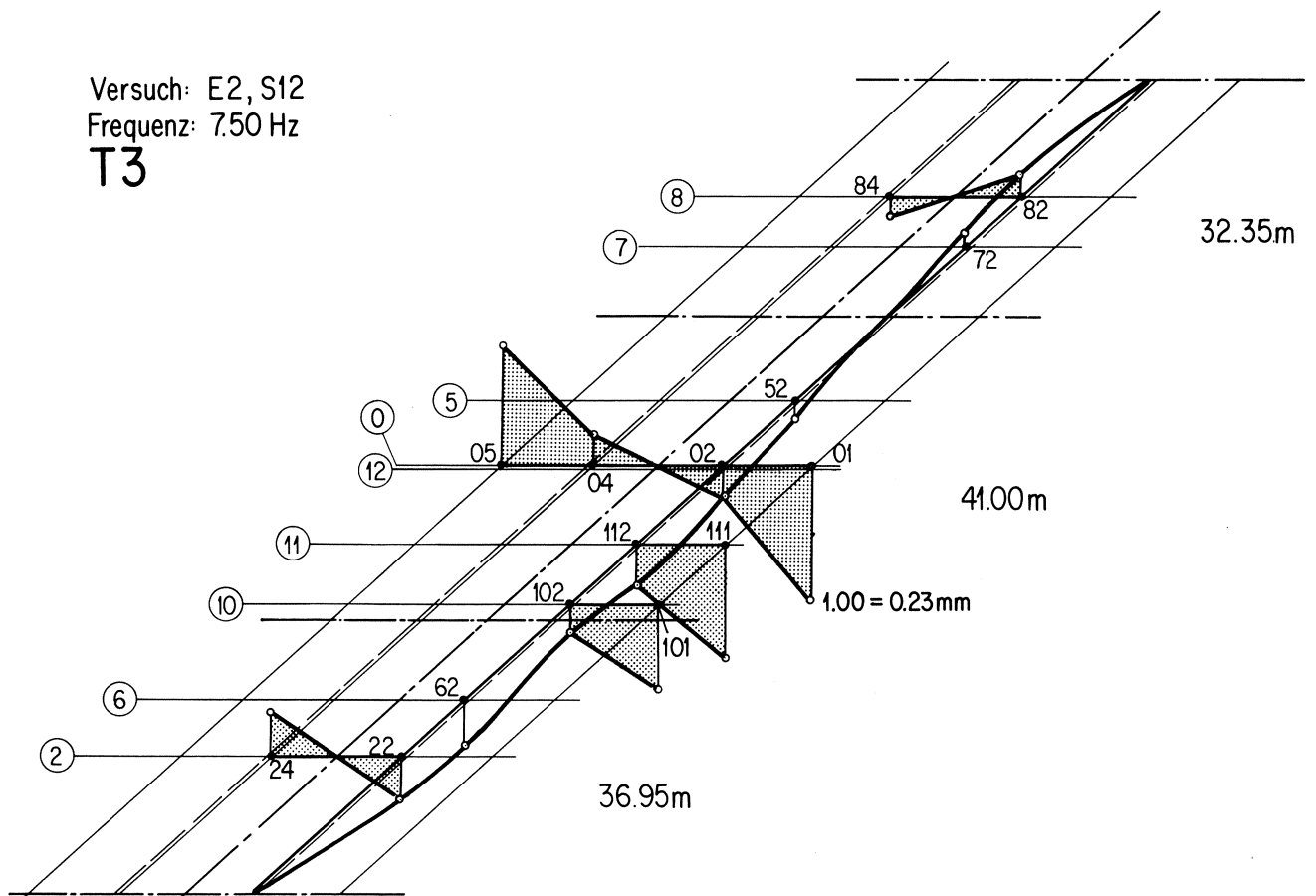
Versuch: E2, S12
Frequenz: 6.70 Hz
T2

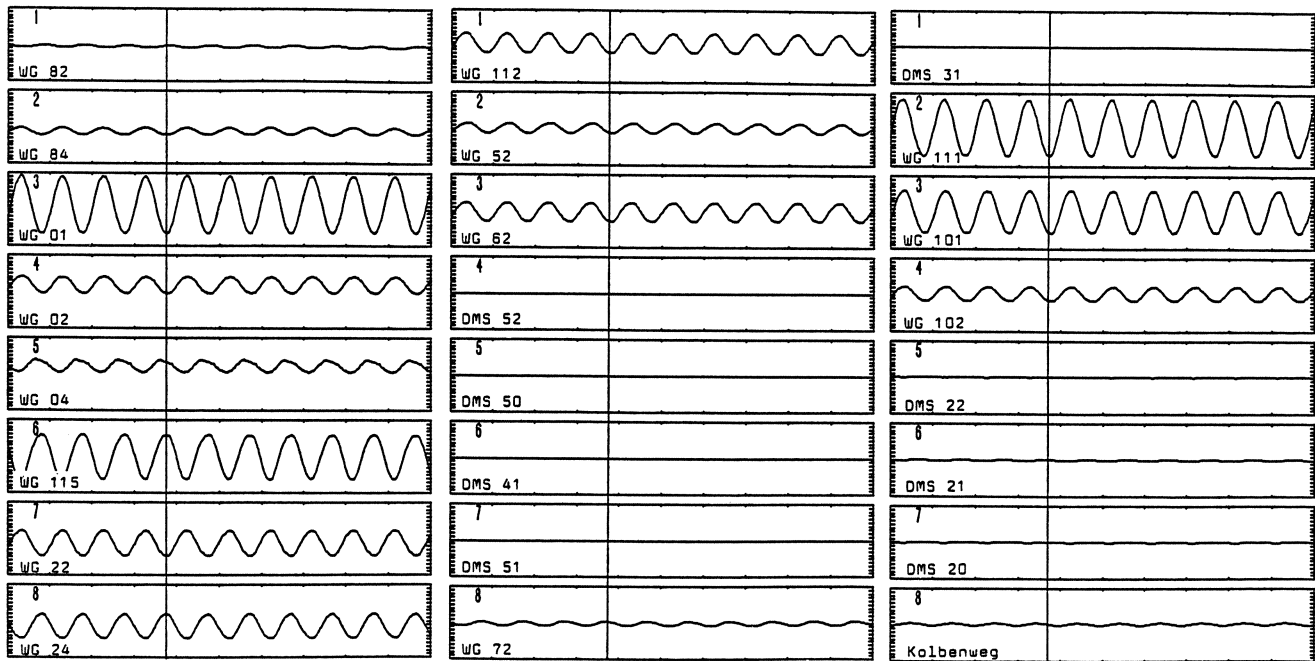




Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E2, S12
Frequenz: 7.50 Hz
T3

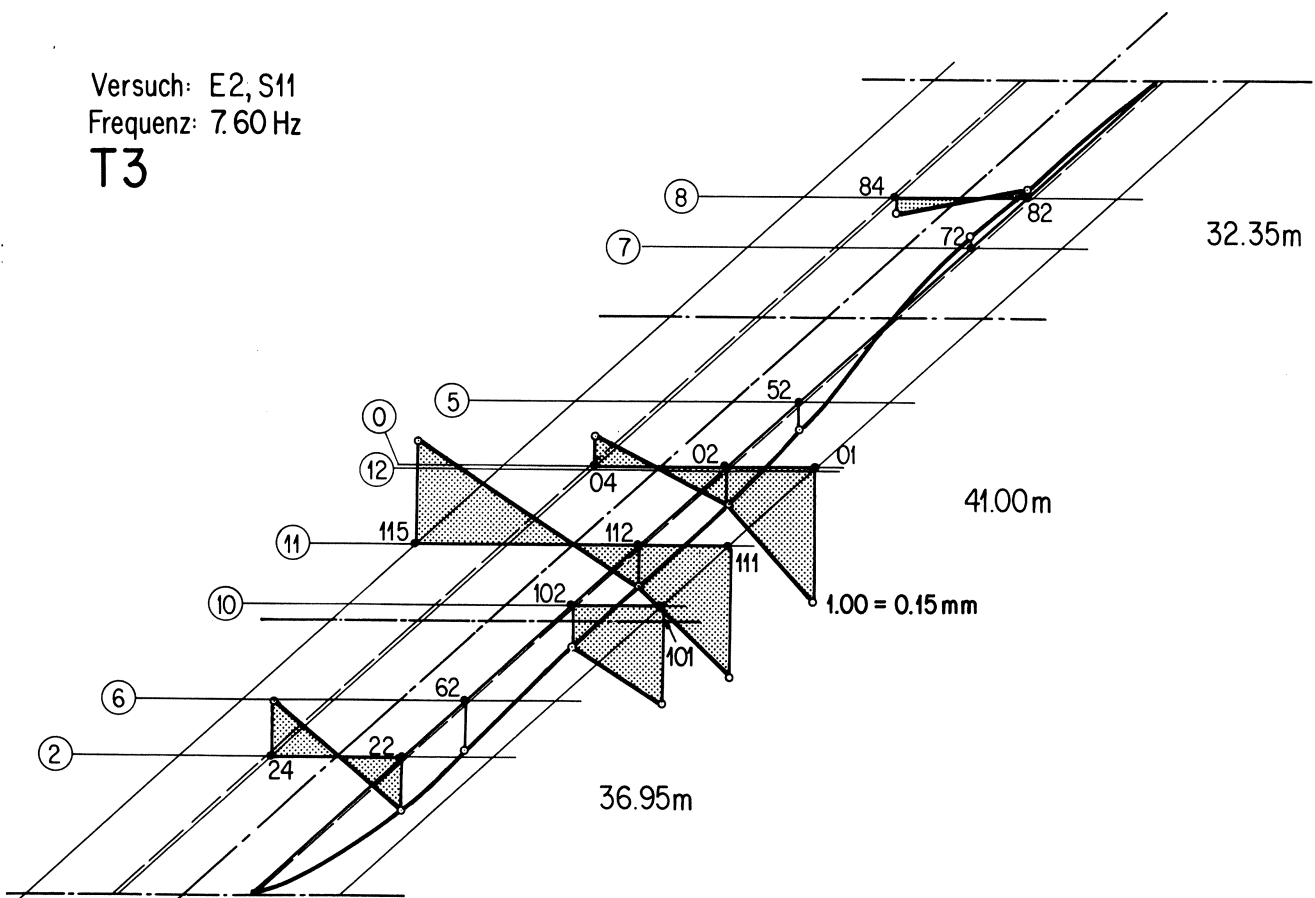




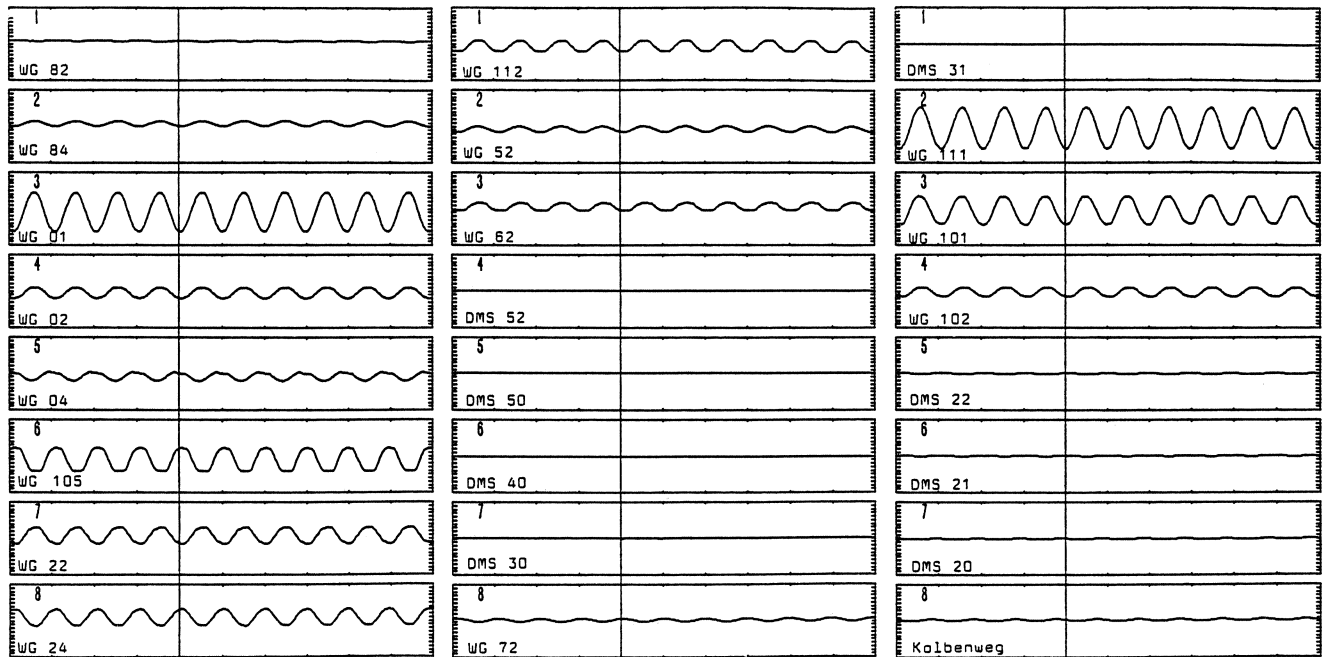
Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E2, S11
Frequenz: 7.60 Hz

T3



A1.72
A1.73

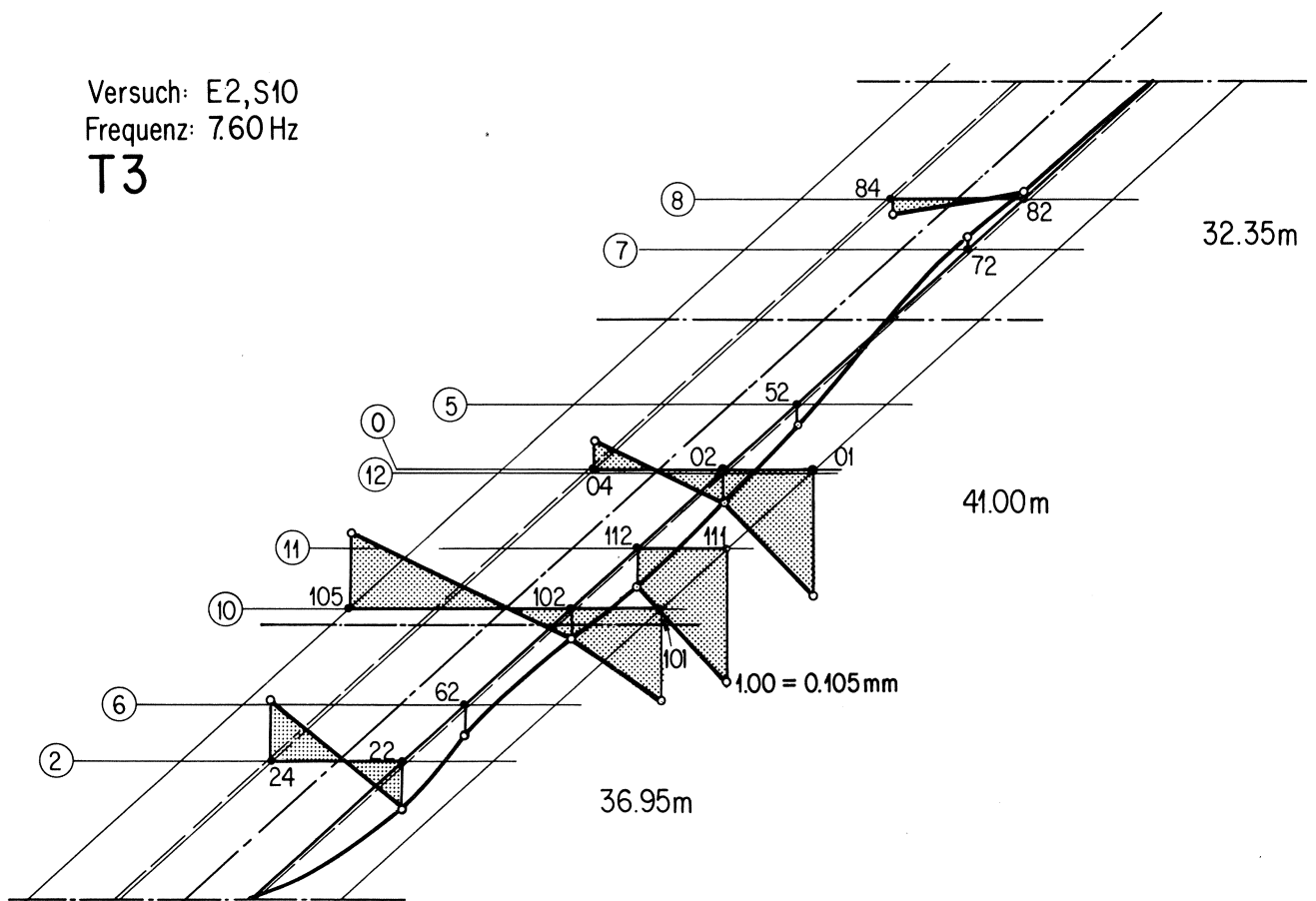


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E2,S10

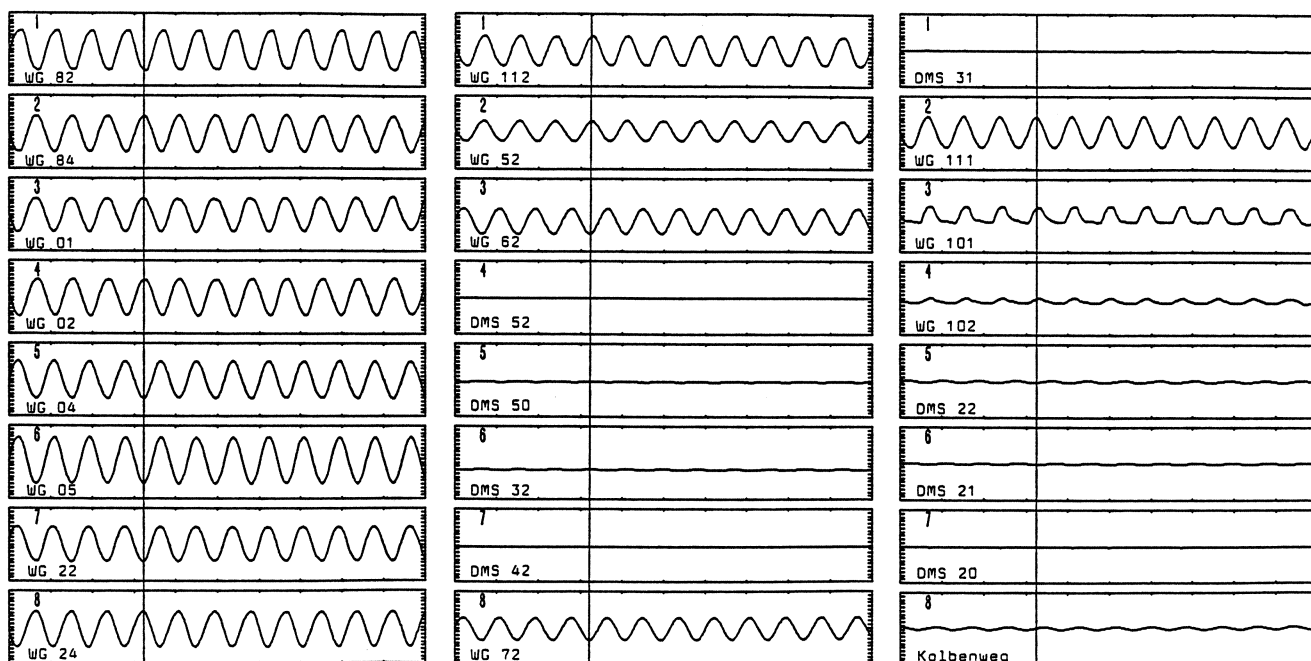
Frequenz: 7.60 Hz

T3



A1.74

A1.75

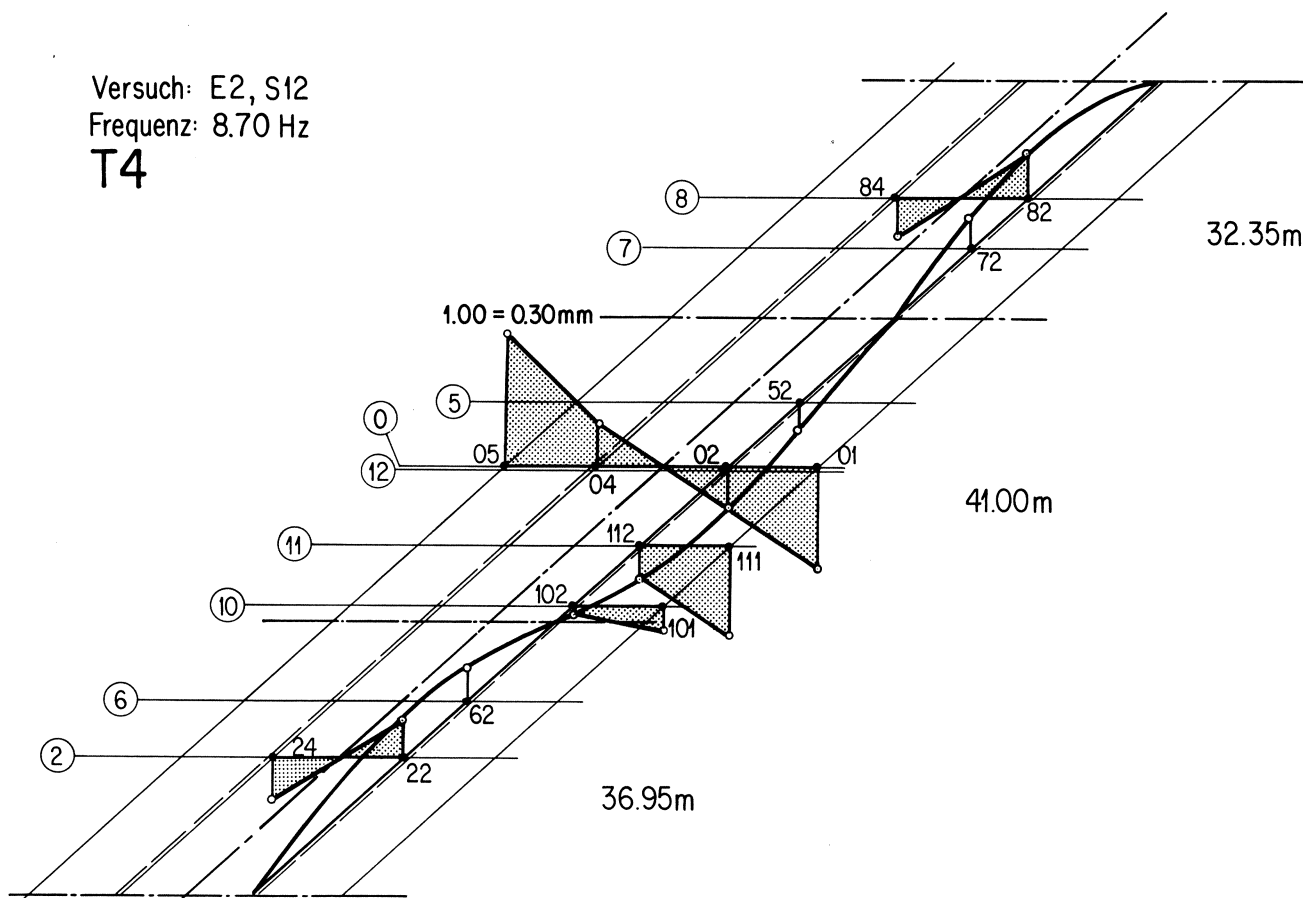


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E2, S12

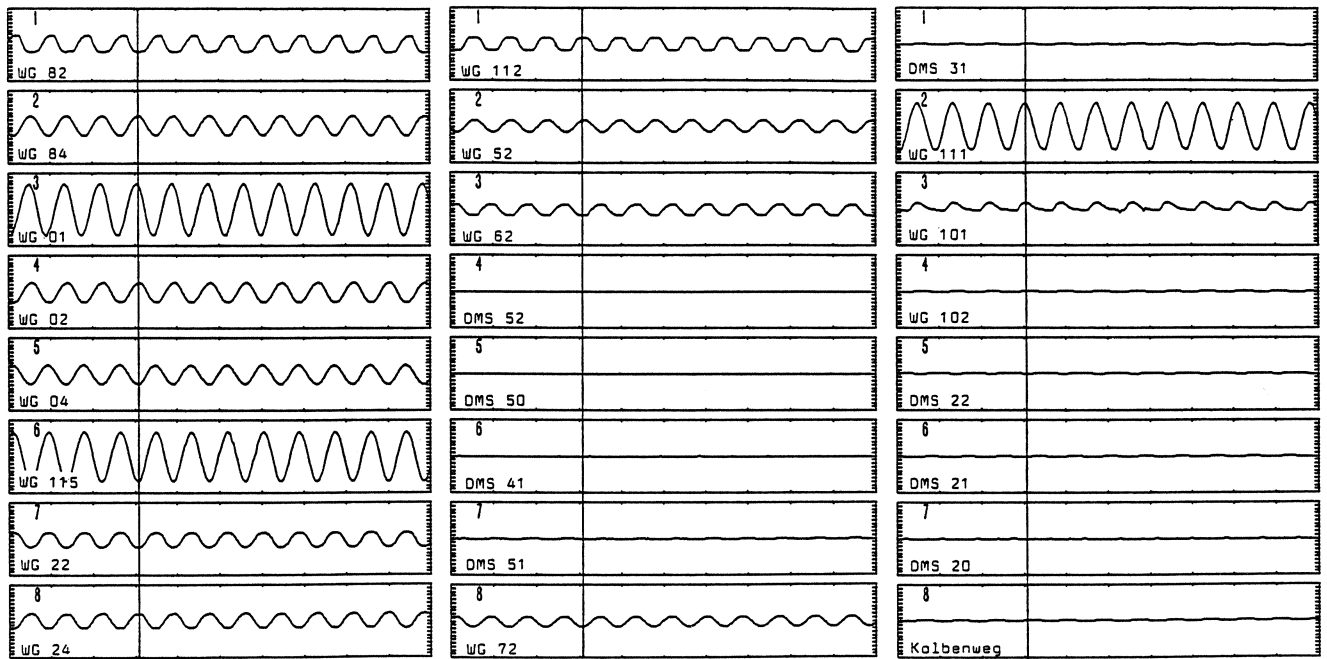
Frequenz: 8.70 Hz

T4



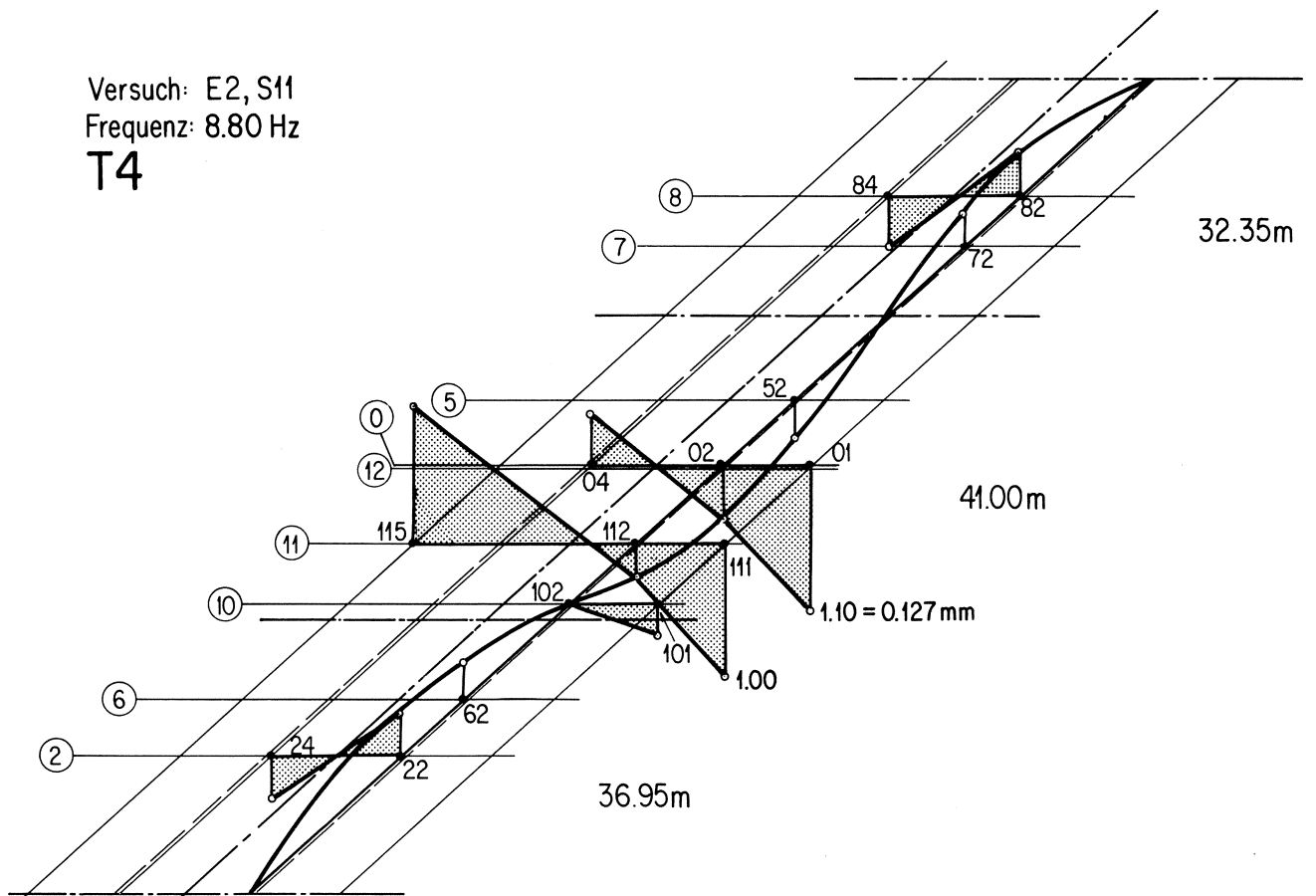
A1.76

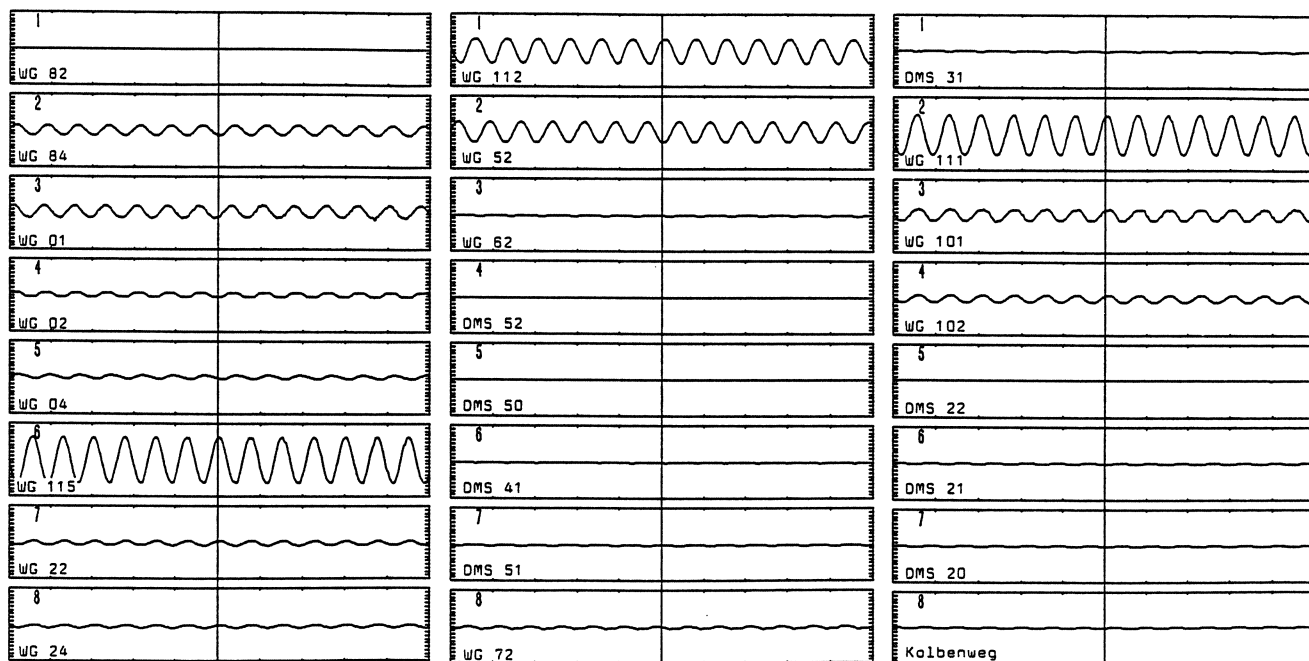
A1.77



Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E2, S11
Frequenz: 8.80 Hz
T4

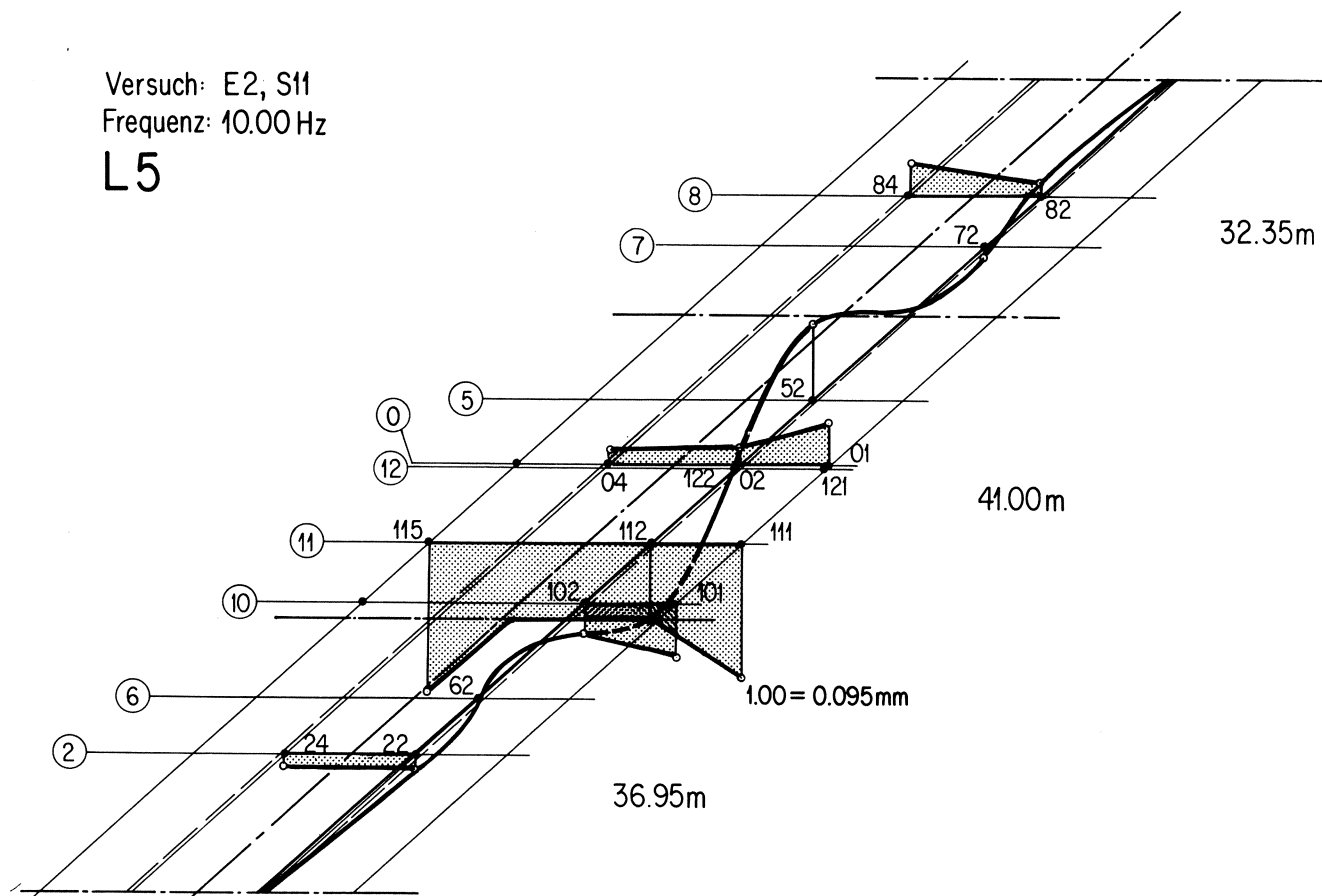


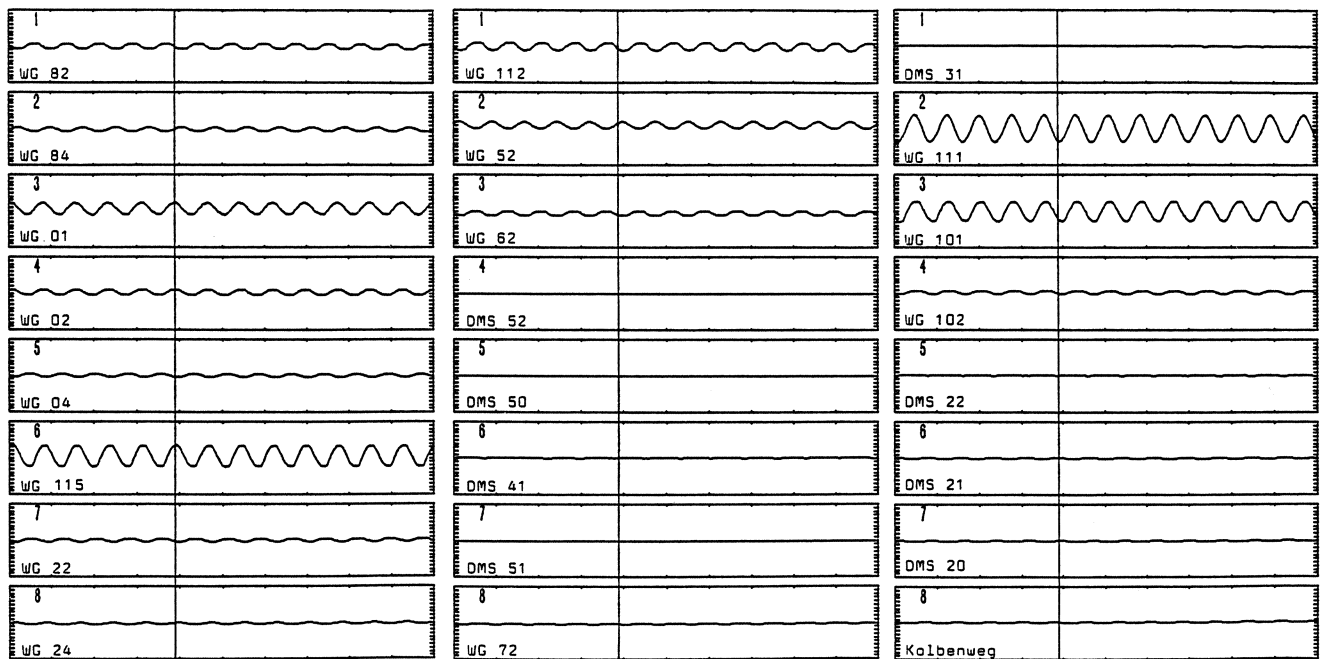


Skalierung horizontal: 0.135 s/div

Versuch: E2, S11
Frequenz: 10.00 Hz

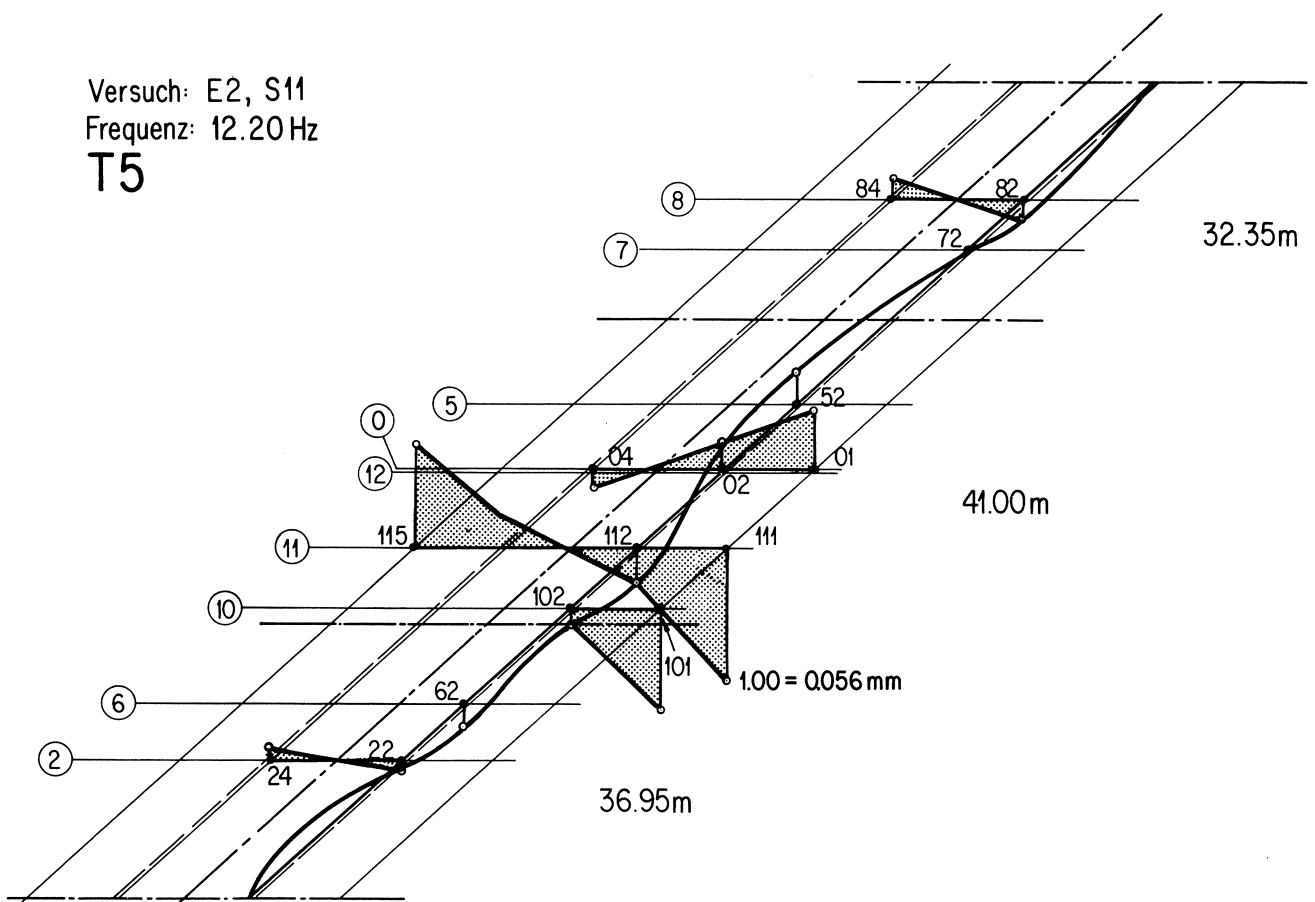
L5

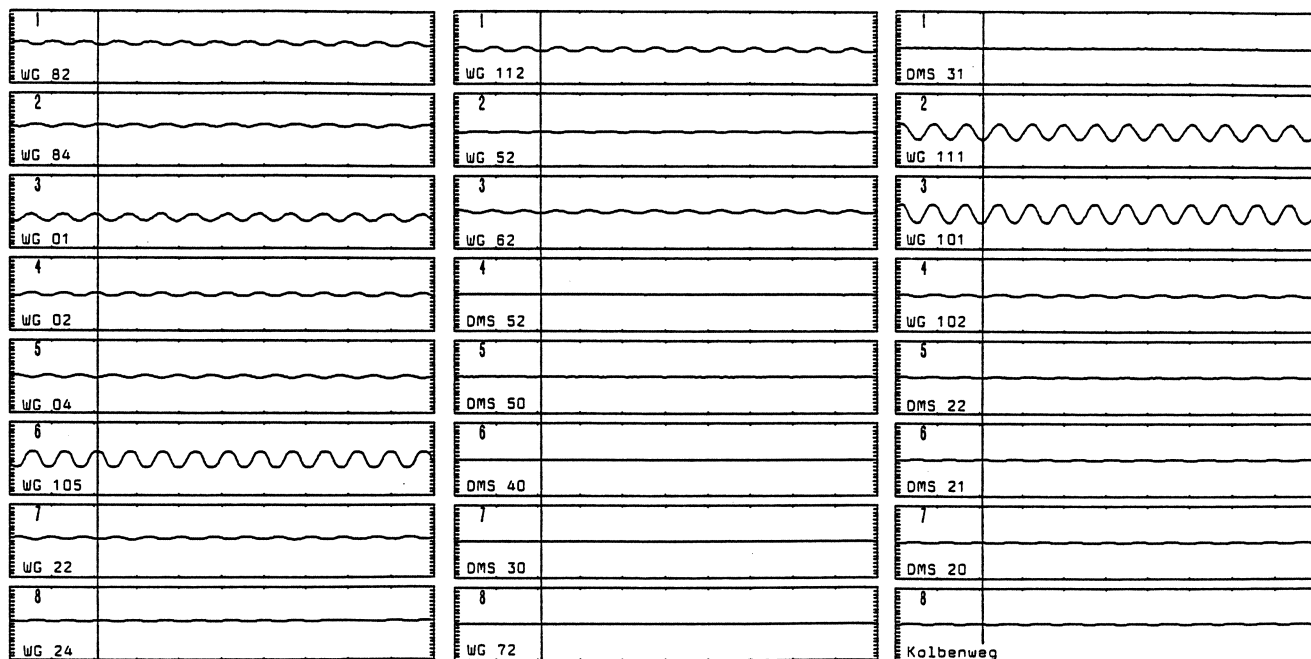




Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S11
Frequenz: 12.20 Hz
T5



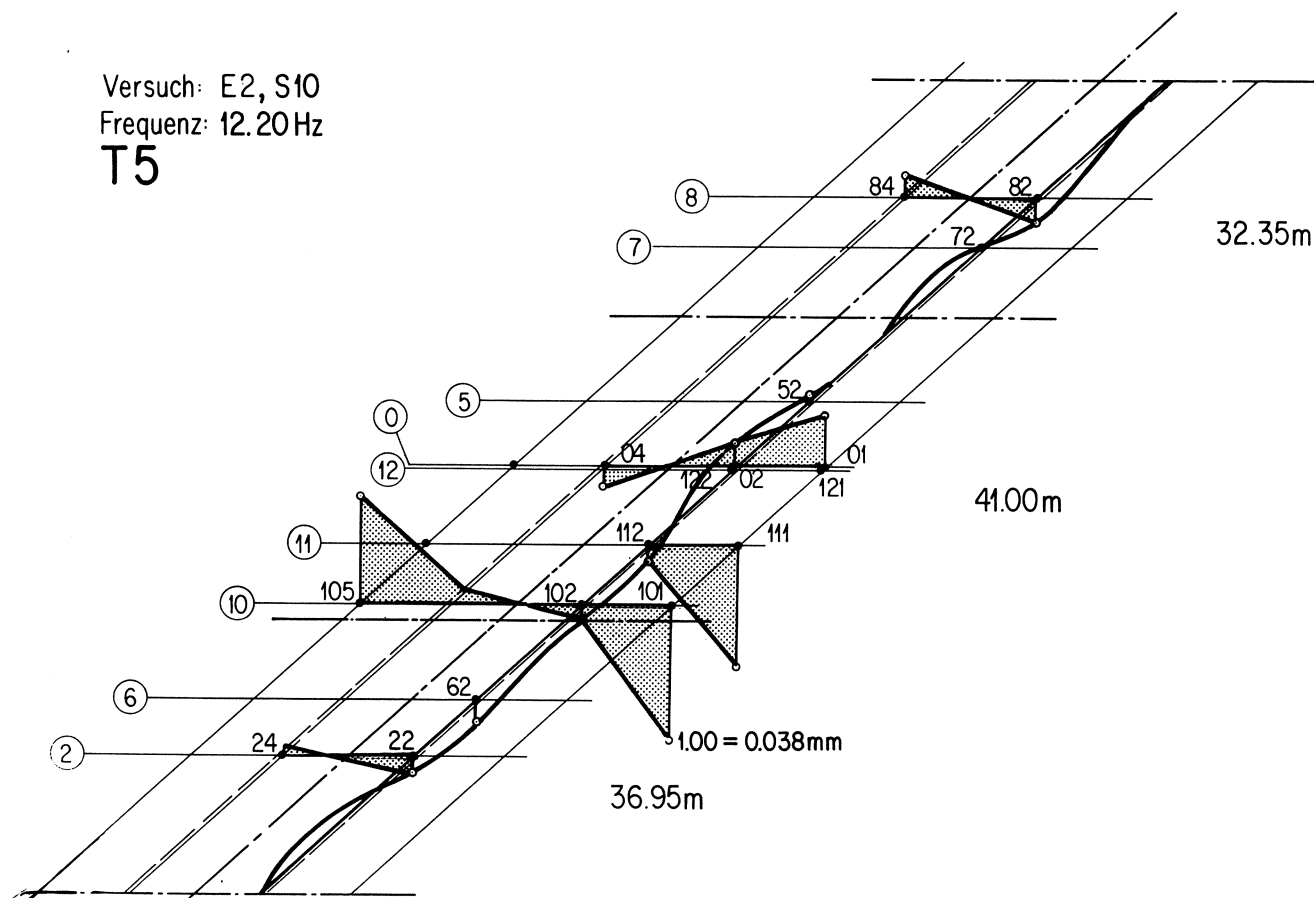


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S10

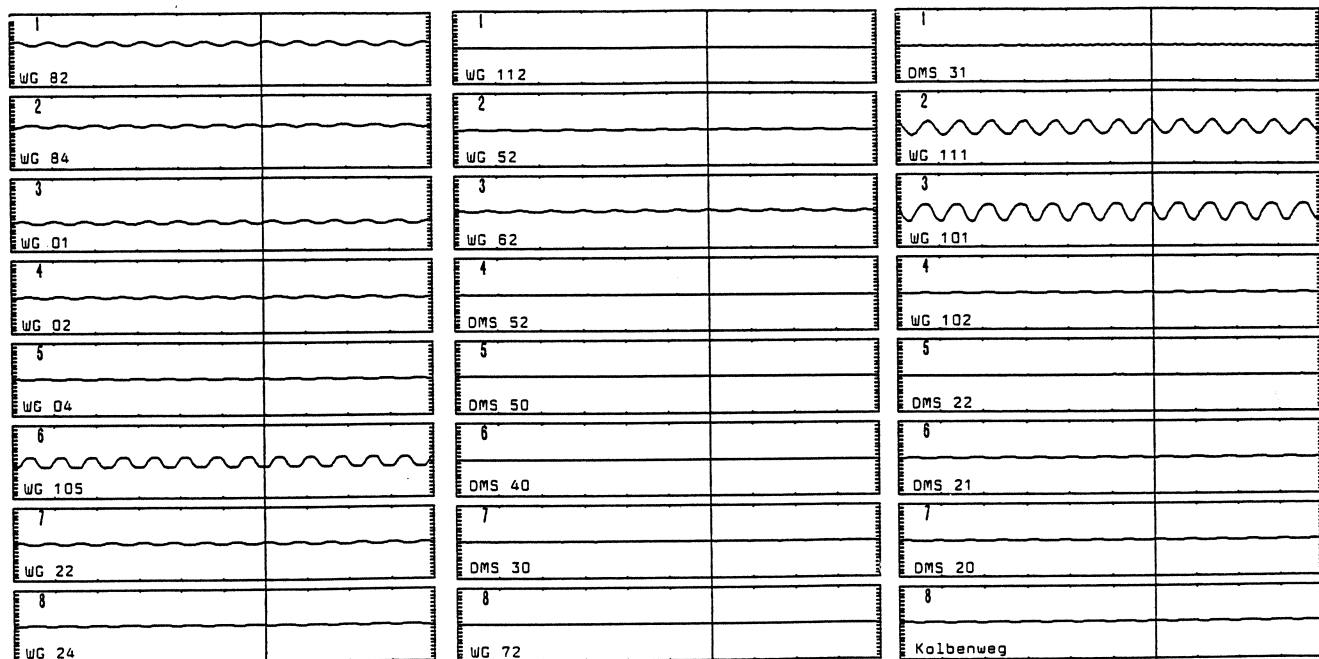
Frequenz: 12.20Hz

T5



A1.84

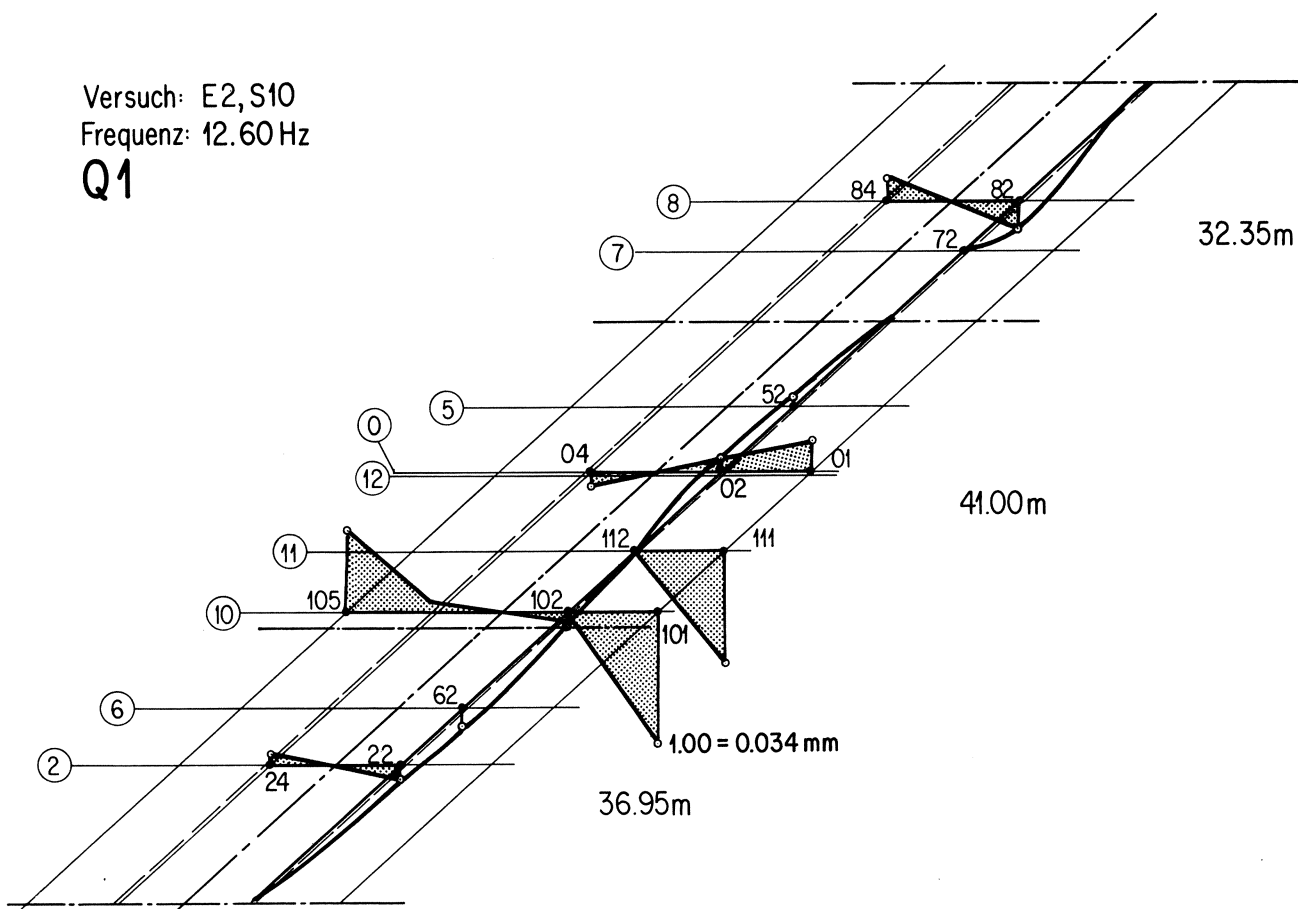
A1.85

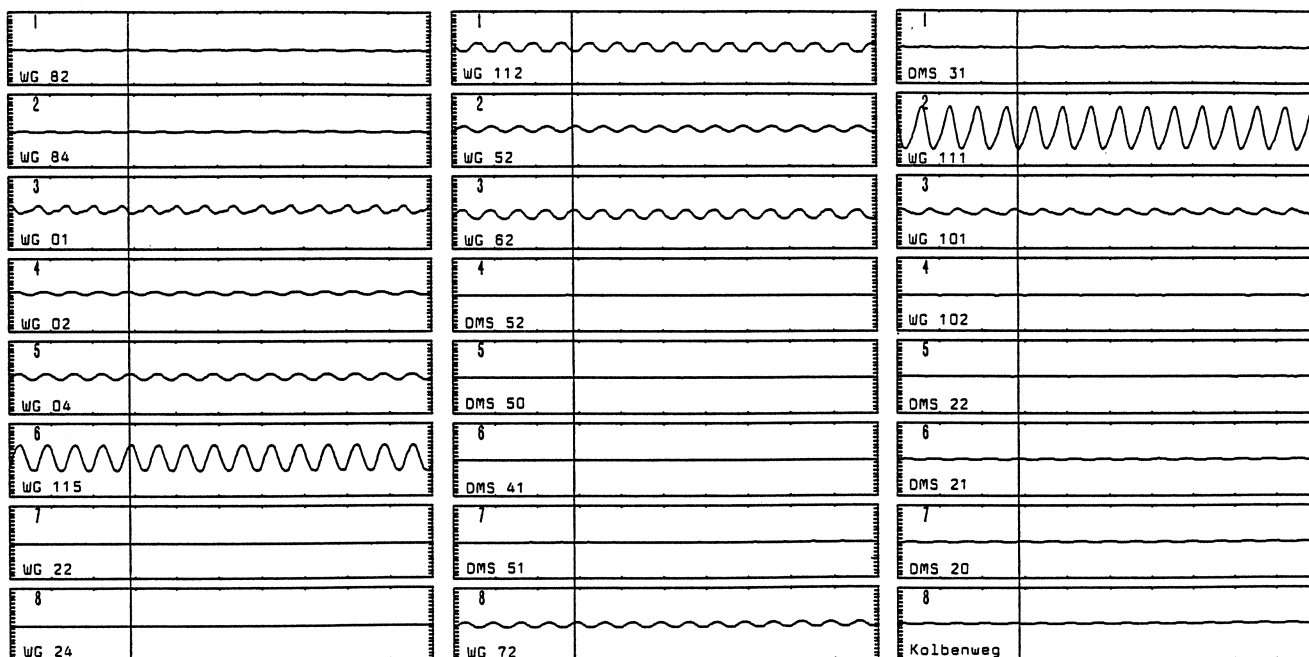


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S10
Frequenz: 12.60 Hz

Q1



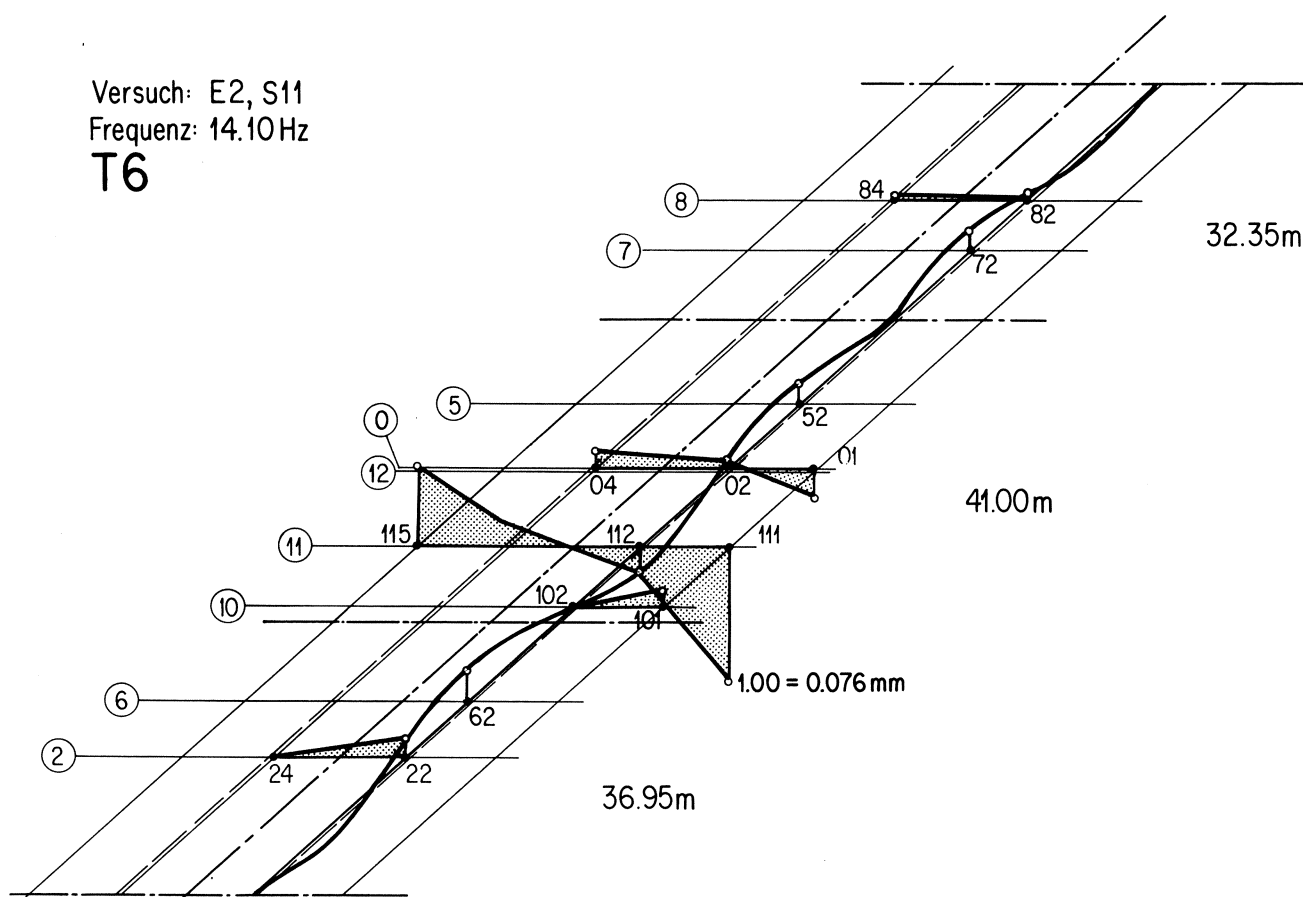


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S11

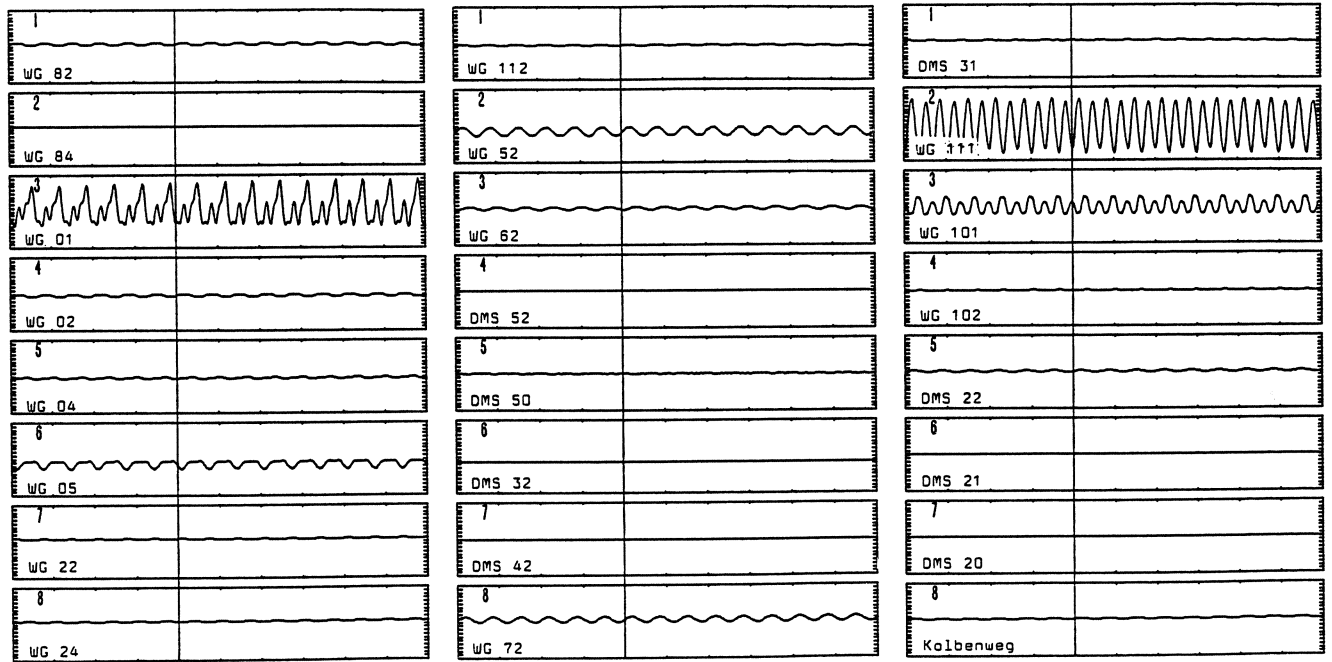
Frequenz: 14.10 Hz

T6

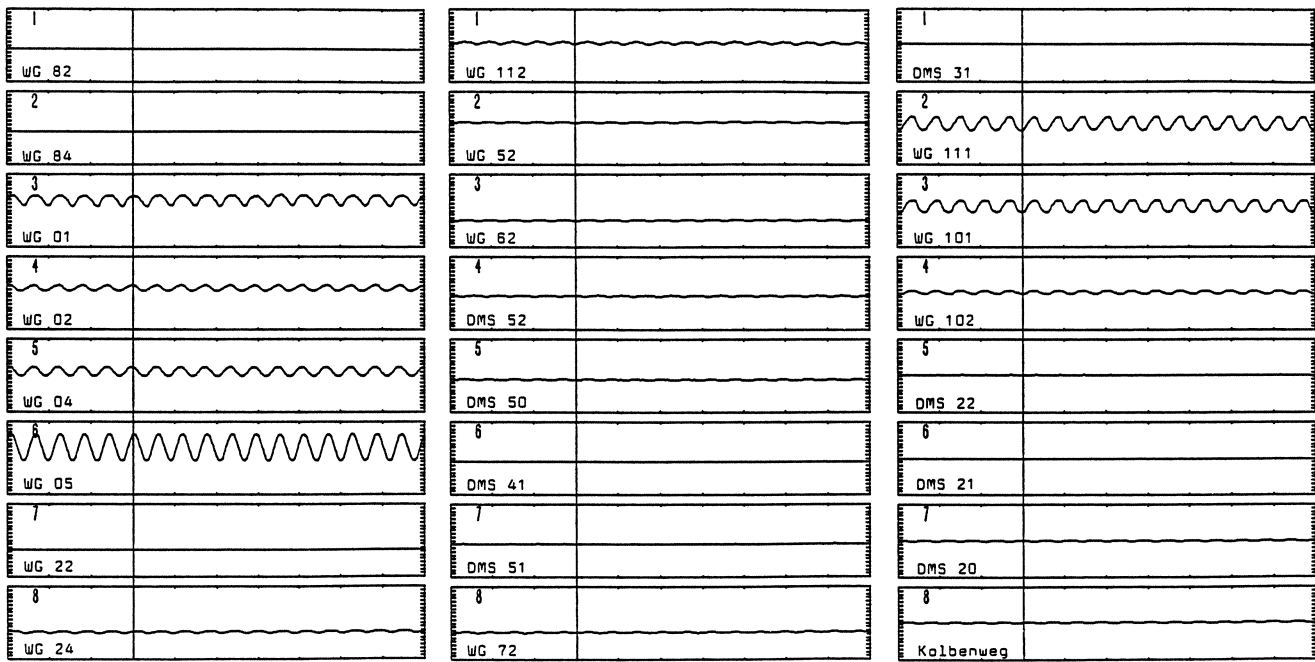


A1.88

A1.89



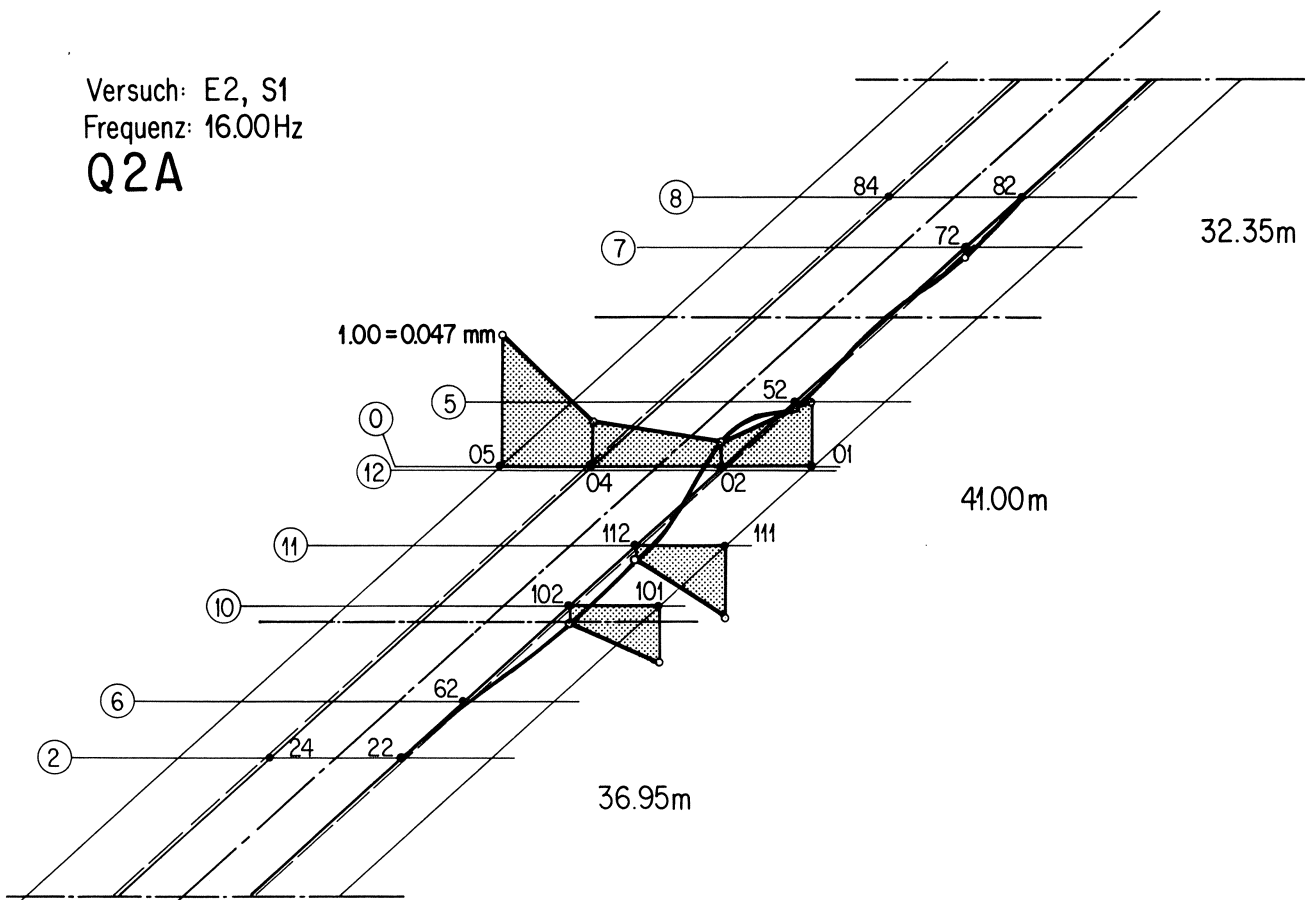
Versuch: E2, S12, $f = 14.10 \text{ Hz}$, Skalierung horizontal: 0.108 s/div

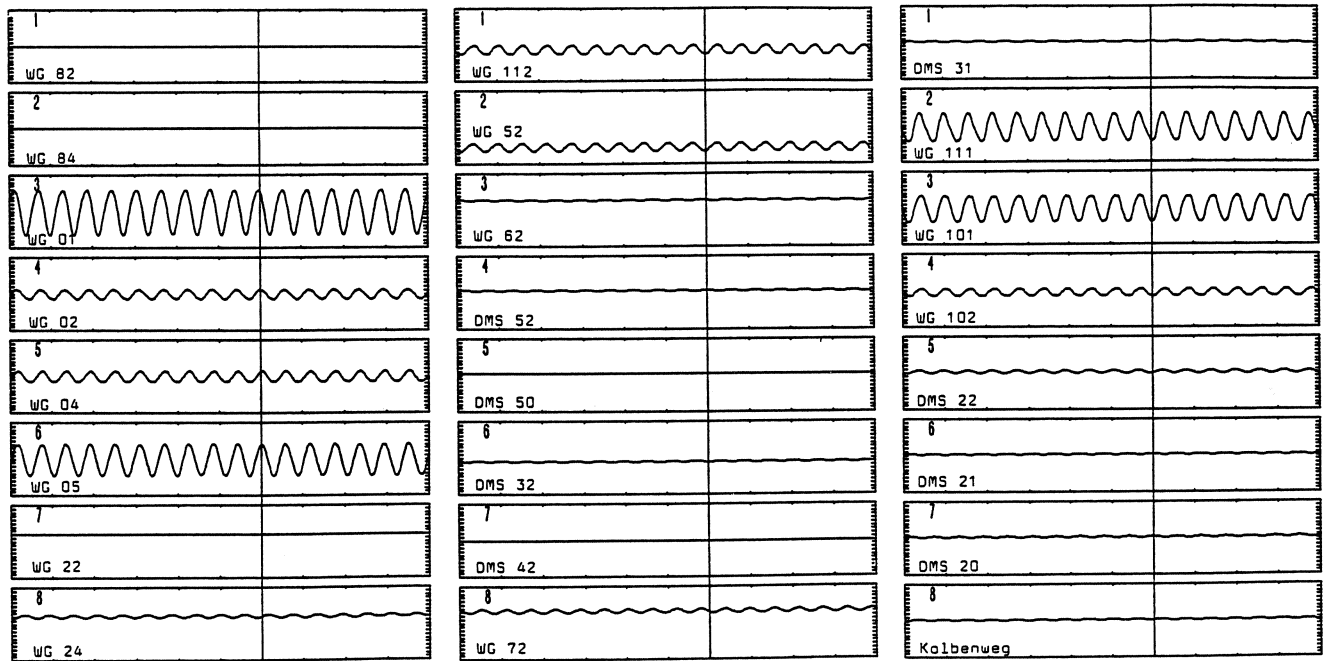


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S1
Frequenz: 16.00Hz

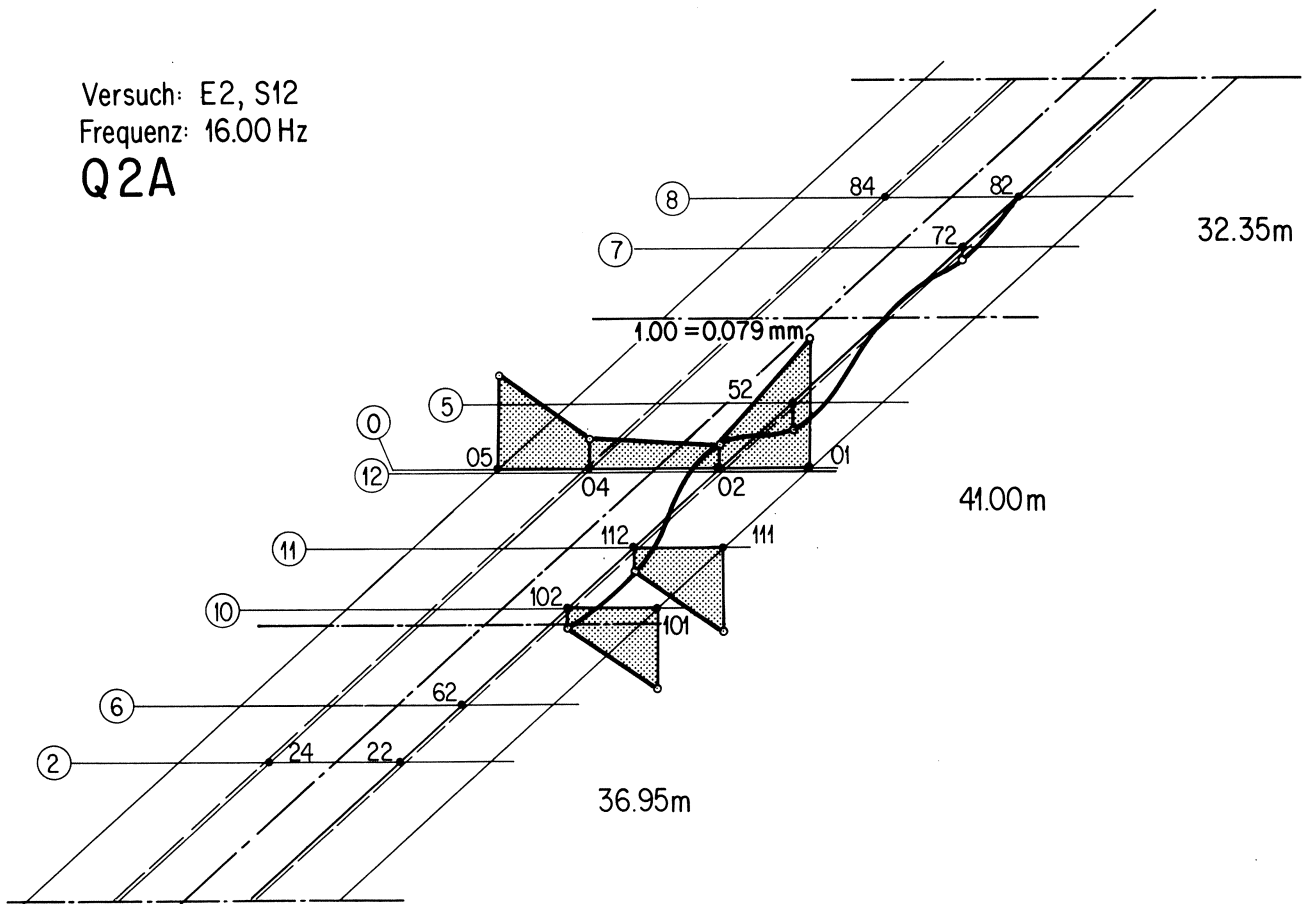
Q2A

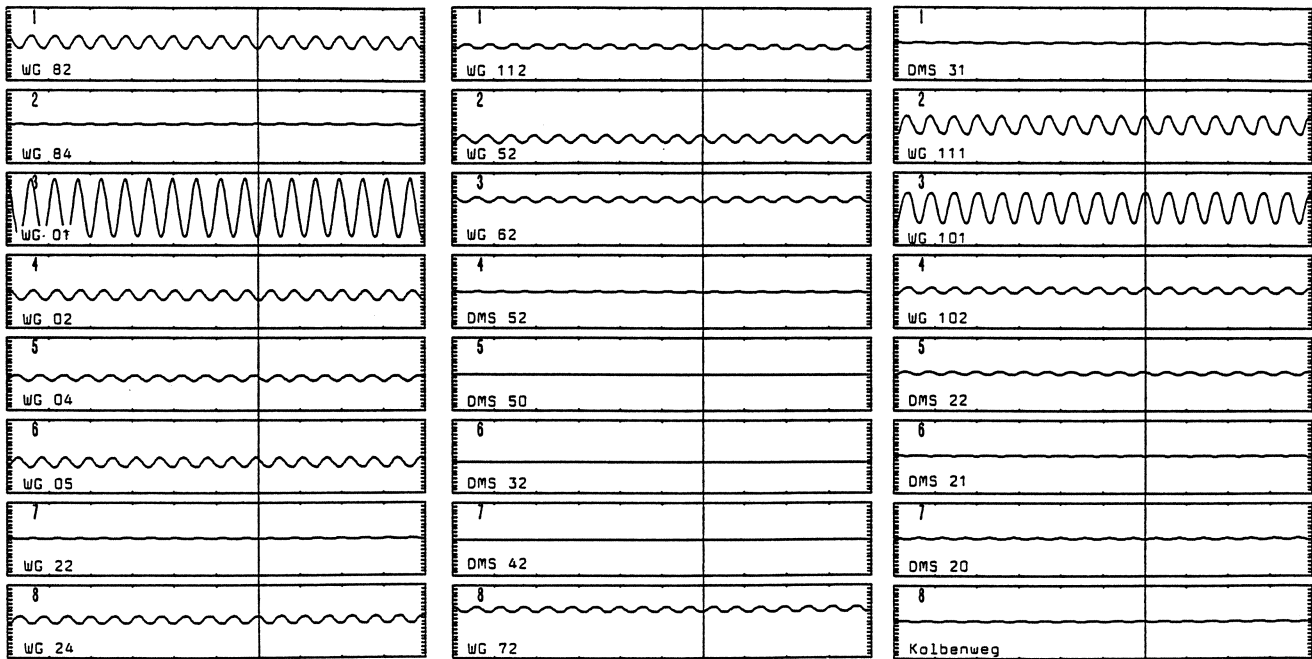




Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S12
Frequenz: 16.00 Hz
Q2A



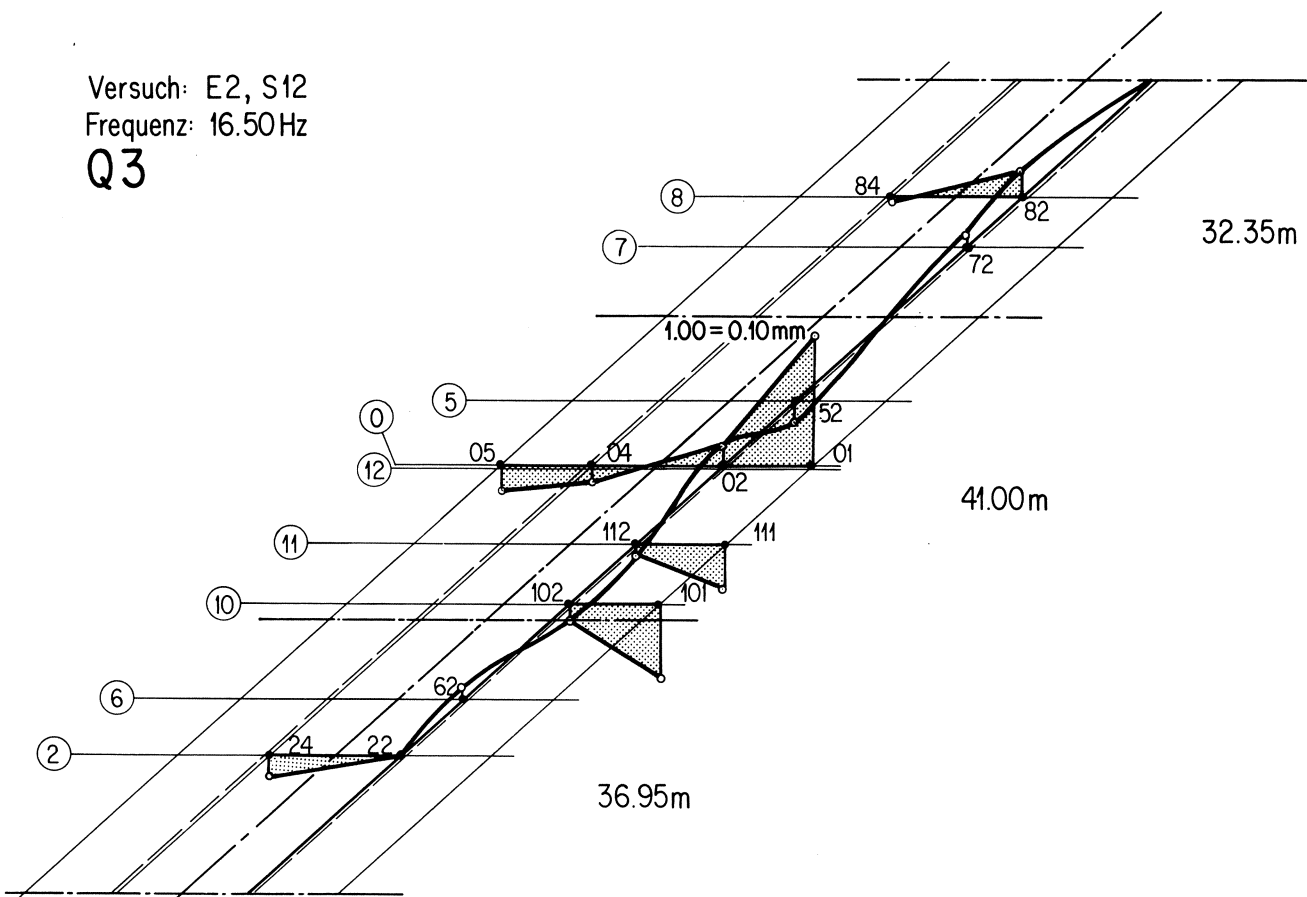


Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2, S12

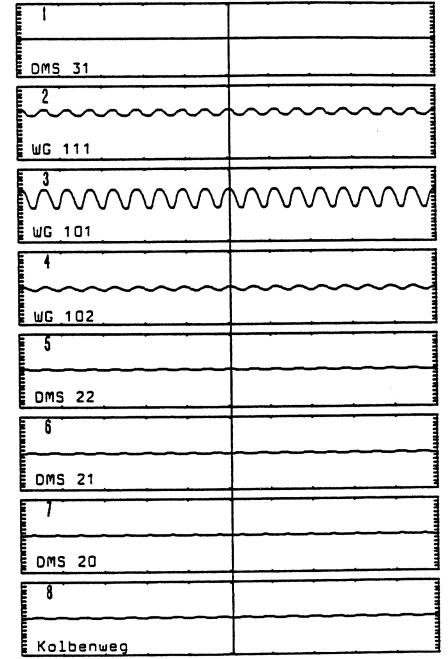
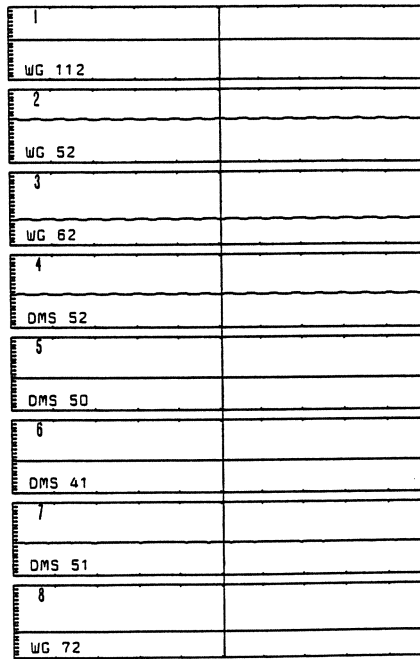
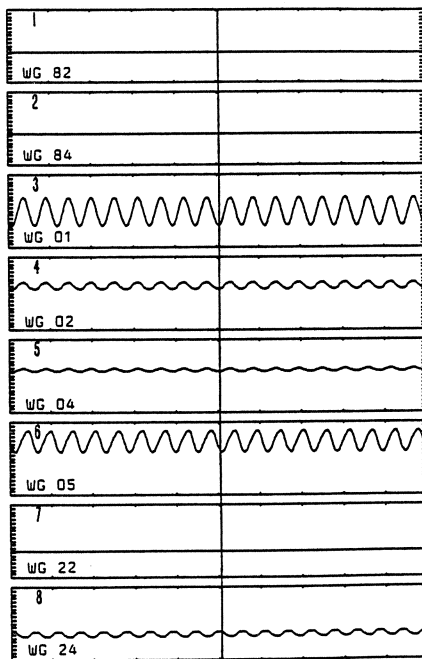
Frequenz: 16.50Hz

Q3



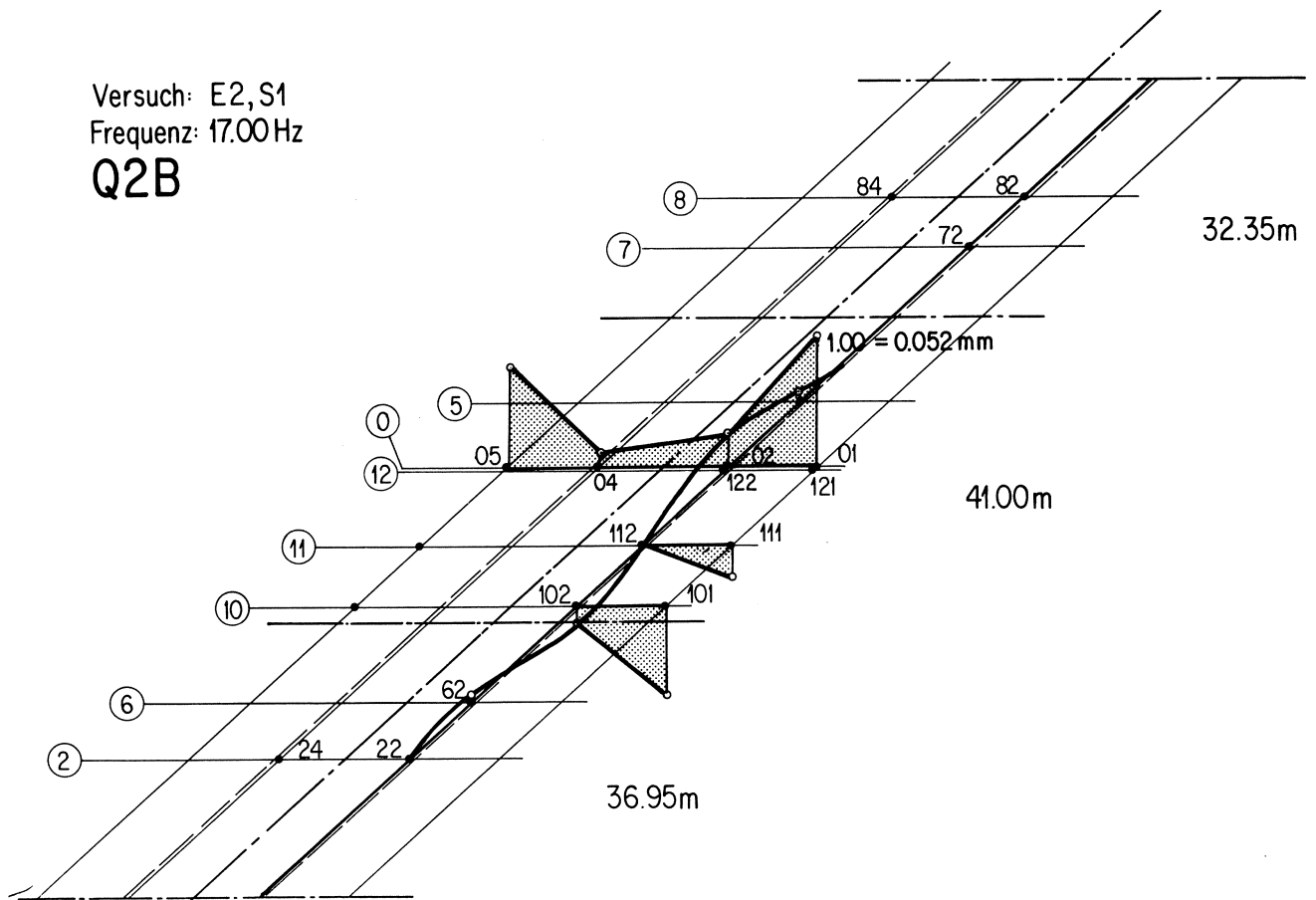
A1.95

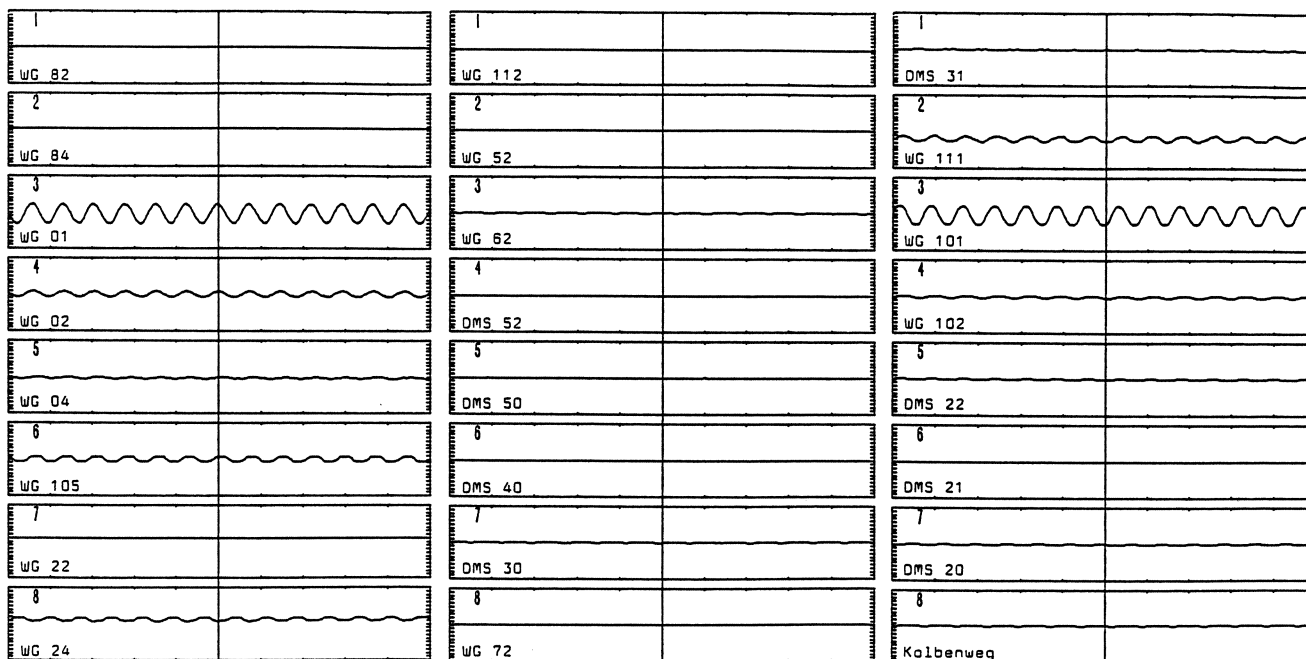
A1.96



Skalierung horizontal: 0.108 s/div

Versuch: E2,S1
Frequenz: 17.00Hz
Q2B



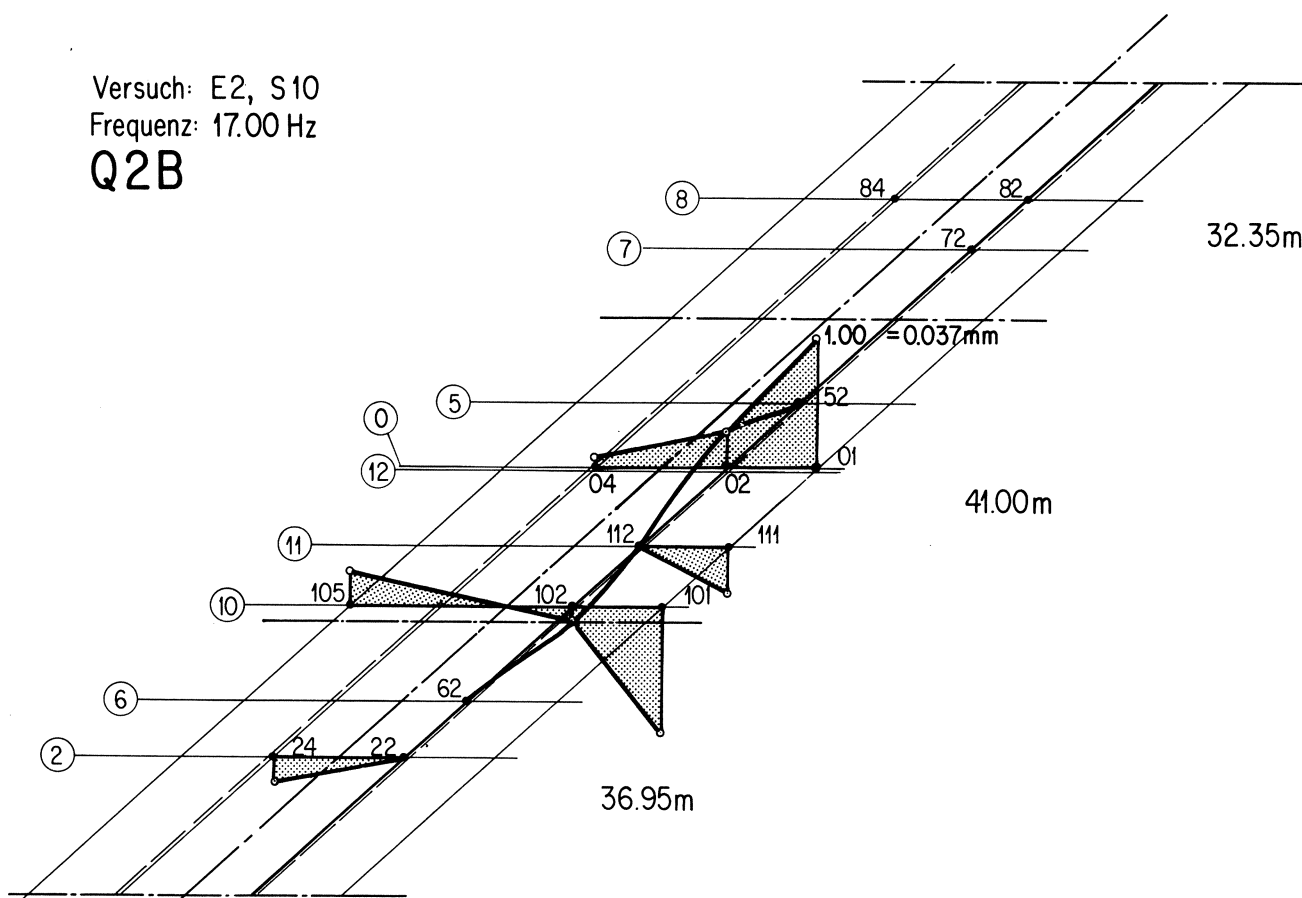


Skalierung horizontal: 0.081 s/div

Versuch: E2, S10

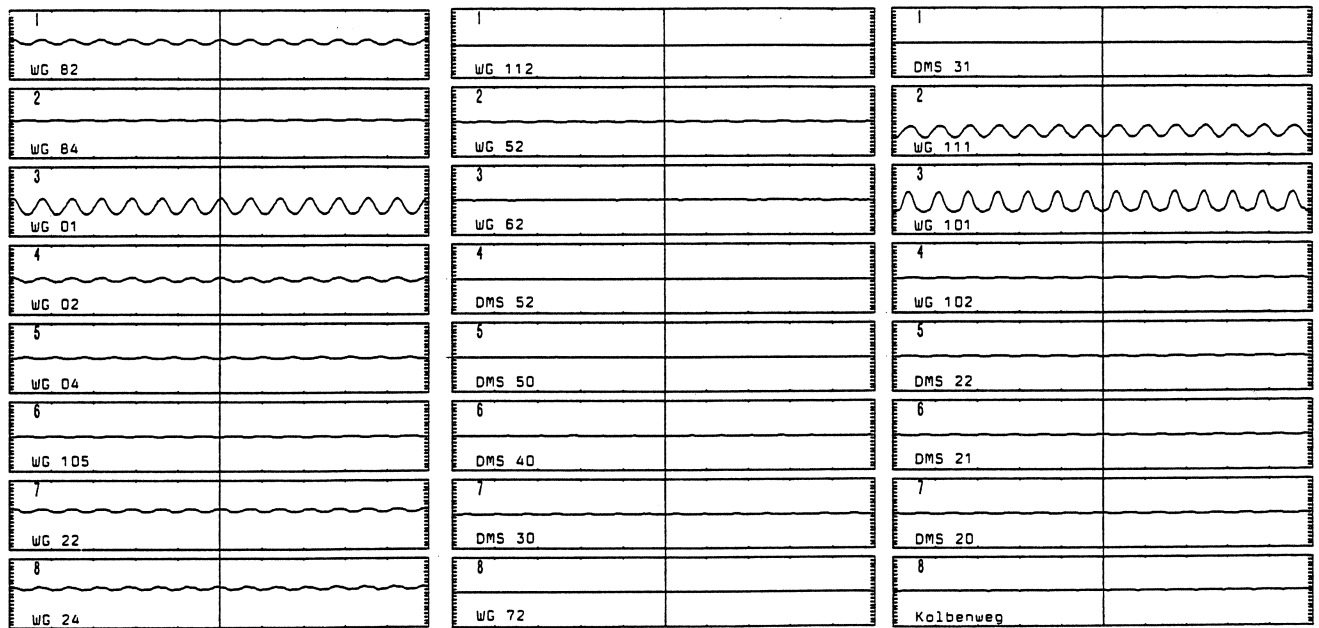
Frequenz: 17.00 Hz

Q2B



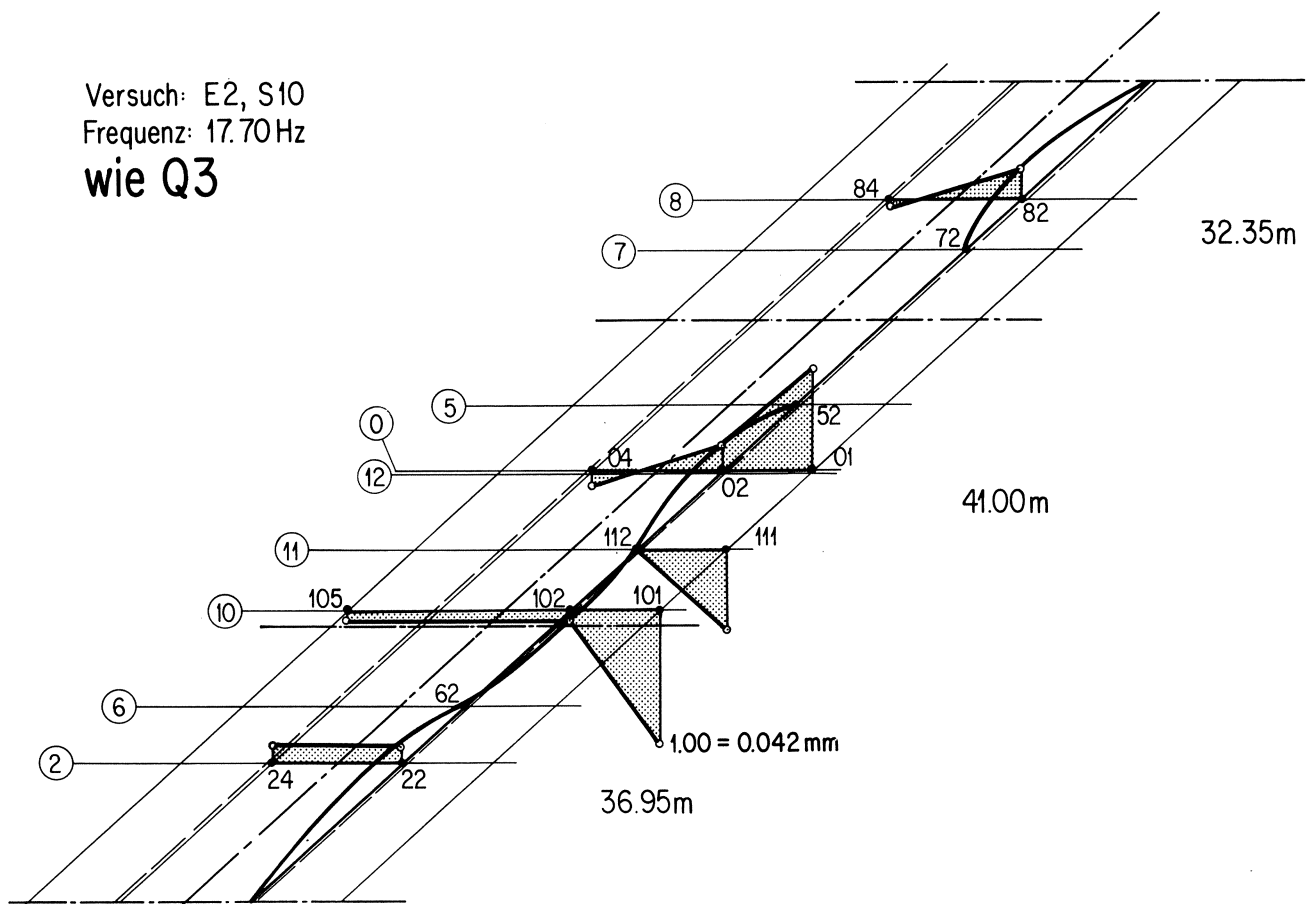
Al. 99

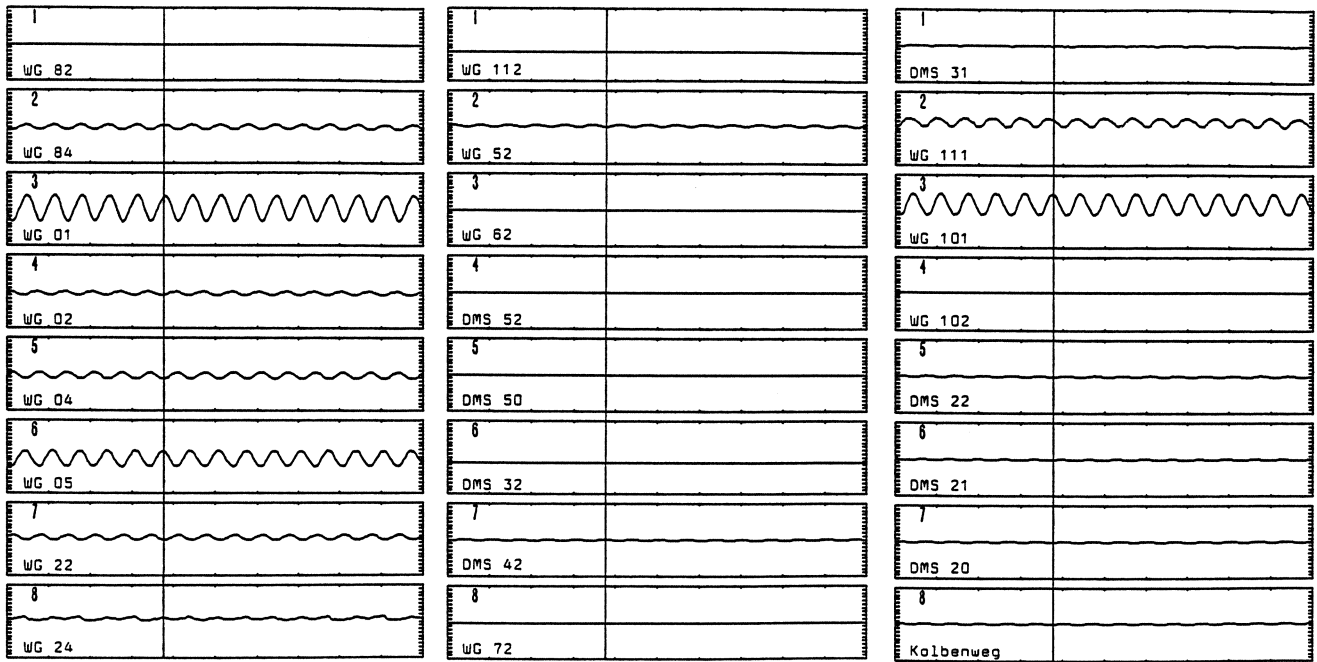
Al.100



Skalierung horizontal: 0.081 s/div

Versuch: E2, S10
Frequenz: 17.70 Hz
wie Q3

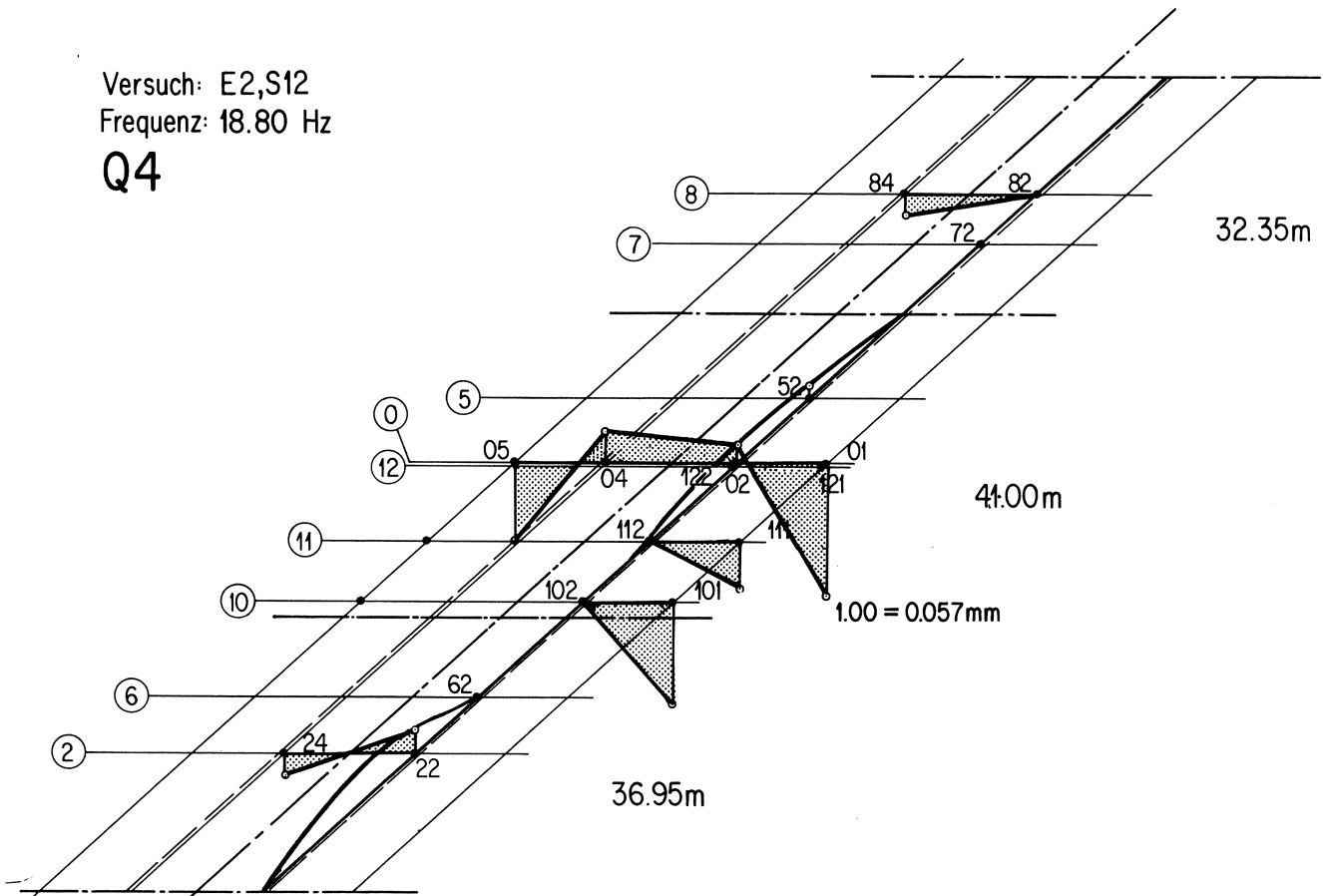




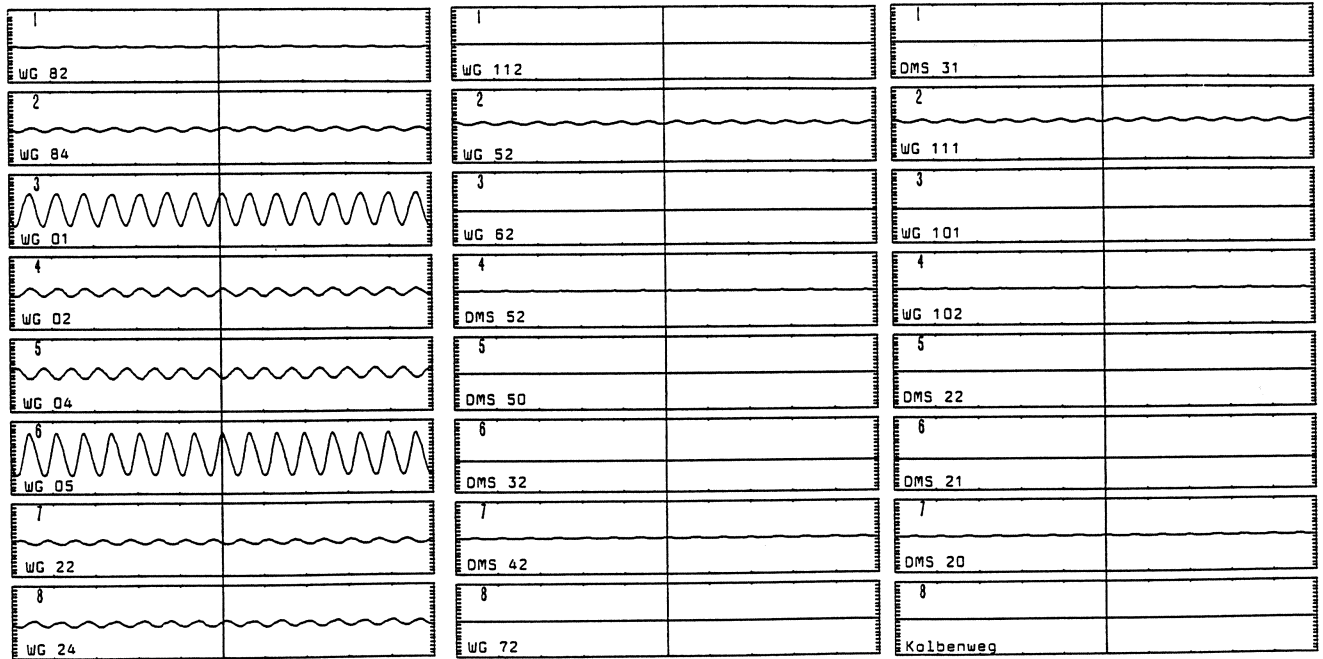
Skalierung horizontal: 0.081 s/div

Versuch: E2,S12
Frequenz: 18.80 Hz

Q4



A1.103
A1.104

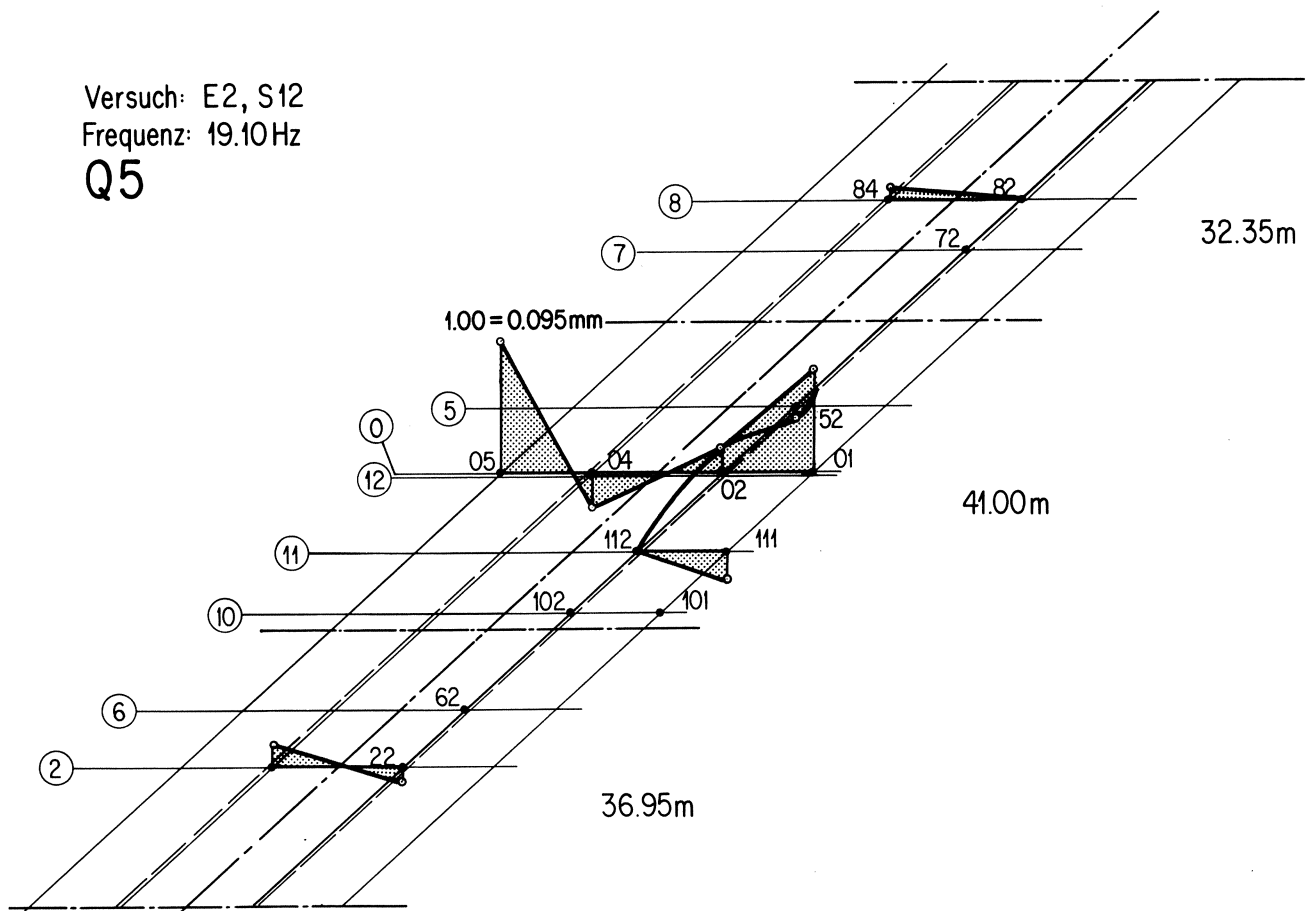


Skalierung horizontal: 0.081 s/div

Versuch: E2, S12

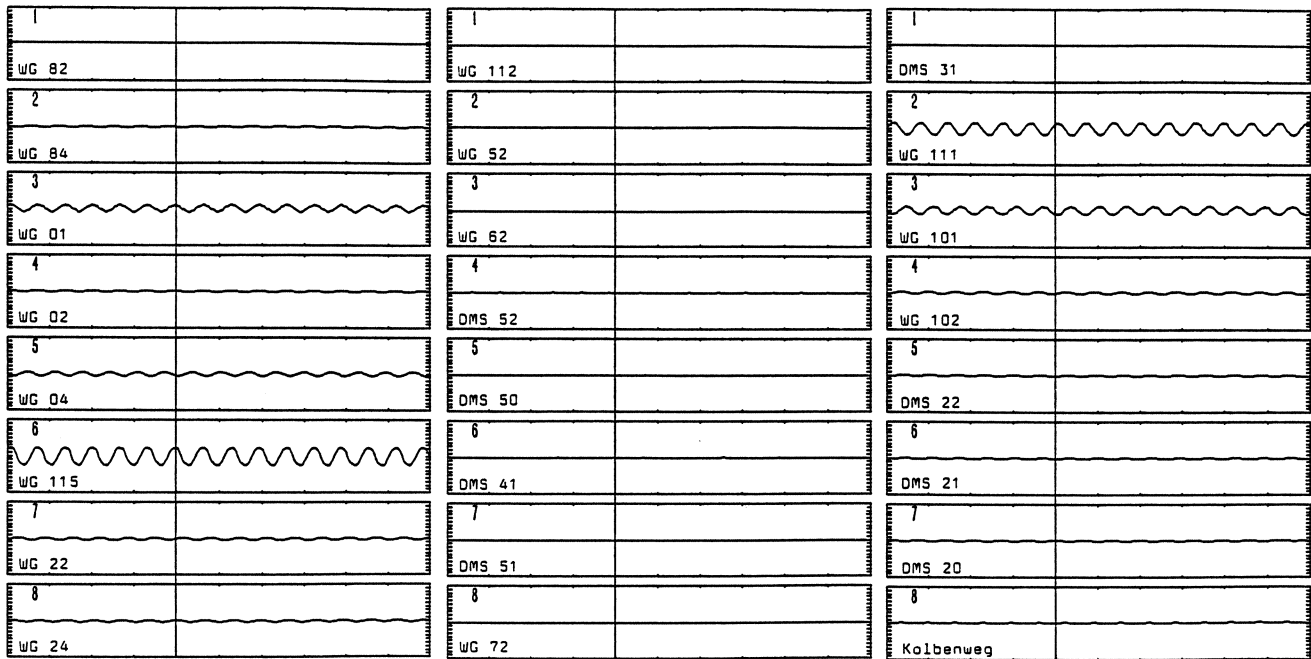
Frequenz: 19.10Hz

Q5



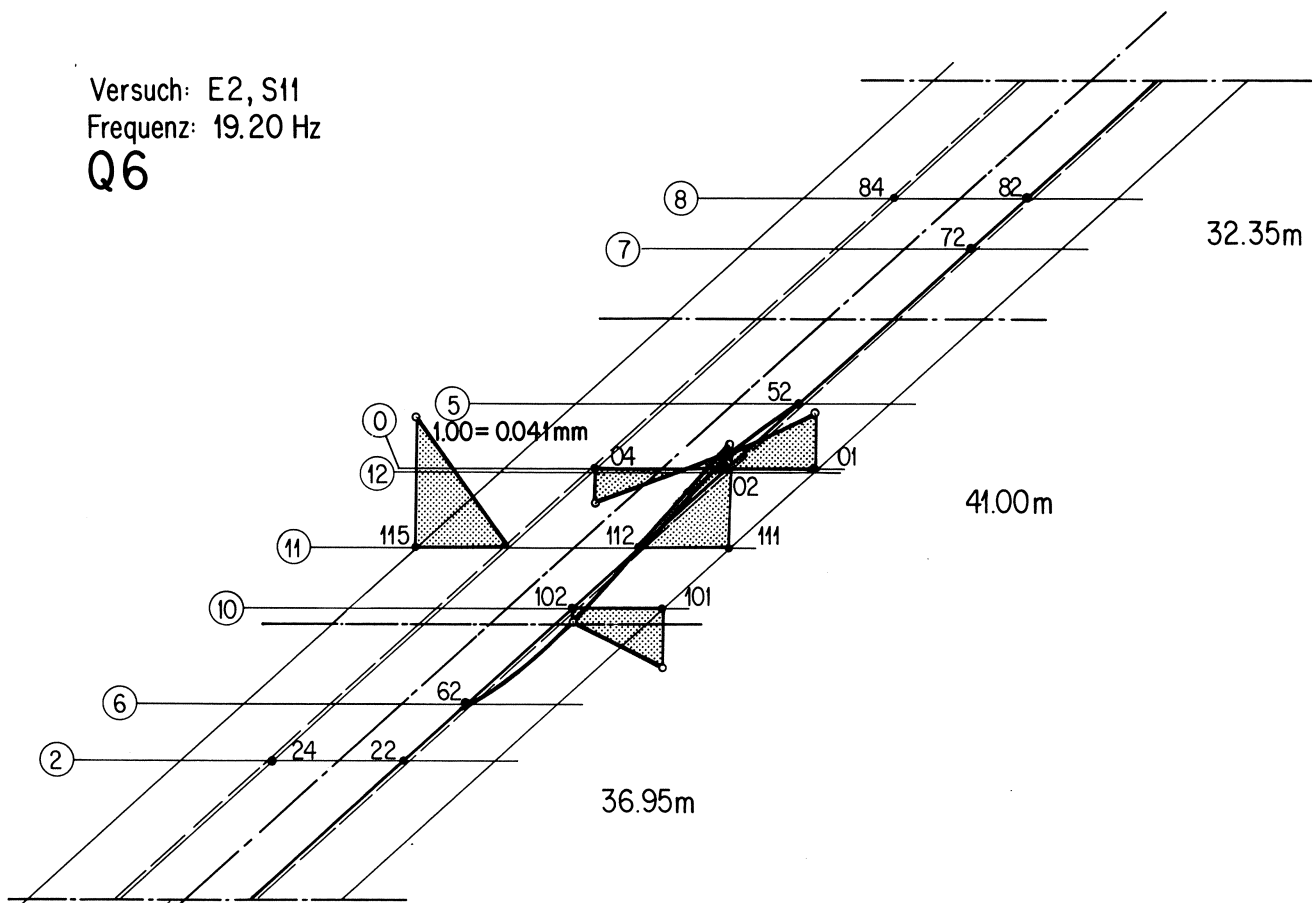
A1.105

A1.106



Skalierung horizontal: 0.081 s/div

Versuch: E2, S11
Frequenz: 19.20 Hz
Q6



A1.107
A1.108

Anhang 2

Die dynamischen Radlasten: Standardabweichung der Radlast in Funktion der Fahrgeschwindigkeit

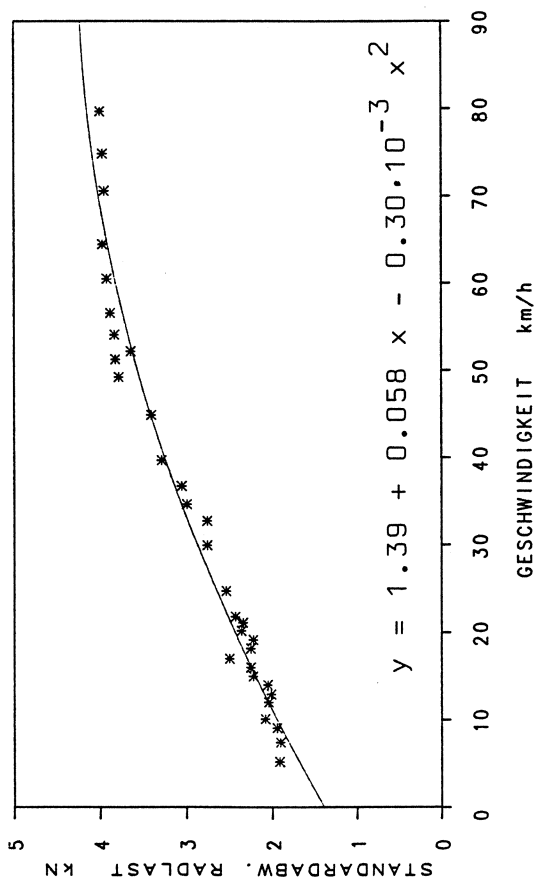
Anhang zum Berichtteil A, Seite 110 ff,
Abschnitt 3.61,
"Die dynamischen Radlasten im Zeitbereich".

Dargestellt ist für alle untersuchten, einzeln bzw. doppelt bereiften Räder der Verlauf der gemessenen Standardabweichung der Radlast, der Radlastschwankung, über die Fahrgeschwindigkeit (Seiten A2.1 bis A2.11). Die gültige statische Radlast F_{stat} und die Gleichung der berechneten Regressionsfunktion (y = Radlastschwankung, x = Fahrgeschwindigkeit) sind jeweils angegeben.

Die Seiten A2.12 bis A2.16 zeigen vergleichende Darstellungen.

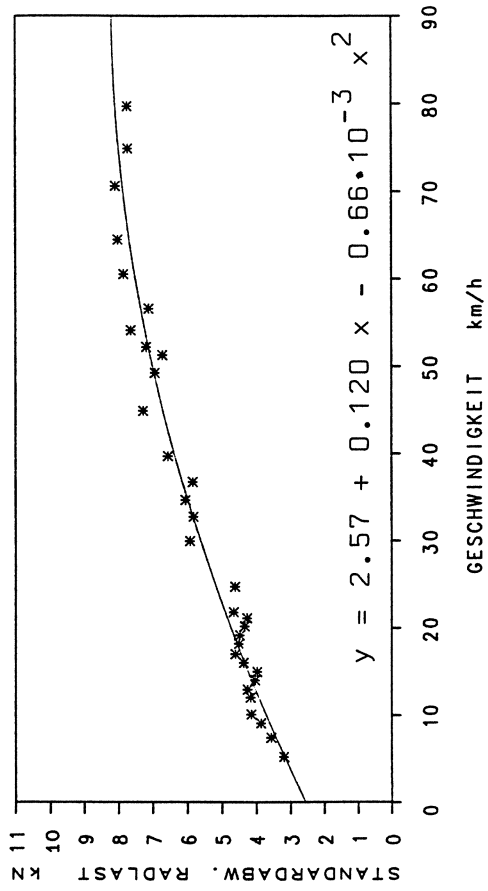
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R10V, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 29.20 \text{ kN}$



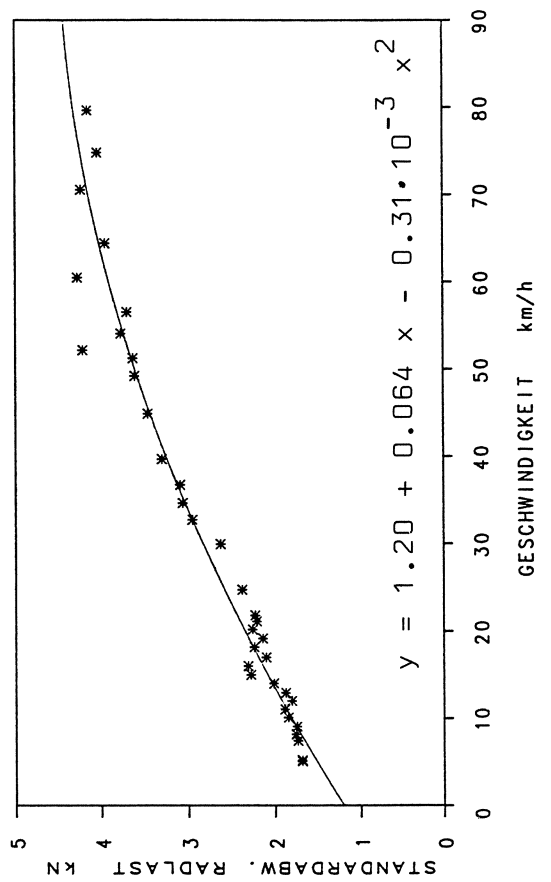
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R10H, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 53.85 \text{ kN}$



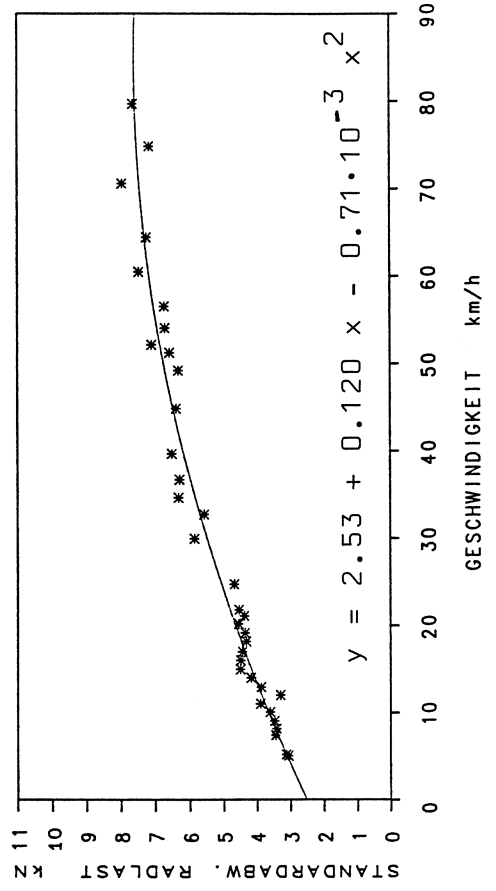
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R10V, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 29.20 \text{ kN}$



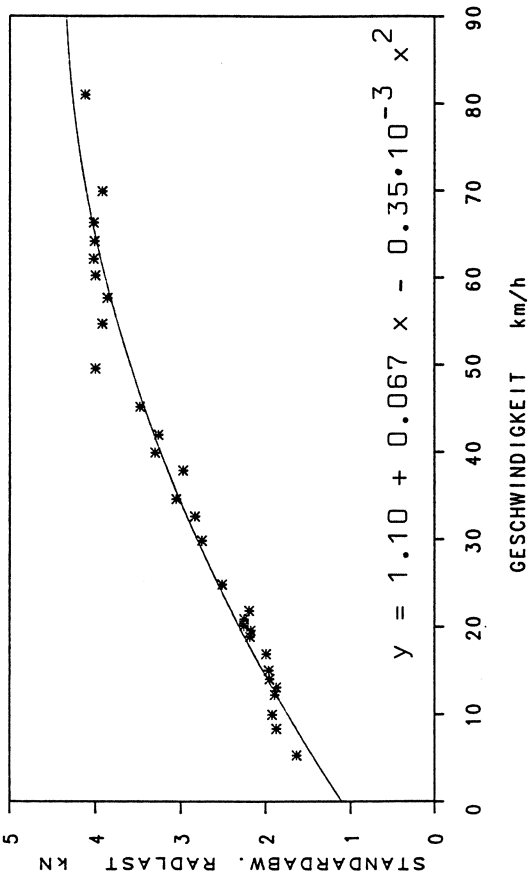
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R10H, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 53.85 \text{ kN}$



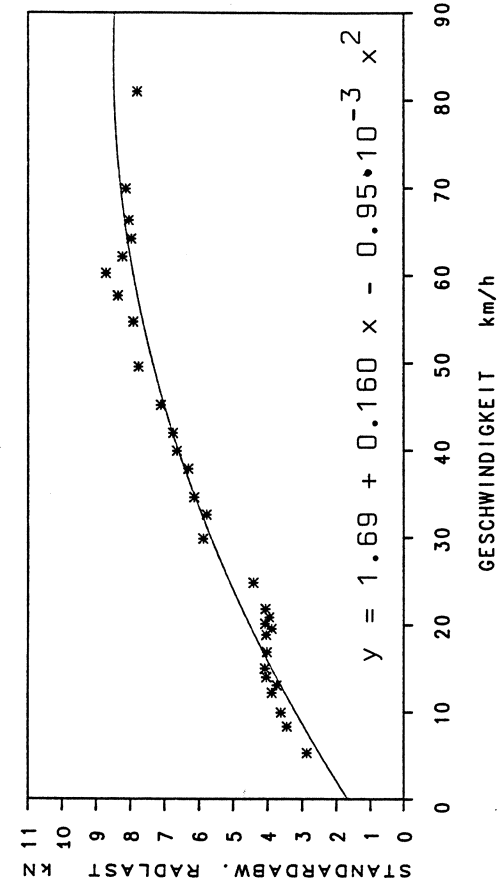
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R8V, BELAG A, PHASE V

F_{stat} = 29.20 kN



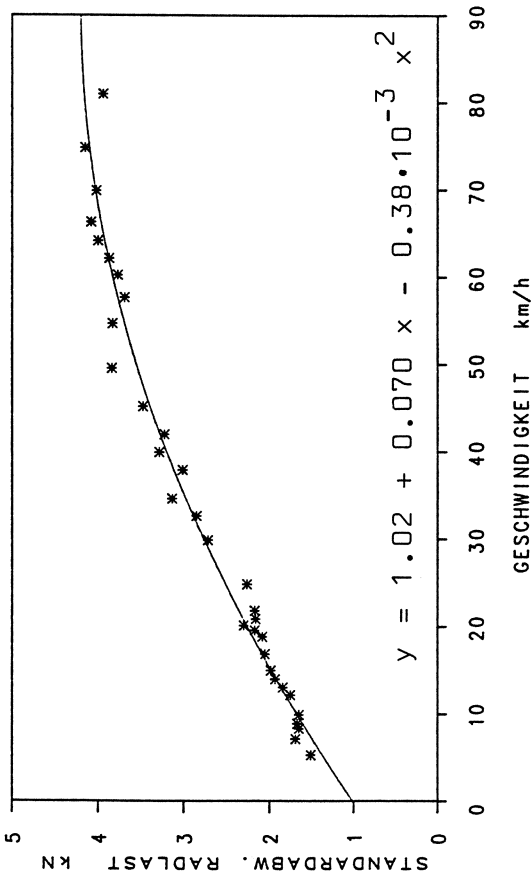
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R8H, BELAG A, PHASE V

F_{stat} = 53.85 kN



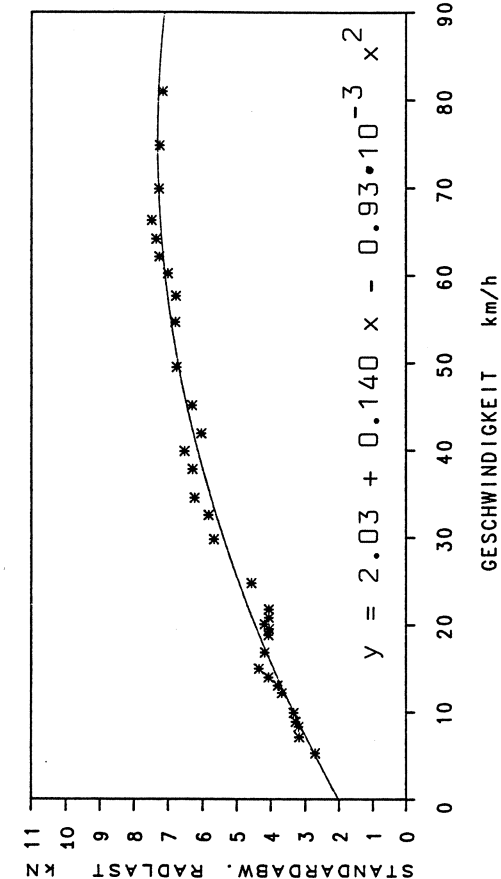
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R8V, BELAG A, PHASE W

F_{stat} = 29.20 kN



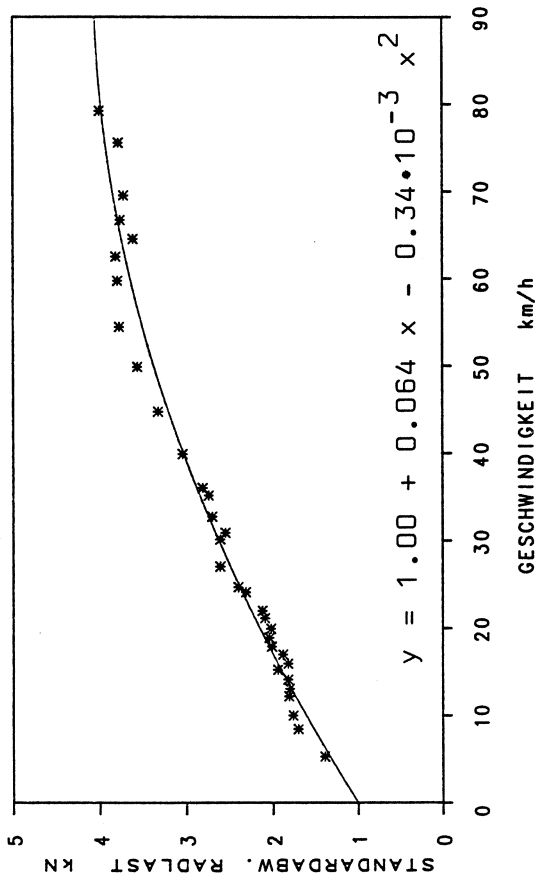
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R8H, BELAG A, PHASE W

F_{stat} = 53.85 kN



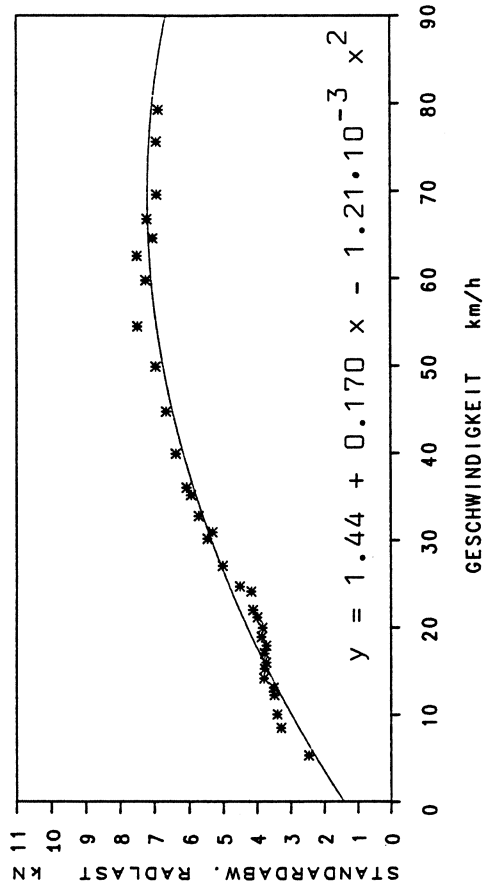
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R6V, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 29.20 \text{ kN}$



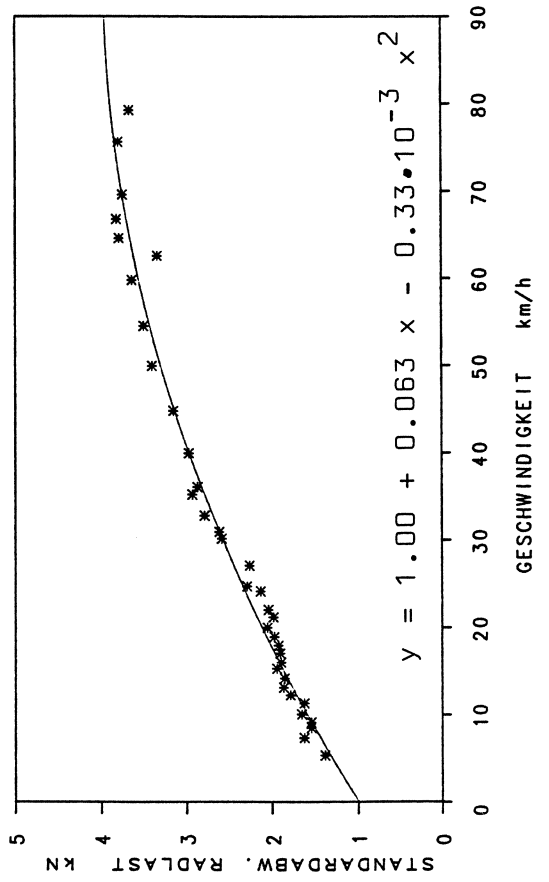
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R6H, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 53.85 \text{ kN}$



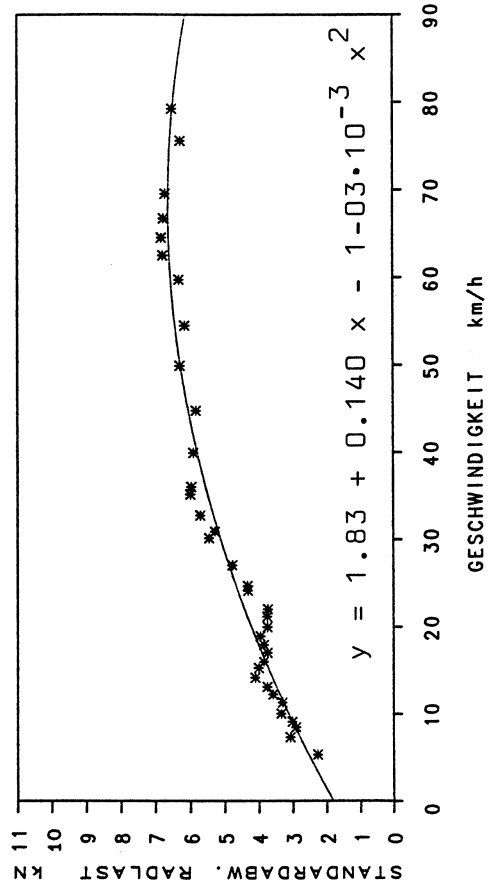
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R6V, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 29.20 \text{ kN}$



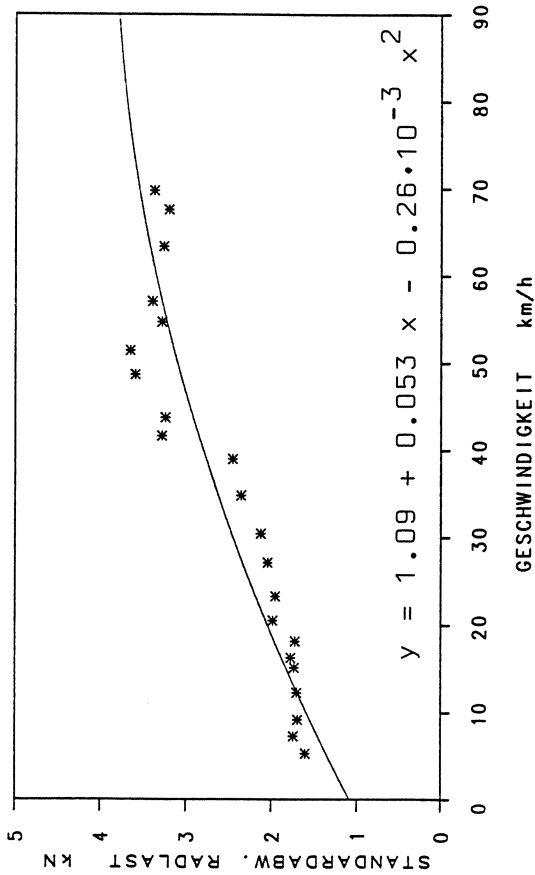
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11R6H, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 53.85 \text{ kN}$



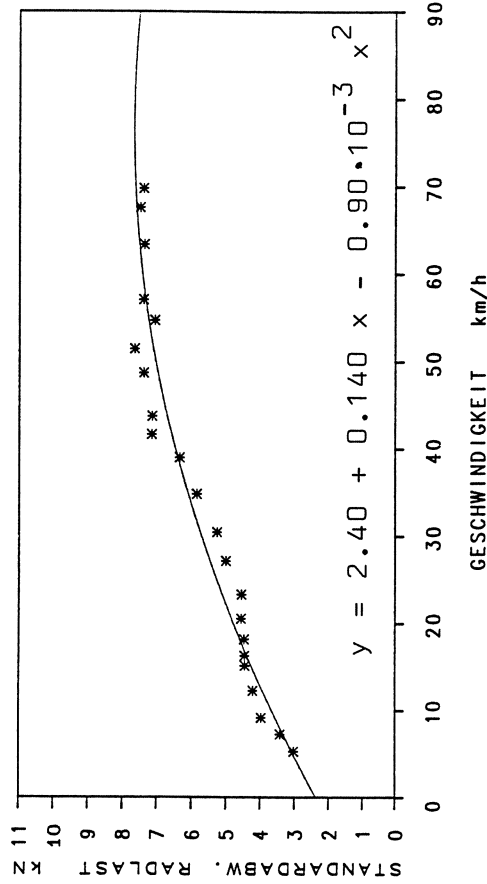
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10V, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 22.10 \text{ kN}$



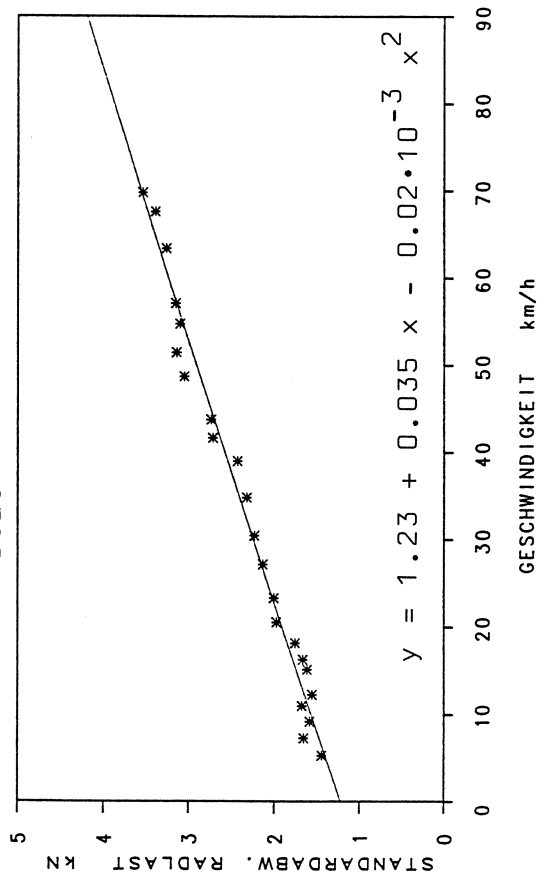
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10H, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 60.20 \text{ kN}$



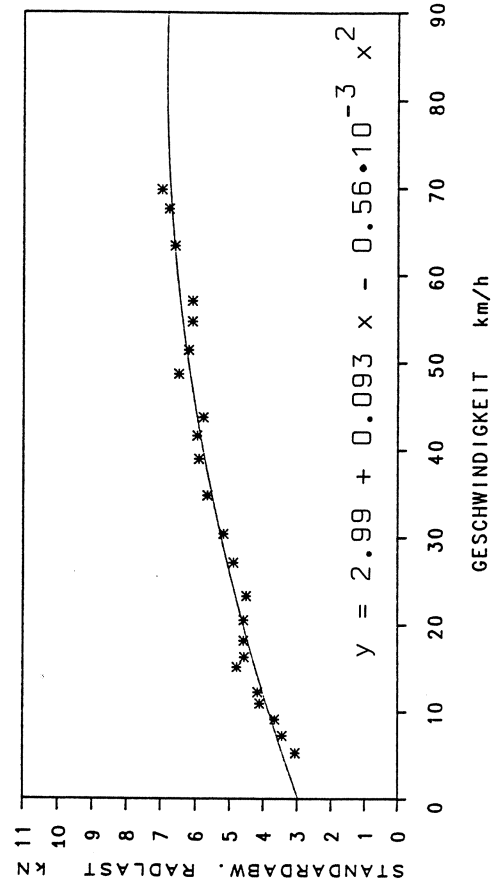
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10V, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 22.10 \text{ kN}$



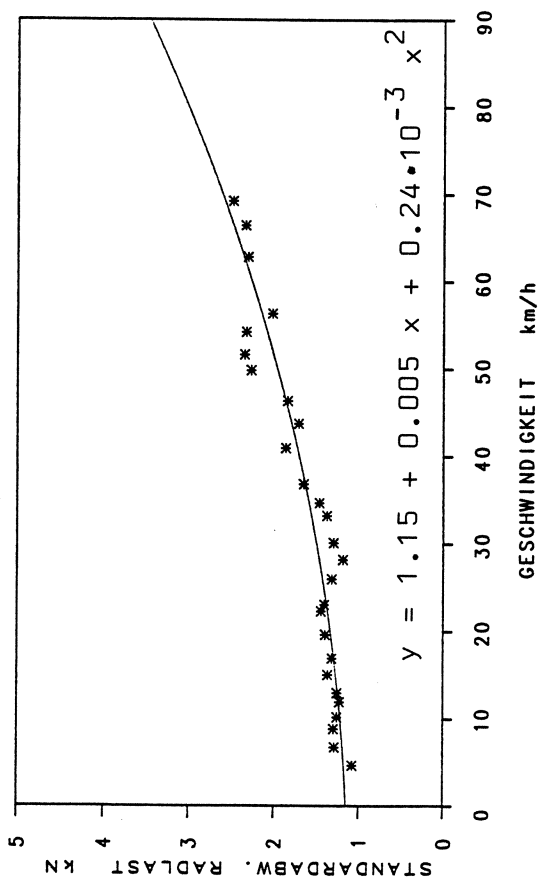
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10H, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 60.20 \text{ kN}$



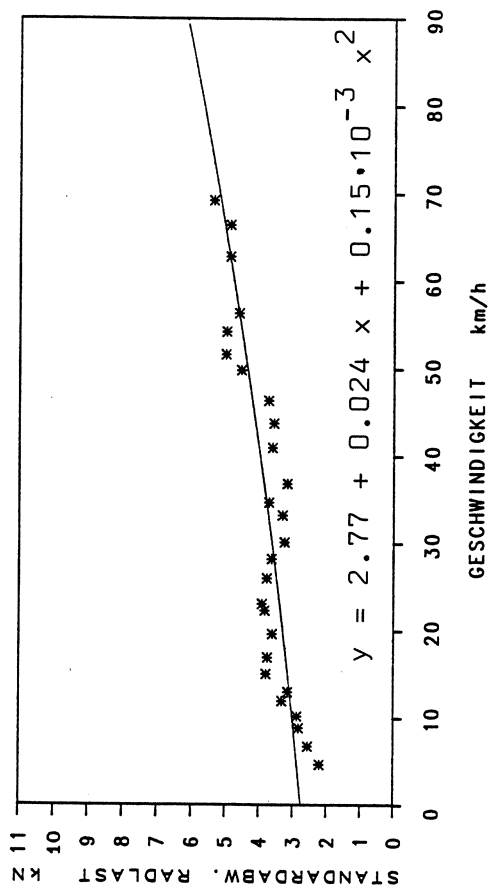
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10V, BELAG B, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 21.80 \text{ kN}$



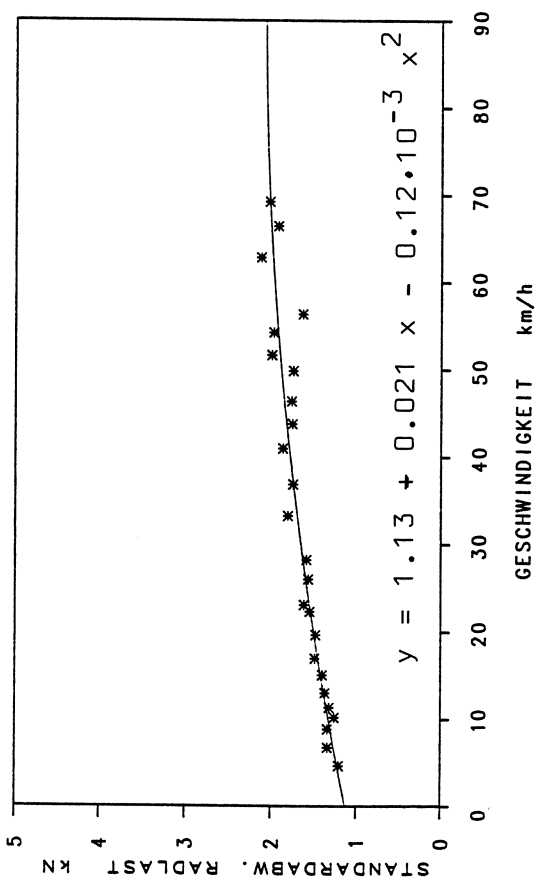
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10H, BELAG B, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 60.70 \text{ kN}$



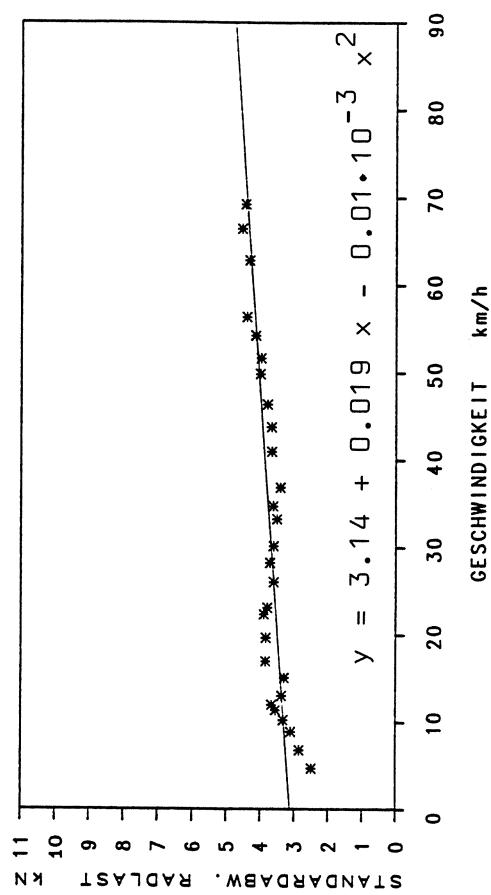
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10V, BELAG B, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 21.80 \text{ kN}$



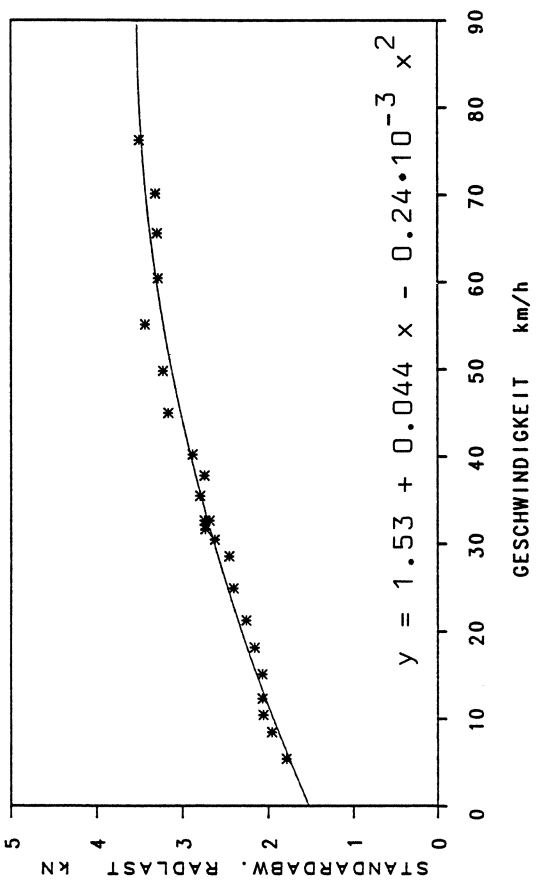
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10H, BELAG B, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 60.70 \text{ kN}$



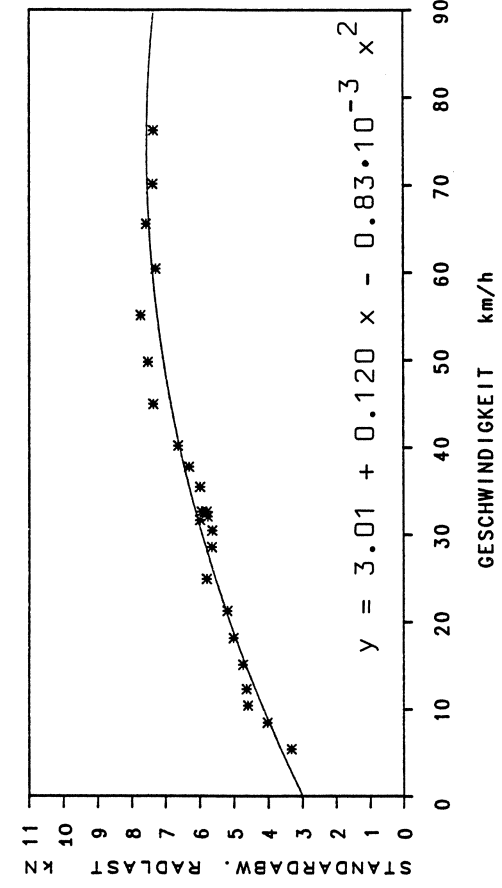
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10V, BELAG A, PHASE V

$F_{stat} = 22.00 \text{ kN}$



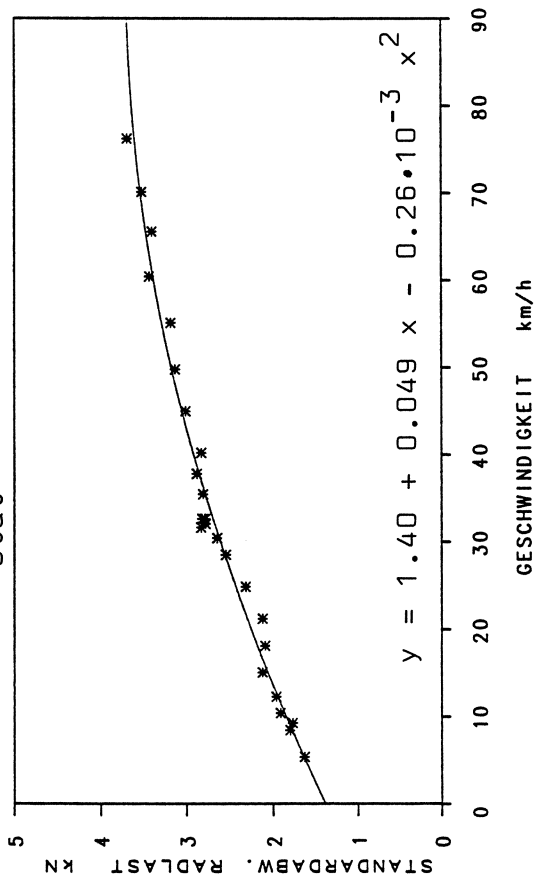
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10H, BELAG A, PHASE V

$F_{stat} = 61.45 \text{ kN}$



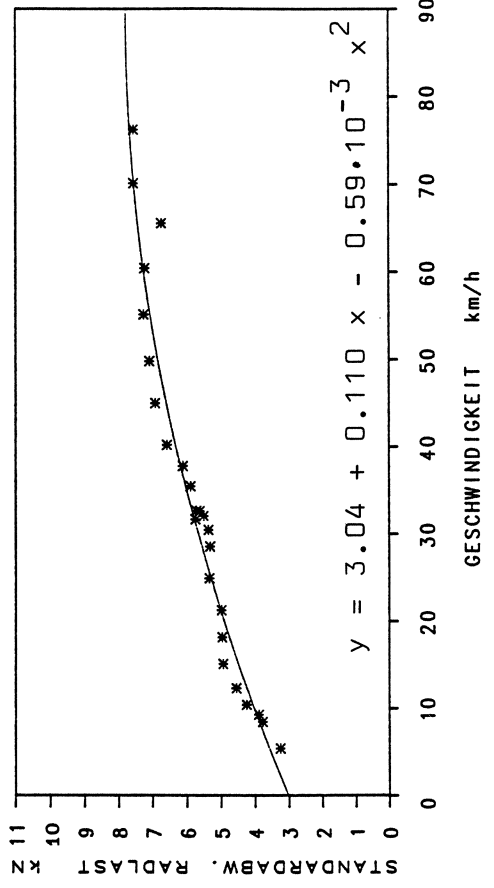
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10V, BELAG A, PHASE W

$F_{stat} = 22.00 \text{ kN}$



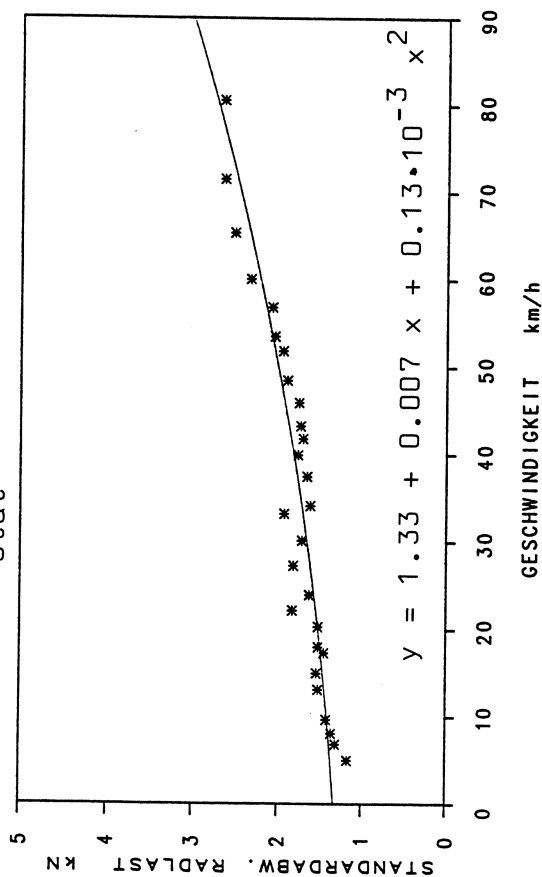
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10H, BELAG A, PHASE W

$F_{stat} = 61.45 \text{ kN}$



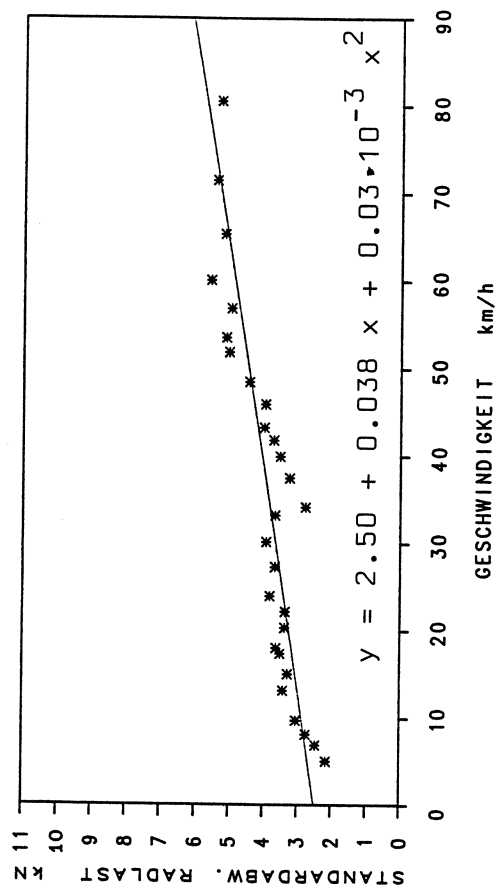
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10V, BELAG B, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 22.05 \text{ kN}$



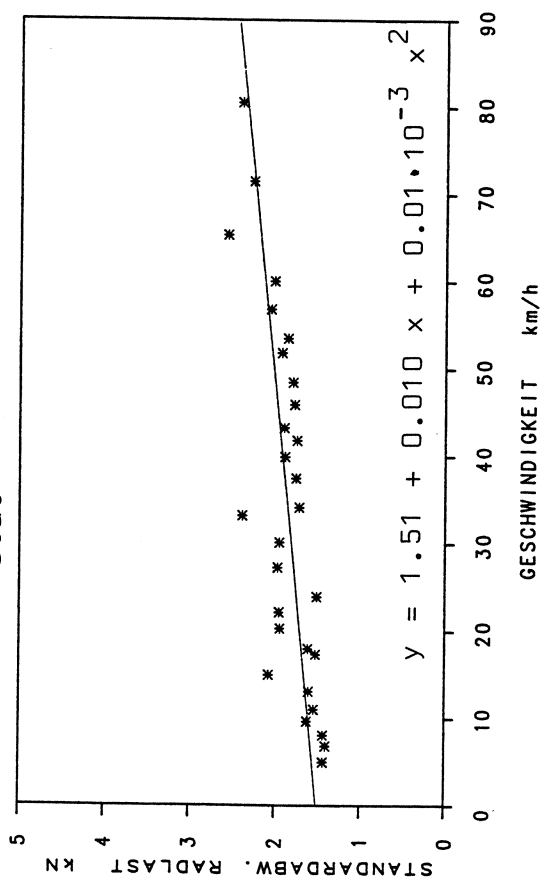
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10H, BELAG B, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 61.35 \text{ kN}$



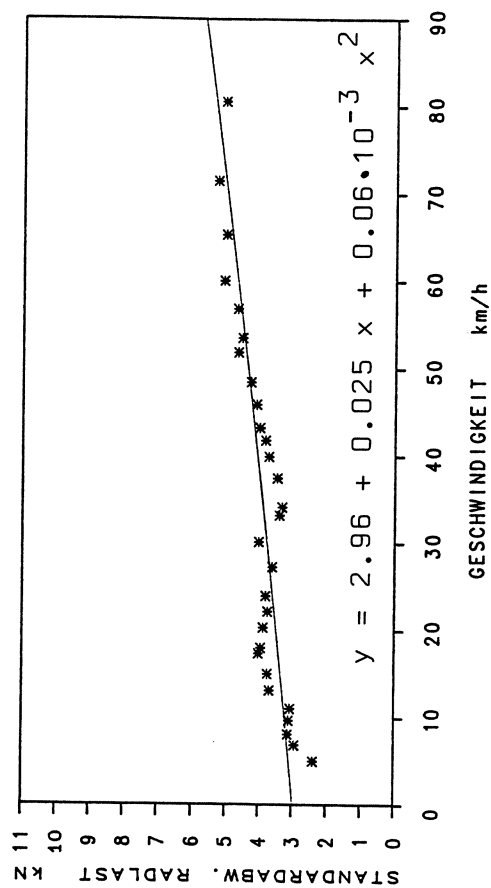
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10V, BELAG B, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 22.05 \text{ kN}$



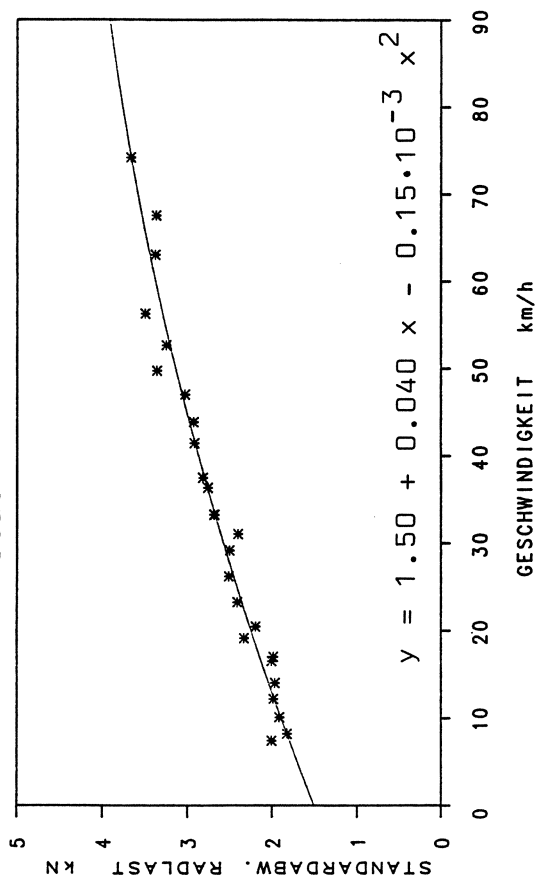
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10H, BELAG B, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 61.35 \text{ kN}$



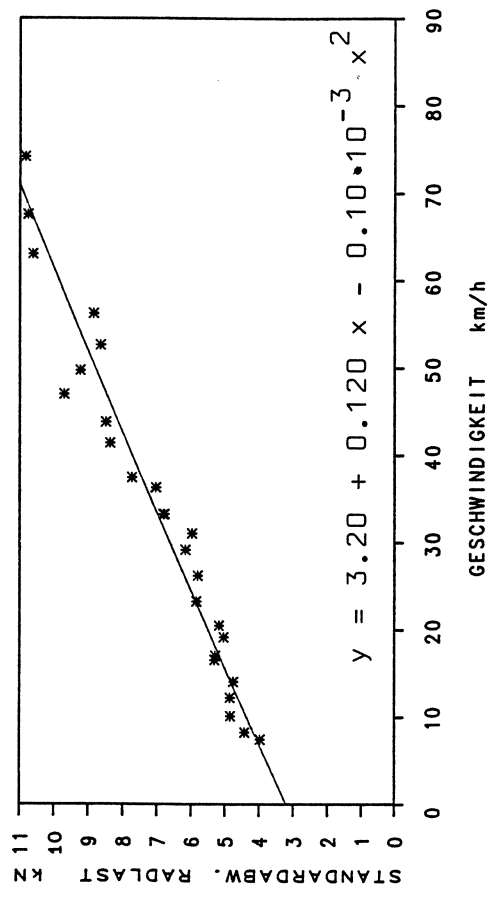
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10V, BELAG A, PHASE V

$F_{stat} = 25.30 \text{ kN}$



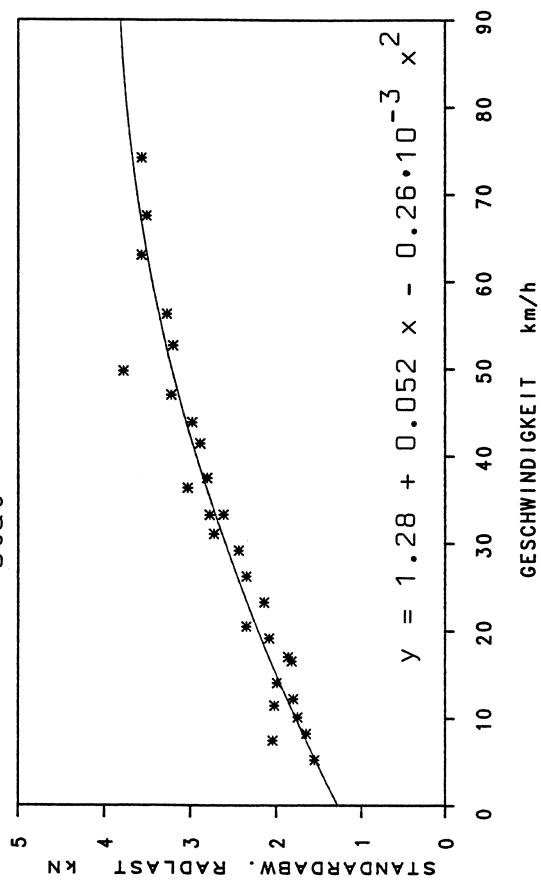
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10H, BELAG A, PHASE V

$F_{stat} = 54.80 \text{ kN}$



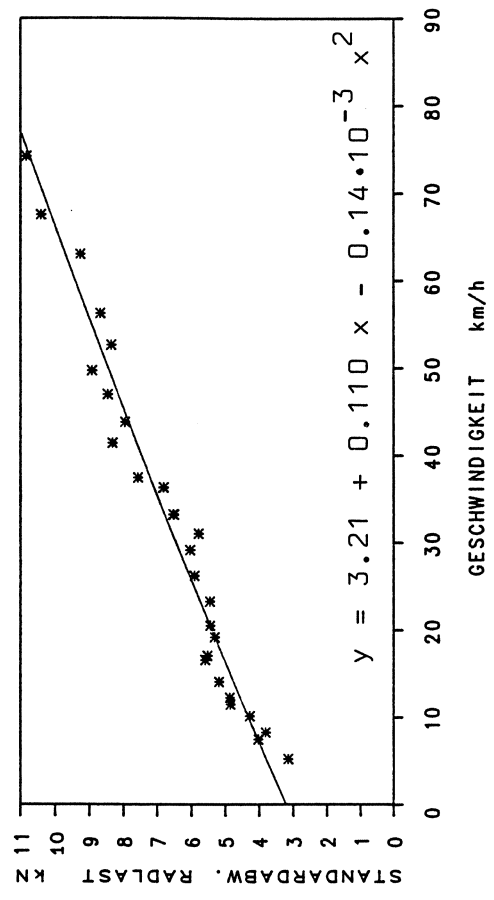
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10V, BELAG A, PHASE W

$F_{stat} = 25.30 \text{ kN}$



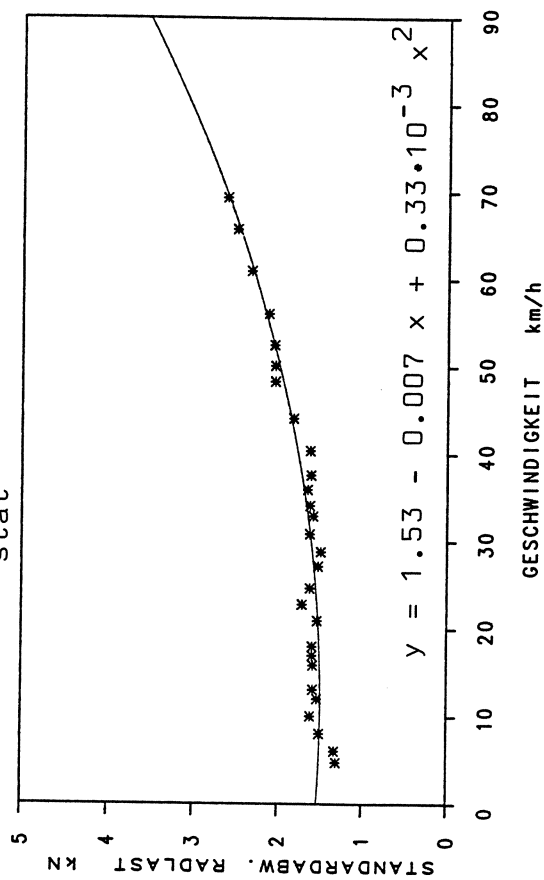
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10H, BELAG A, PHASE W

$F_{stat} = 54.80 \text{ kN}$



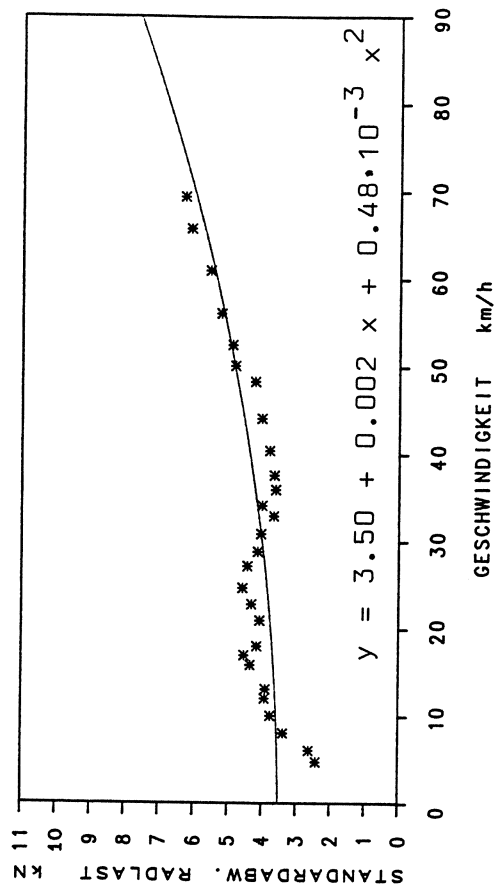
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10V, BELAG B, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 25.30 \text{ kN}$



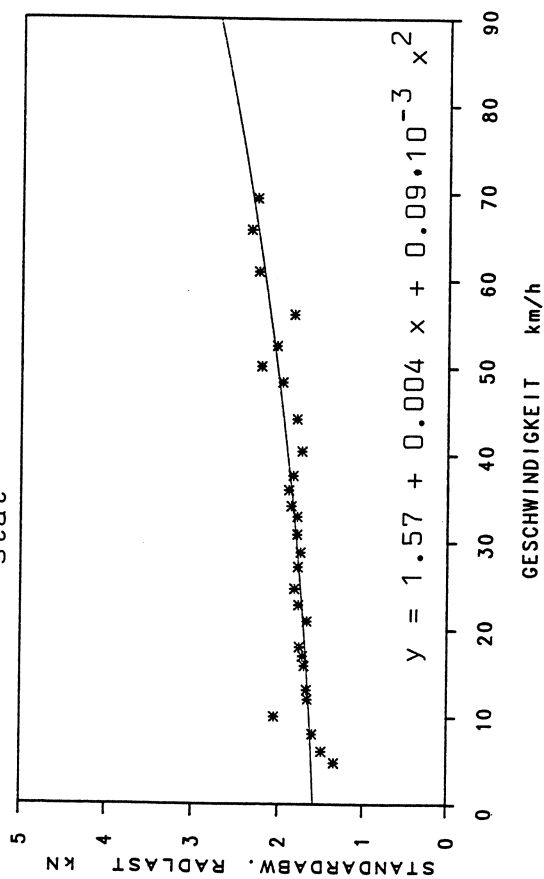
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10H, BELAG B, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 54.80 \text{ kN}$



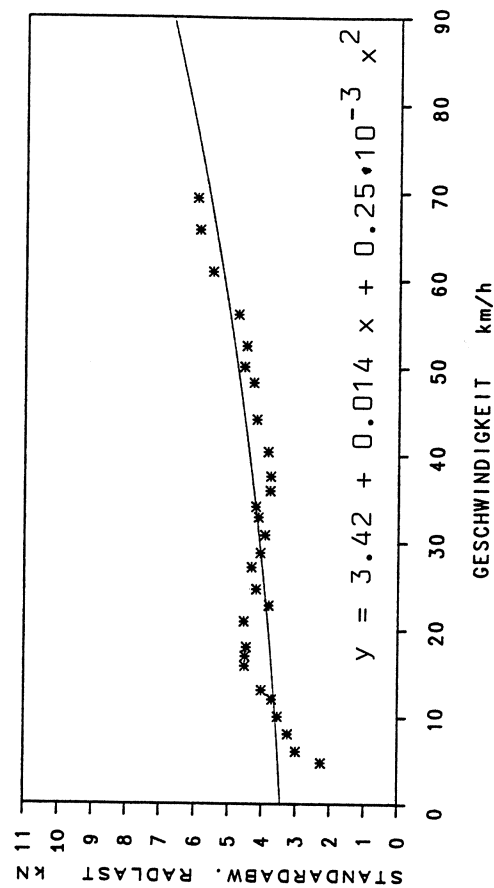
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10V, BELAG B, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 25.30 \text{ kN}$



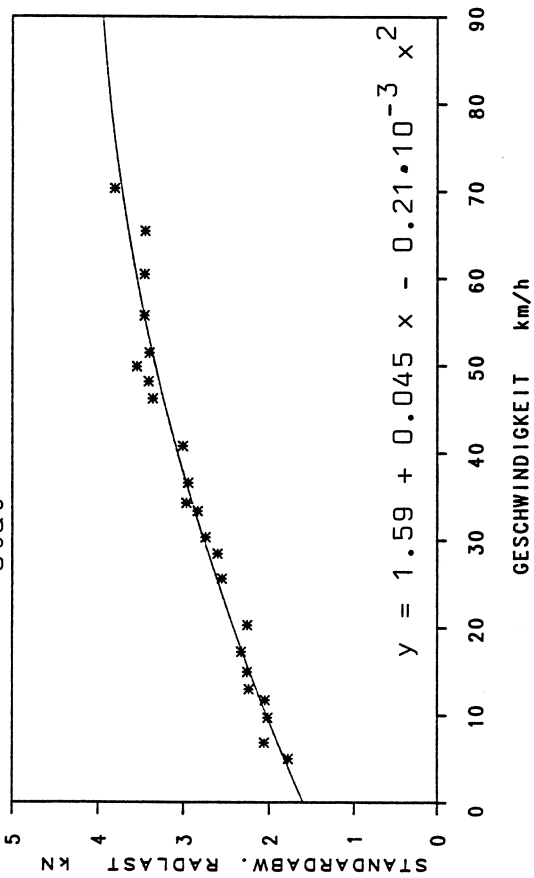
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10H, BELAG B, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 54.80 \text{ kN}$



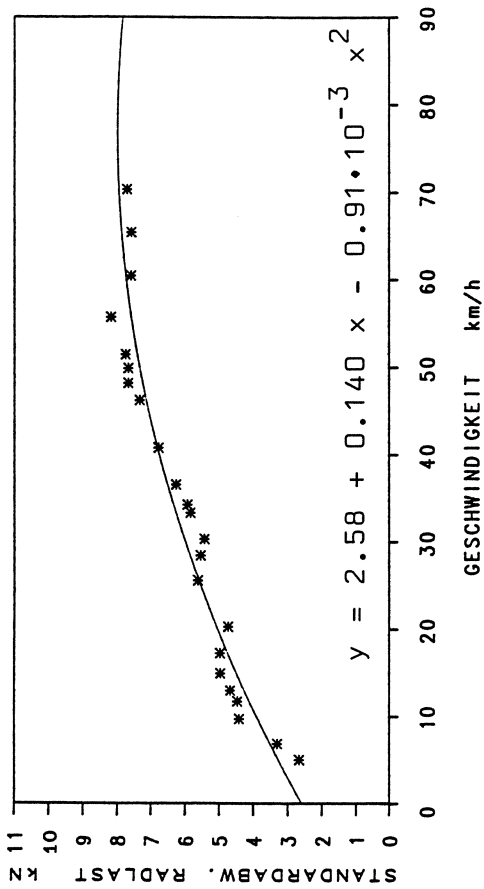
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10W, BELAG A, PHASE V

$F_{stat} = 22.00 \text{ kN}$



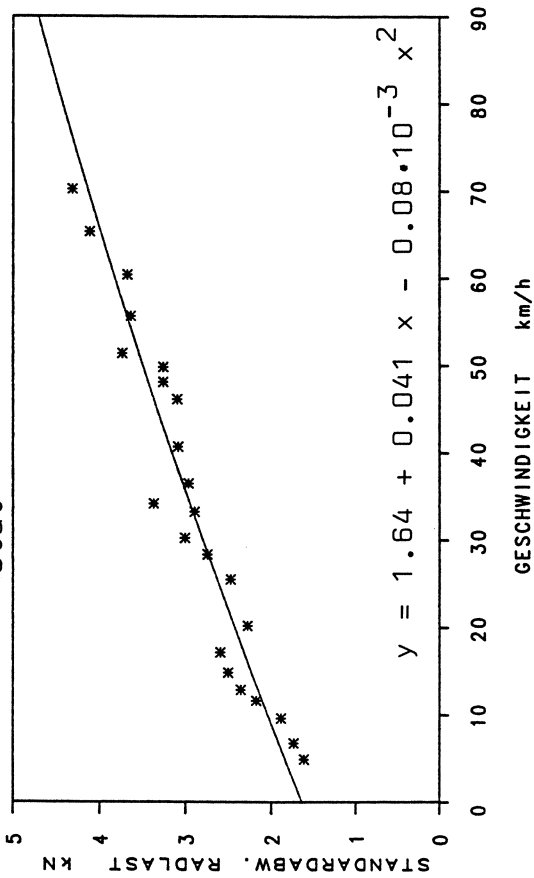
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10VH, BELAG A, PHASE V

$F_{stat} = 61.45 \text{ kN}$



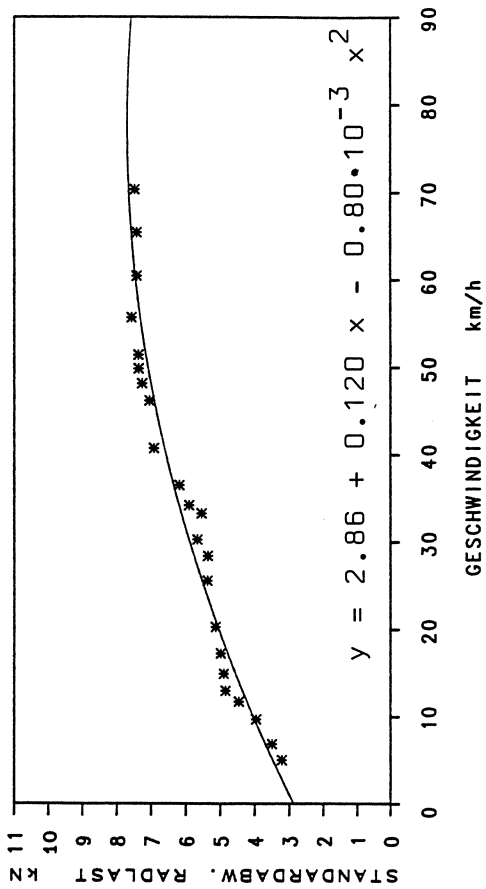
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10W, BELAG A, PHASE W

$F_{stat} = 22.00 \text{ kN}$



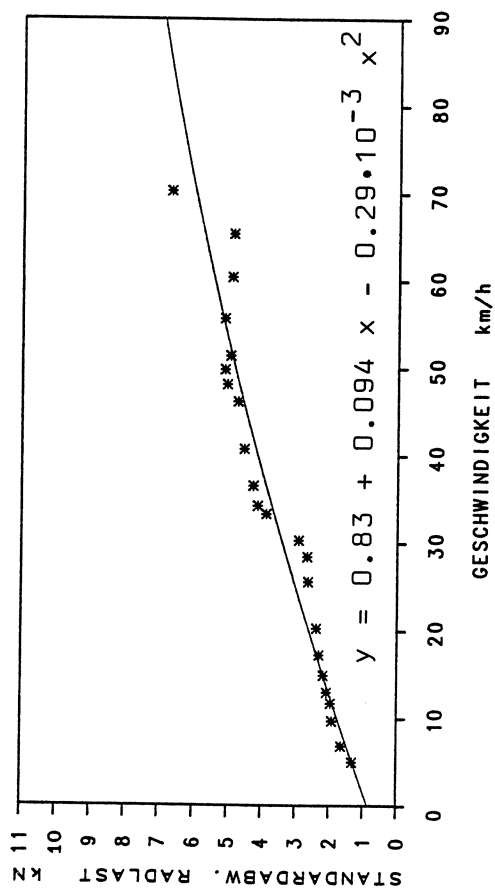
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10VH, BELAG A, PHASE W

$F_{stat} = 61.45 \text{ kN}$



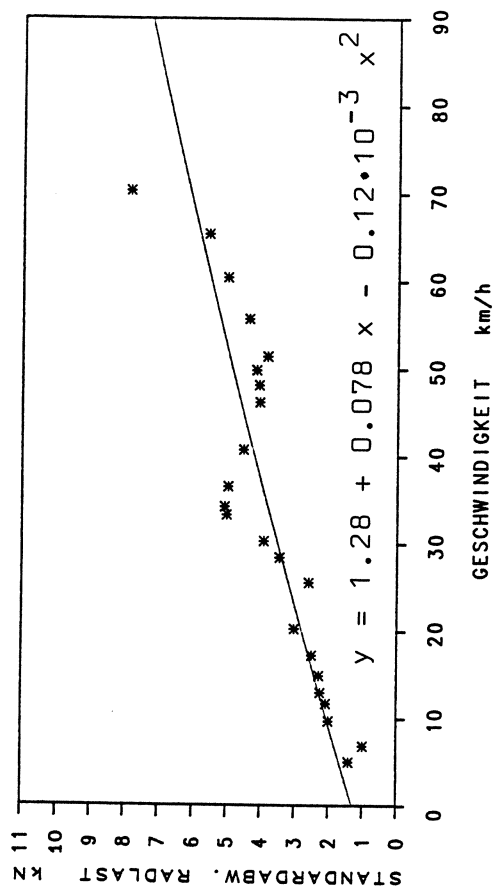
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10HV, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 29.60 \text{ kN}$



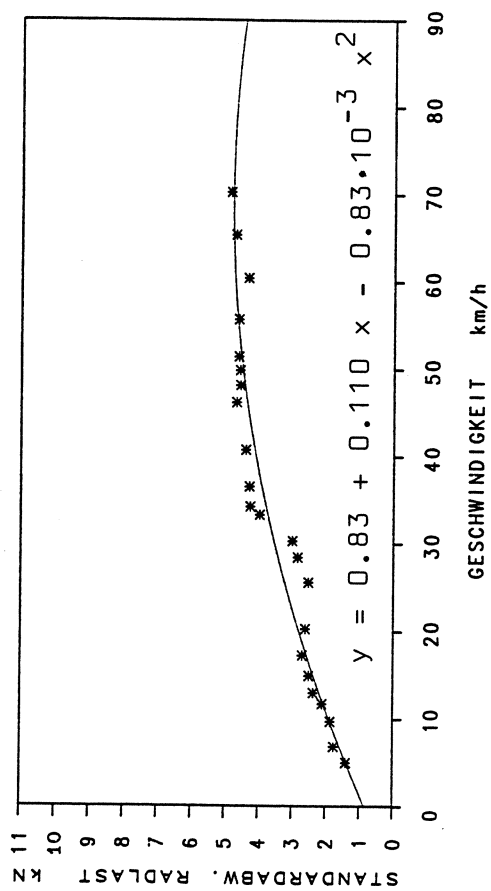
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10HH, BELAG A, PHASE V

$F_{\text{stat}} = 32.05 \text{ kN}$



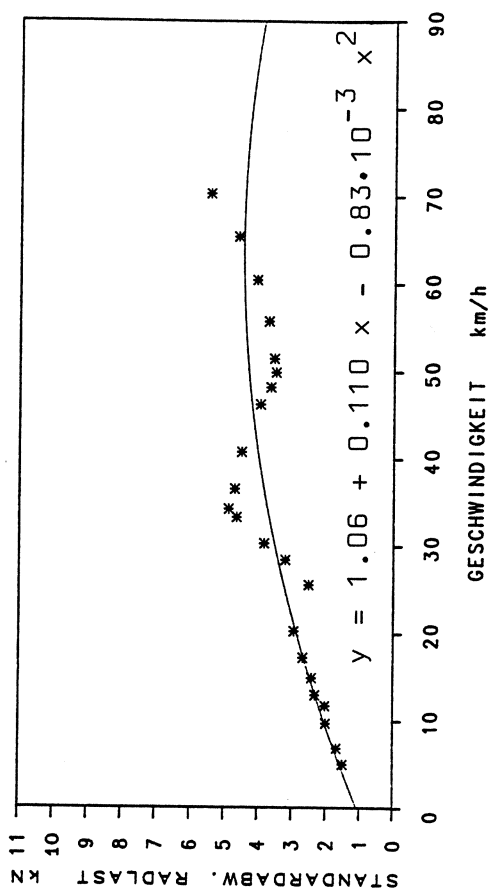
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10HV, BELAG A, PHASE W

$F_{\text{stat}} = 29.60 \text{ kN}$

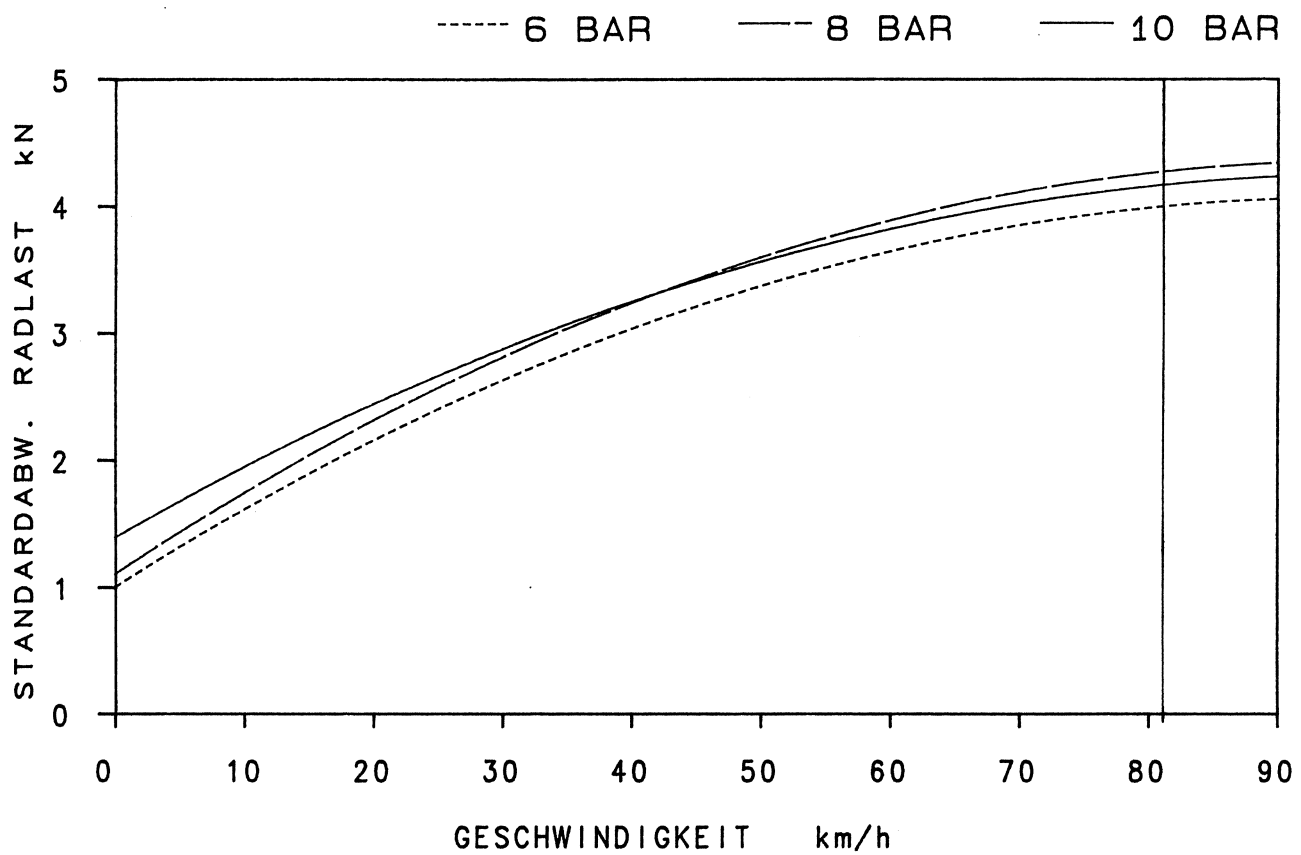


DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 42R10HH, BELAG A, PHASE W

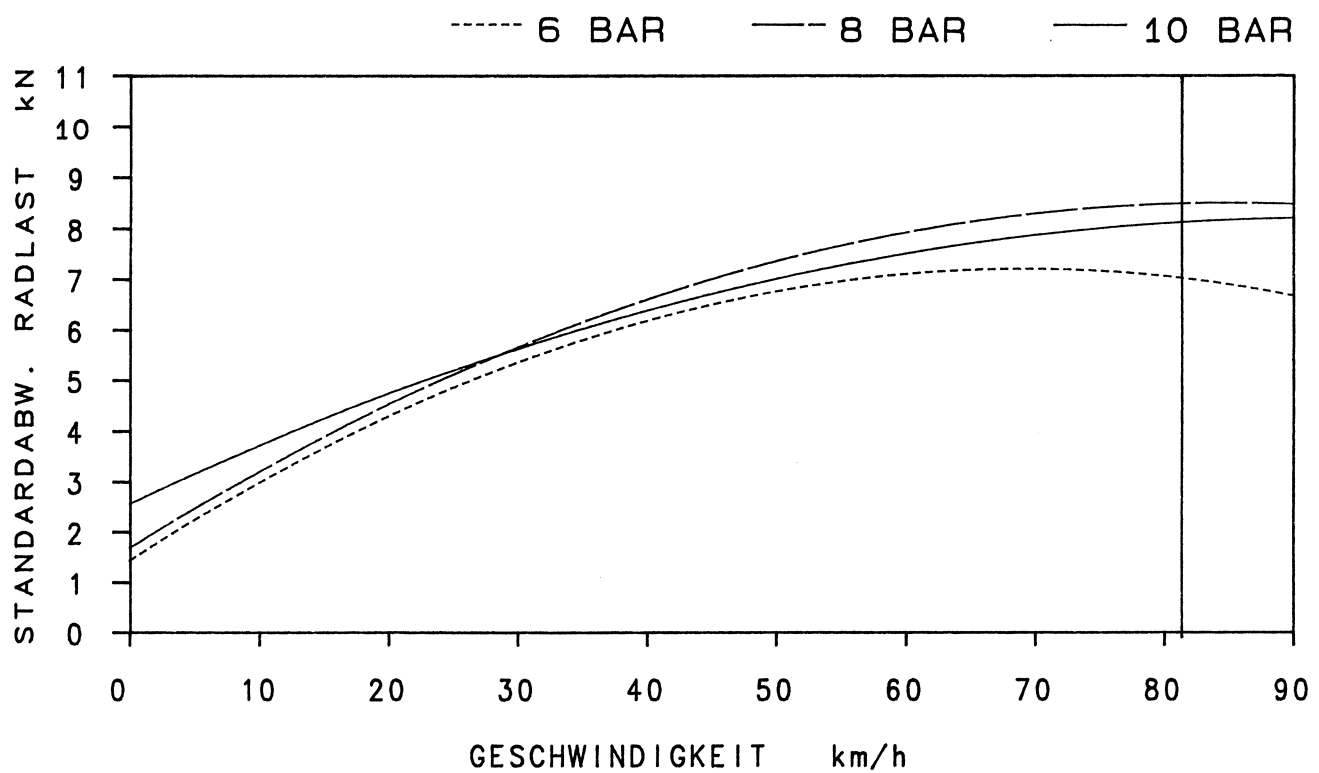
$F_{\text{stat}} = 32.05 \text{ kN}$



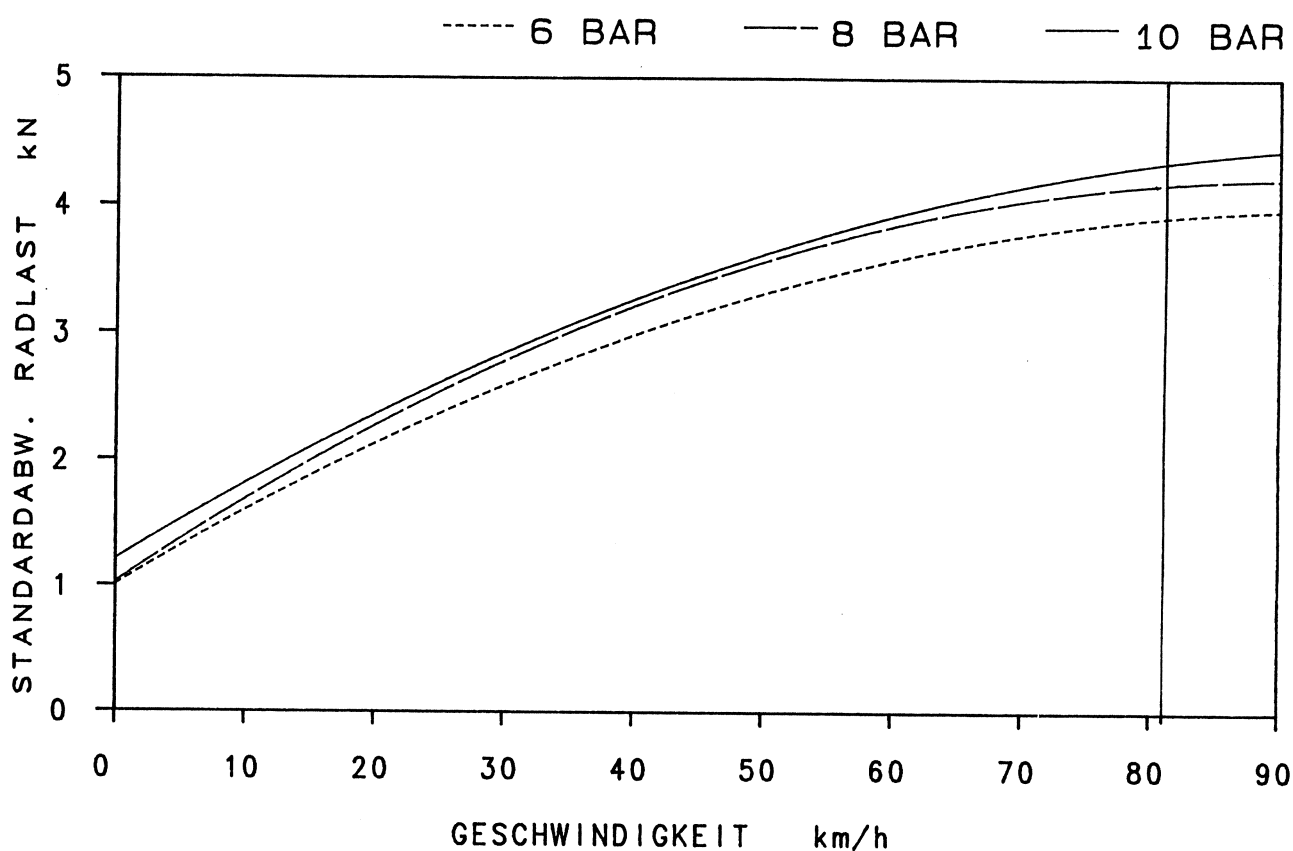
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11RV, BELAG A, PHASE V



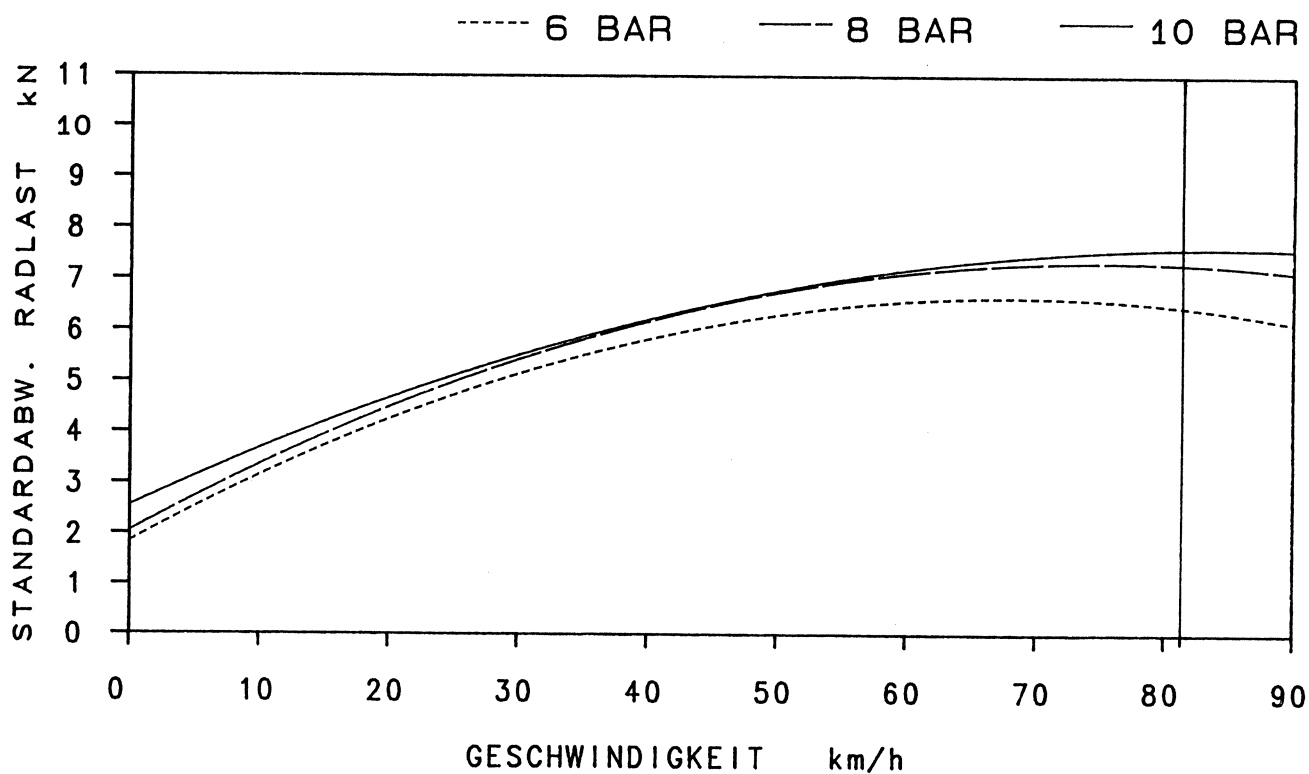
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11RH, BELAG A, PHASE V



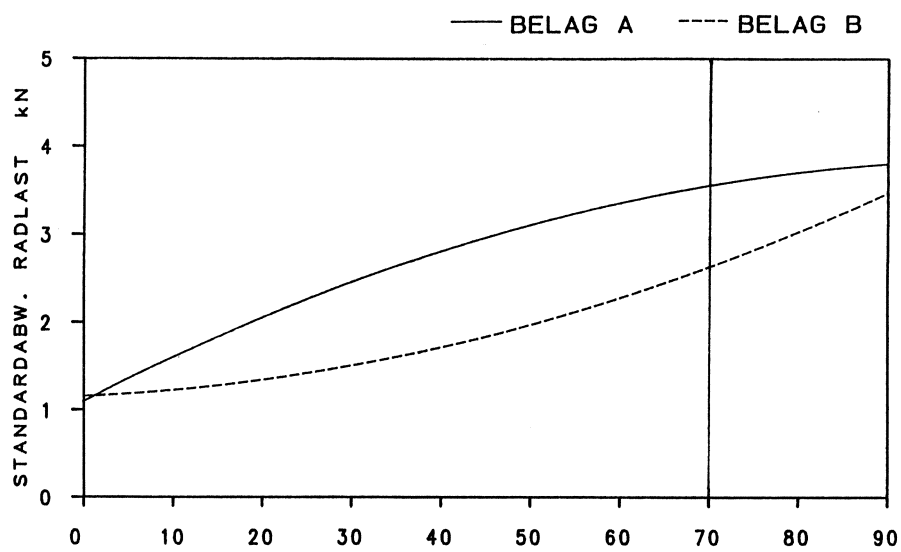
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11RV, BELAG A, PHASE W



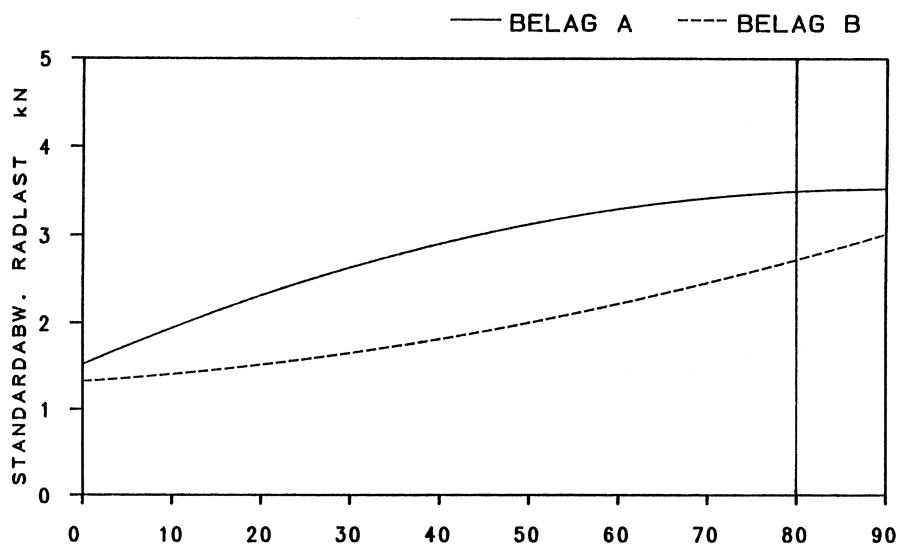
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 11RH, BELAG A, PHASE W



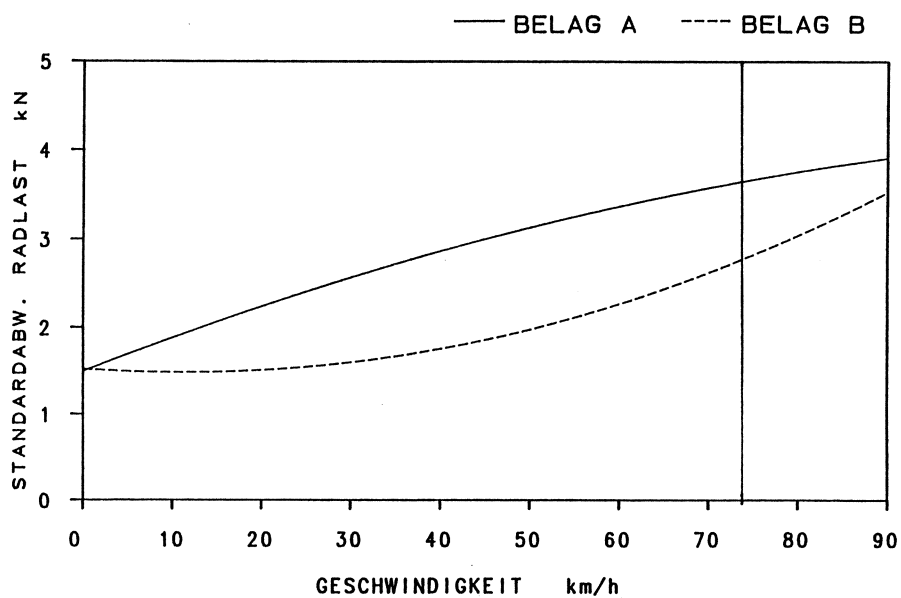
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10V, PHASE V



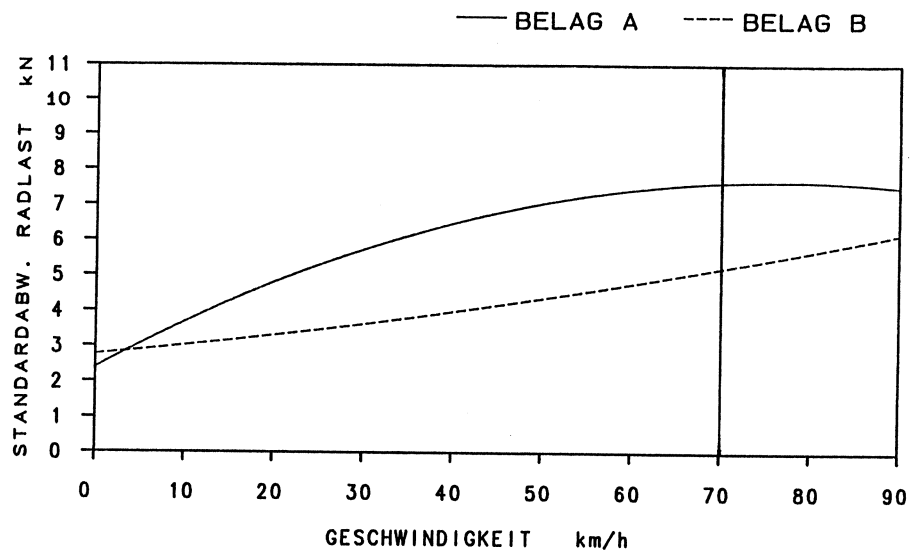
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10V, PHASE V



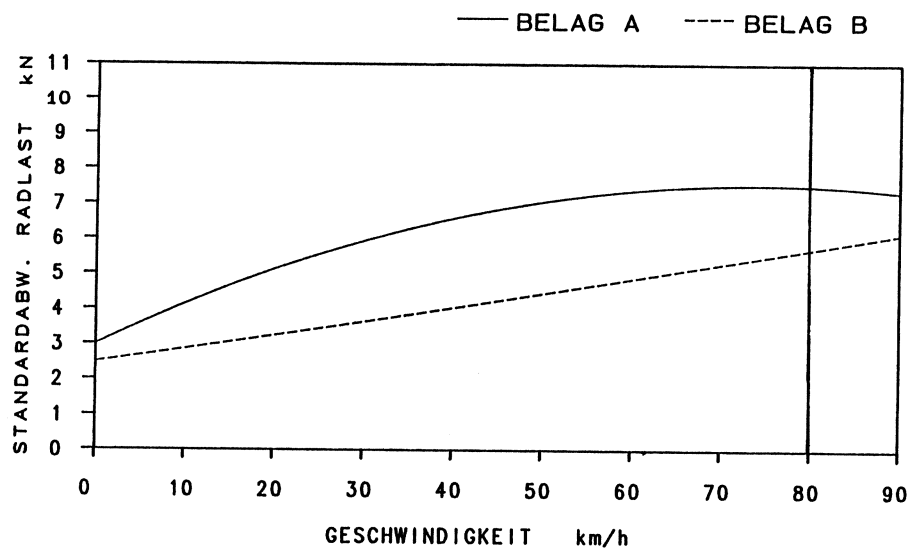
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10V, PHASE V



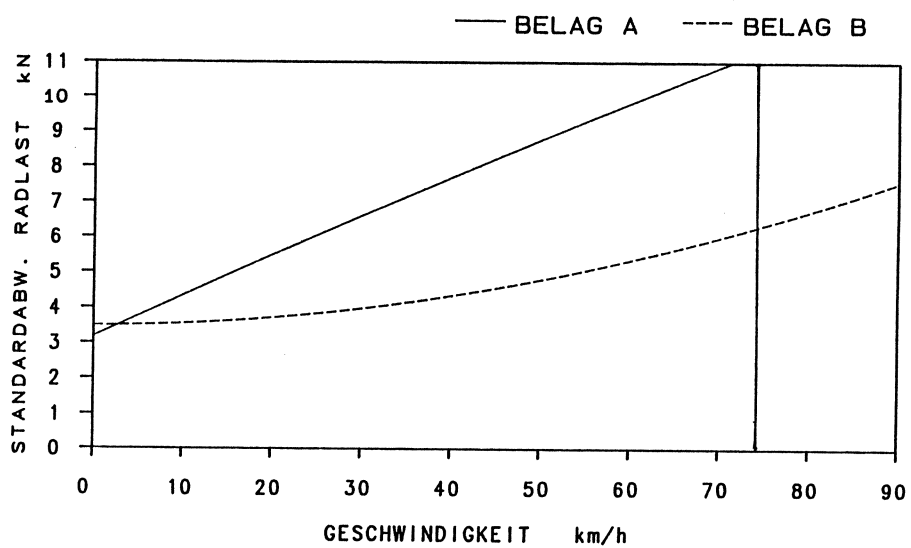
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 12R10H, PHASE V



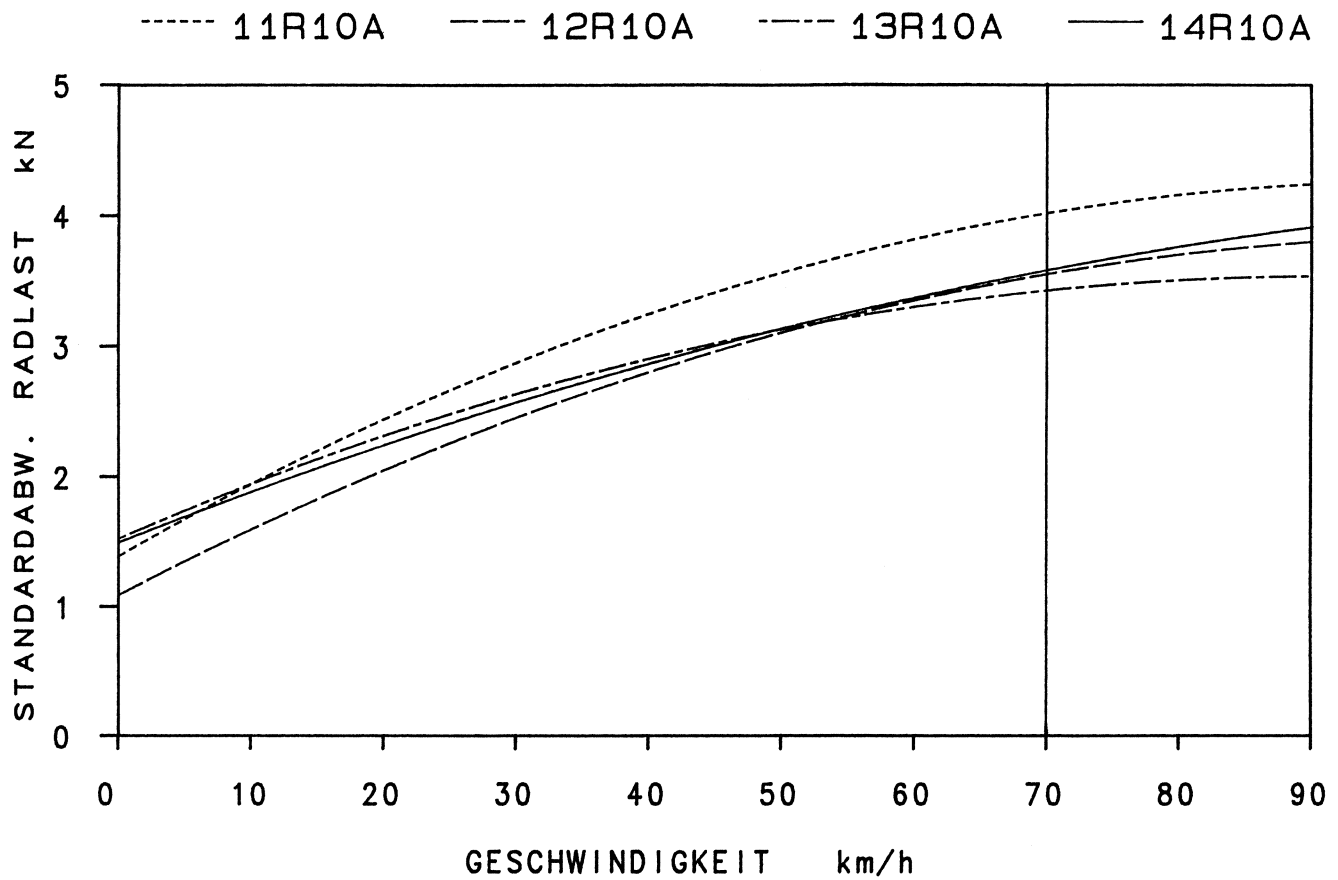
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 13R10H, PHASE V



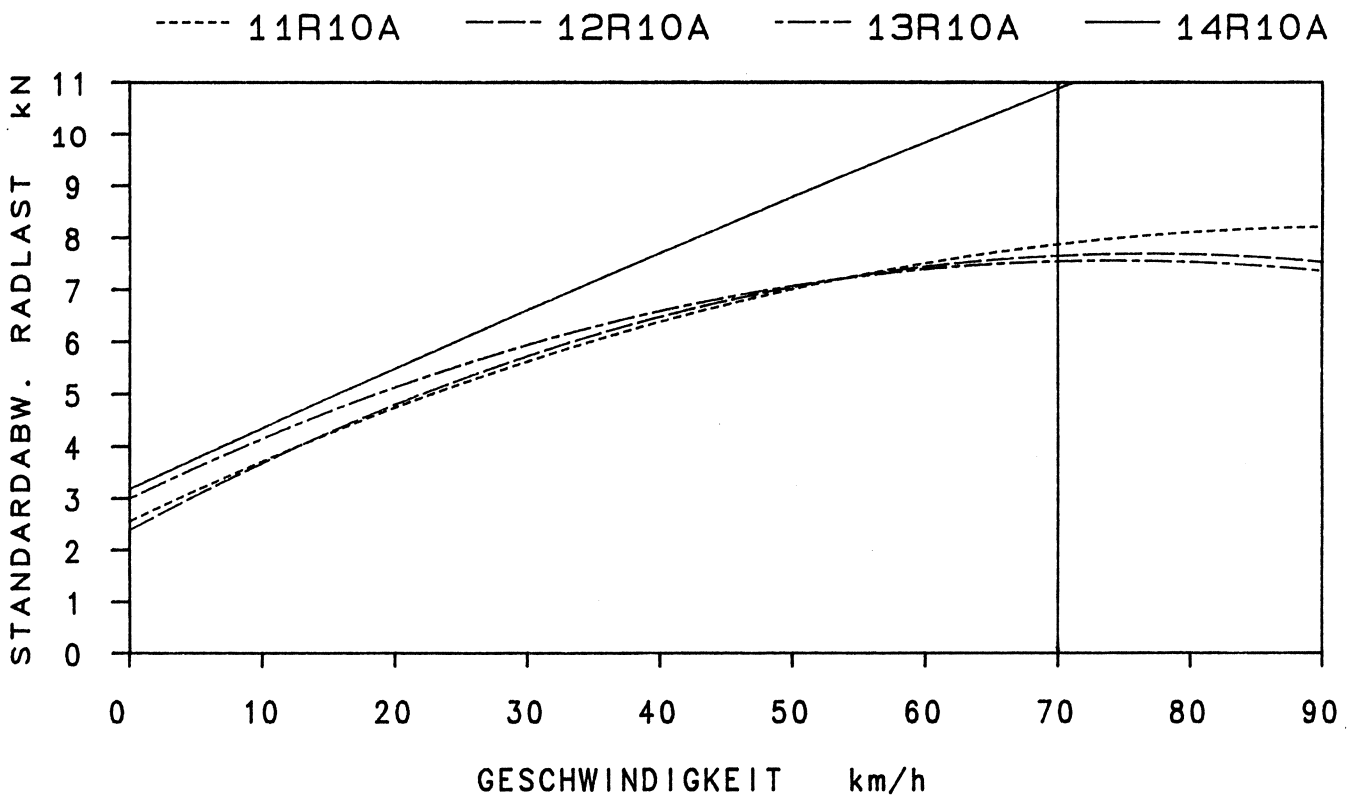
DYN. RADLASTEN, FAHRZEUG 14R10H, PHASE V



DYN. RADLASTEN, ZWEIACHSER, VORNE, PHASE V



DYN. RADLASTEN, ZWEIACHSER, HINTEN, PHASE V



Anhang 3

Die Reaktion der Brücke: Beispiele von Schwingungsaufzeichnungen und $\phi(v)$ -Funktionen

Anhang zum Berichtteil A, Seite 118 ff,
Abschnitt 3.71,
"Beispiele von Zeitsignalen und $\phi(v)$ -Funktionen".

Am Beispiel der mit dem Fahrzeug 21R und einem Reifendruck von 10 bar auf dem Versuchsbelag B durchgeführten vier Versuchsserien, bzw. je einer Versuchsfahrt aus diesen Serien, wird untersucht, welchen Charakter die an der Deibüel-Brücke maximal 23 gemessenen Signale und die daraus bestimmten Verläufe des dynamischen Inkrementes ϕ über die Fahrgeschwindigkeit v aufweisen.

In allen vier Fällen werden zunächst die Durchbiegungen, dann die Dehnungen behandelt. Auf eine Uebersicht über alle gemessenen Signale folgen vergrößerte Ausschnitte aus einigen ausgewählten Signalen und anschliessend die $\phi(v)$ -Funktionen. Für die Zeitsignale ist der vertikale Full-Scale-Bereich, z.B. ± 1.94 mm, ebenso angegeben, wie die Skalierung der Zeitachse. Zusätzlich zu den Brückenreaktionen sind auch die Signale der Kontaktschwellen, die die Lage des Fahrzeuges auf der Brücke markieren, gegeben (vgl. dazu Berichtteil A, Seite 93, Bild 136).

Der Anhang A3 ist wie folgt gegliedert:

A3.1 bis A3.15:

Versuchsserie 21R10AoB bzw. daraus die Fahrt mit $v = 33.20$ km/h

A3.16 bis A3.28:

Versuchsserie 21R10KoB bzw. daraus die Fahrt mit $v = 35.34$ km/h

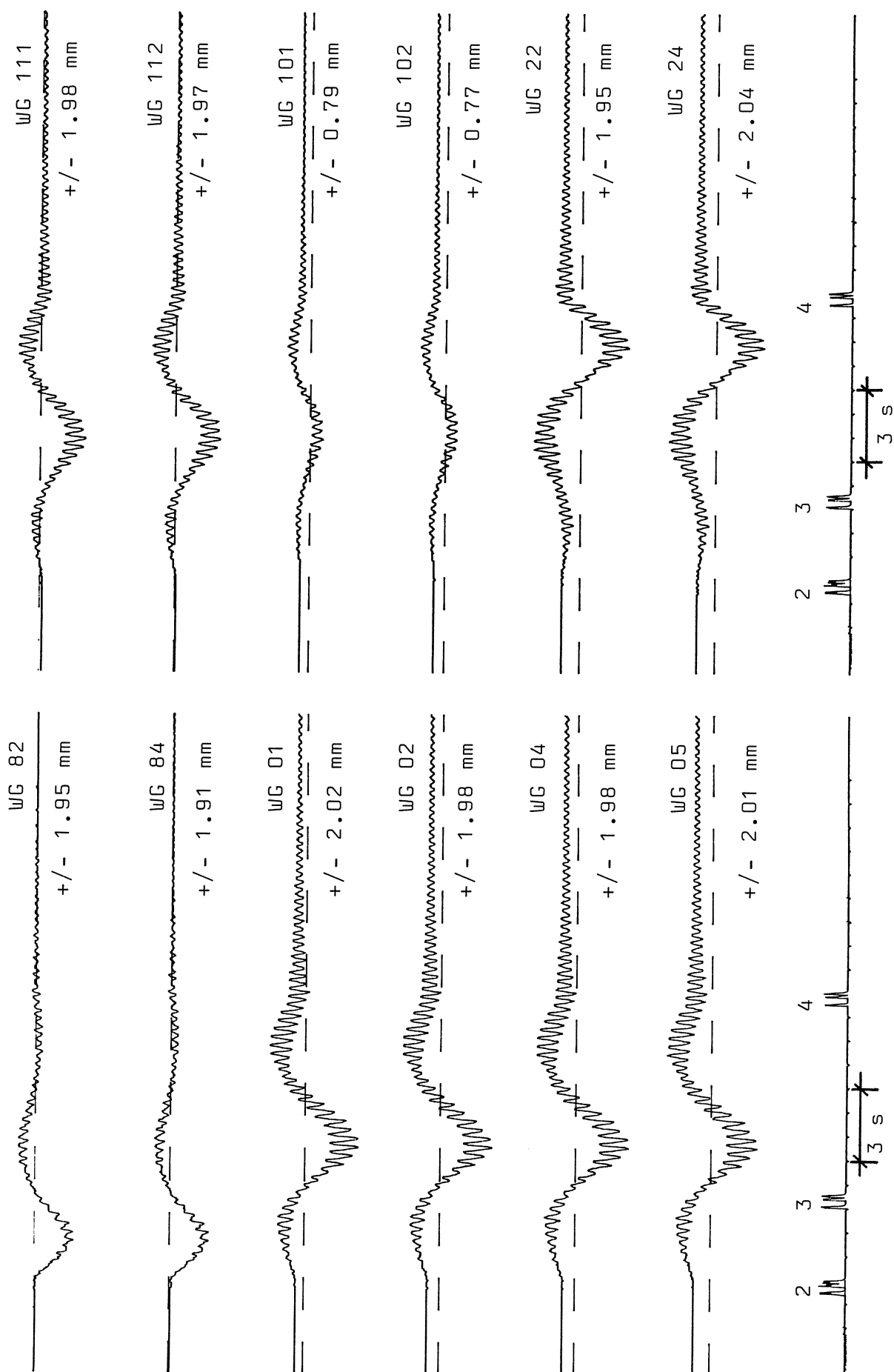
A3.29 bis A3.43:

Versuchsserie 21R10AmB bzw. daraus die Fahrt mit $v = 11.82$ km/h

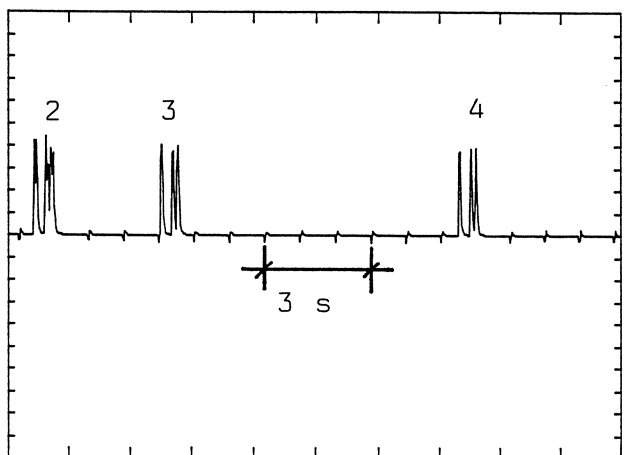
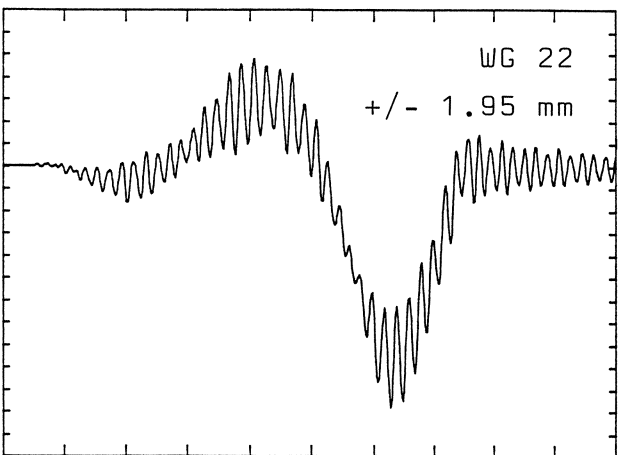
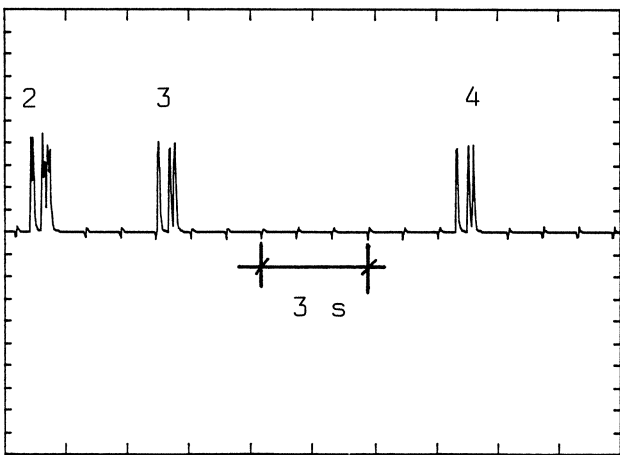
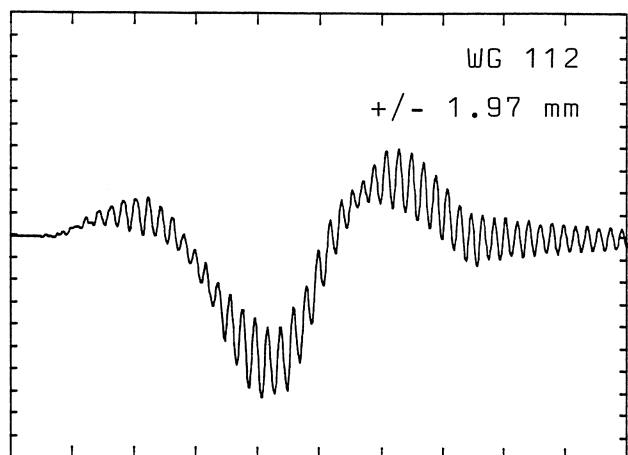
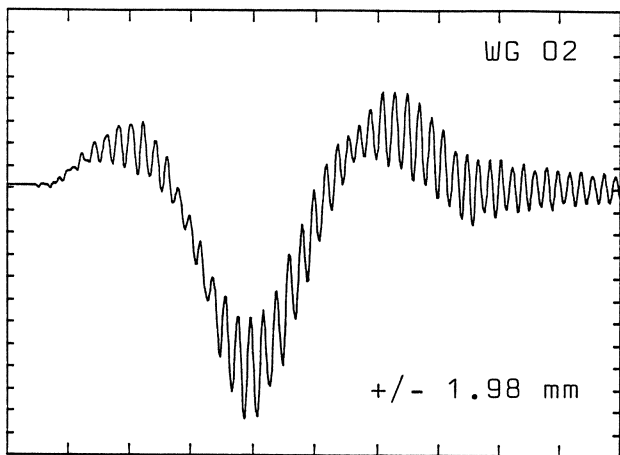
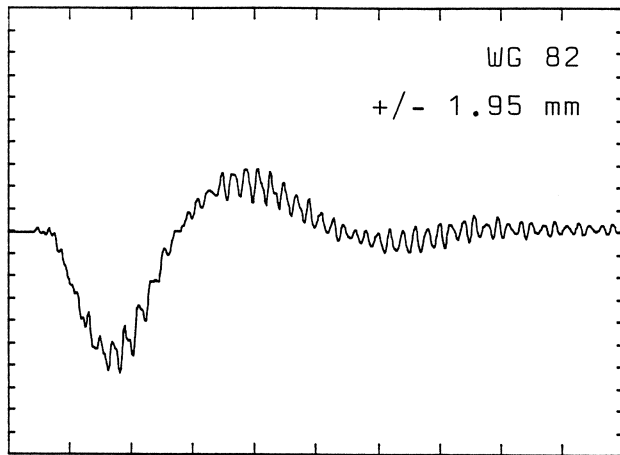
A3.44 bis A3.56:

Versuchsserie 21R10KMB bzw. daraus die Fahrt mit $v = 12.73$ km/h

Versuch Nr. 5335, 21R10AoB, $v = 33.20$ km/h, Durchbiegungen



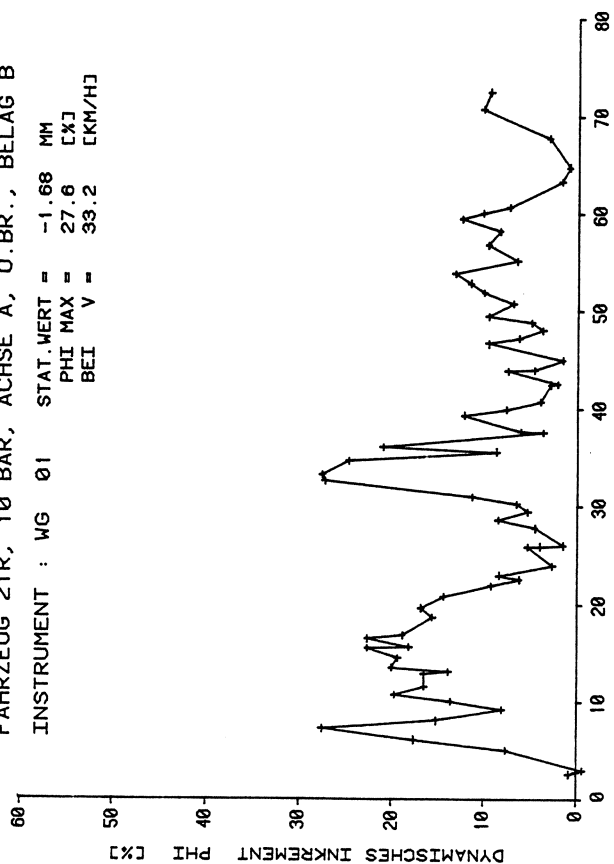
Versuch Nr. 5335, 21R10AoB, $v = 33.20$ km/h, Durchbiegungen



Versuchsserie 21R10AoB, Durchbiegungen

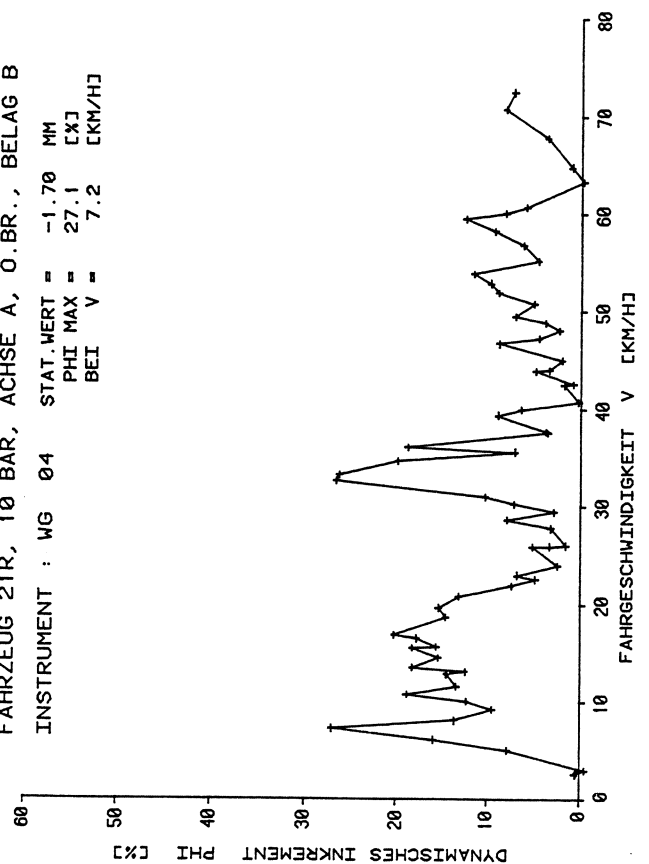
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 01 STAT.WERT = -1.68 MM
 PHI MAX = 27.6 [%]
 BEI V = 33.2 [KM/H]



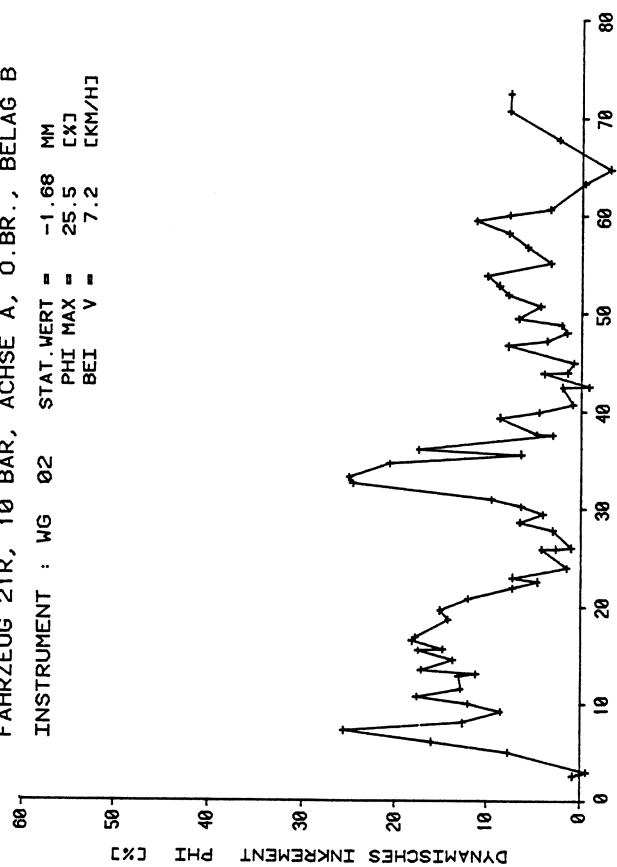
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 04 STAT.WERT = -1.70 MM
 PHI MAX = 27.1 [%]
 BEI V = 7.2 [KM/H]



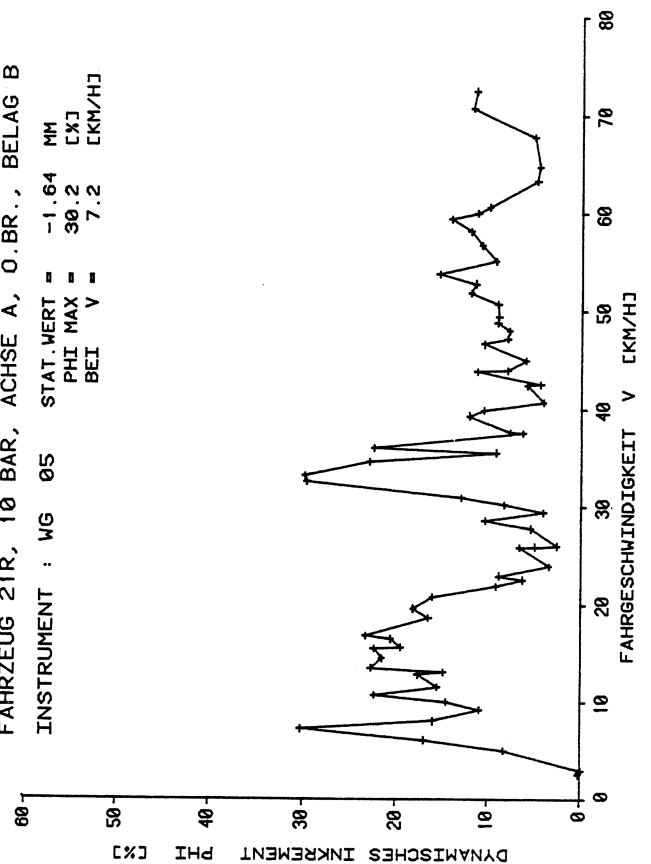
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 02 STAT.WERT = -1.68 MM
 PHI MAX = 25.5 [%]
 BEI V = 7.2 [KM/H]



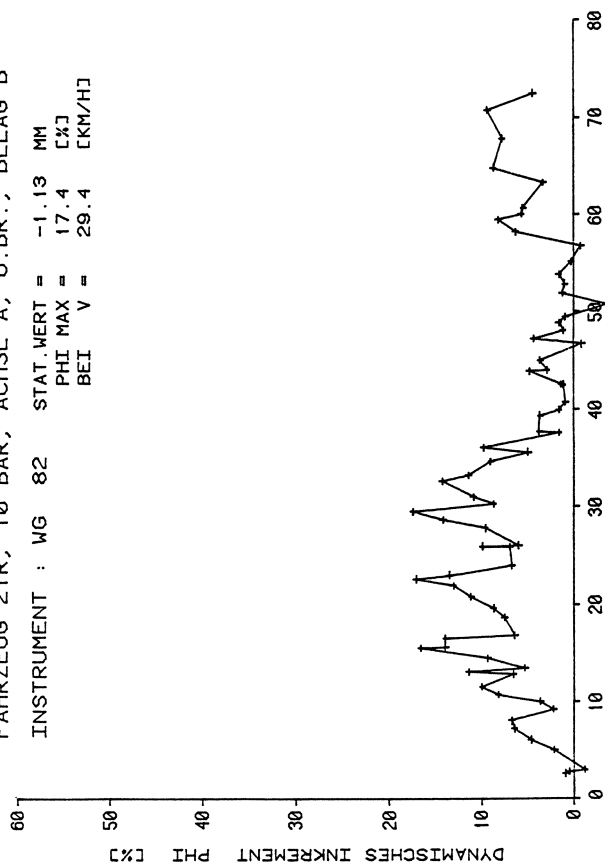
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 05 STAT.WERT = -1.64 MM
 PHI MAX = 30.2 [%]
 BEI V = 7.2 [KM/H]

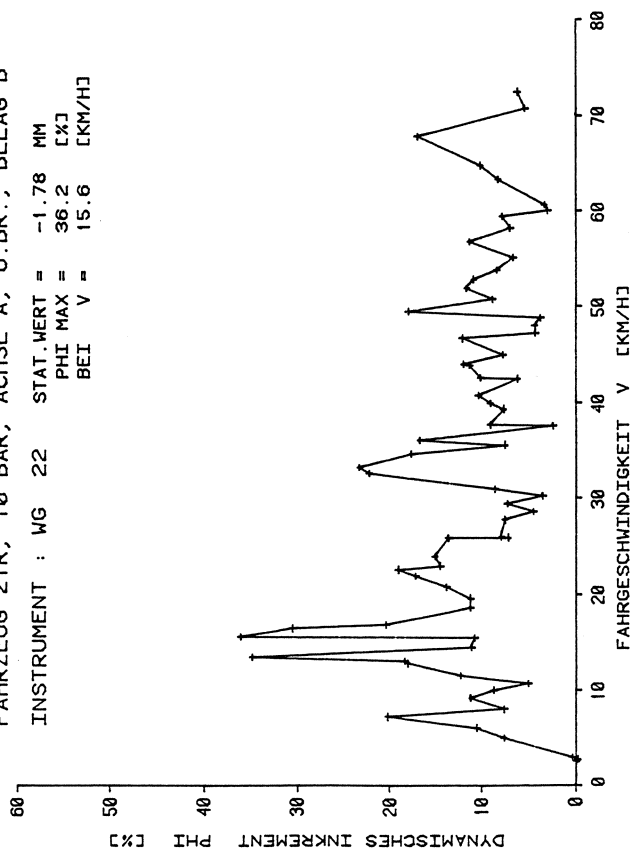


Versuchsserie 21R10AoB, Durchbiegungen

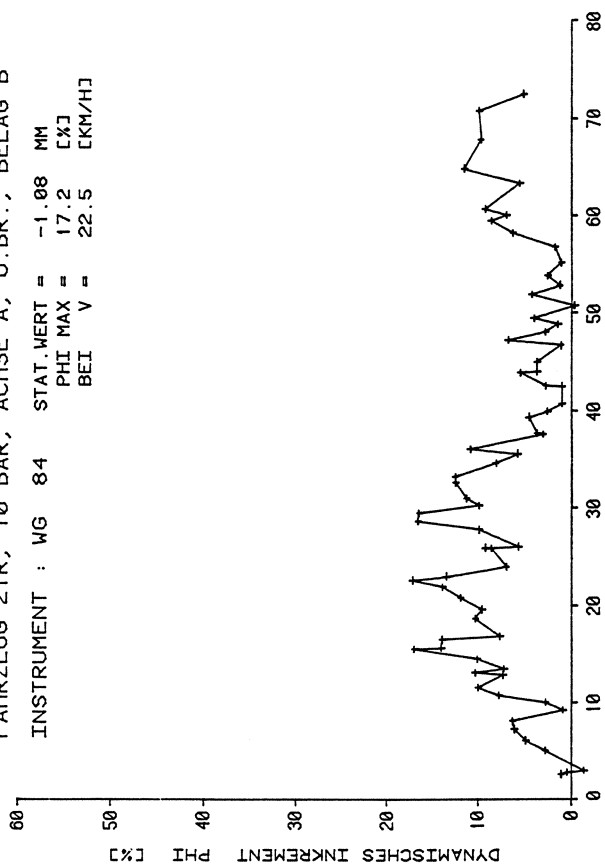
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 82 STAT.WERT = -1.13 MM
PHI MAX = 17.4 [%]
BEI V = 29.4 [KM/H]



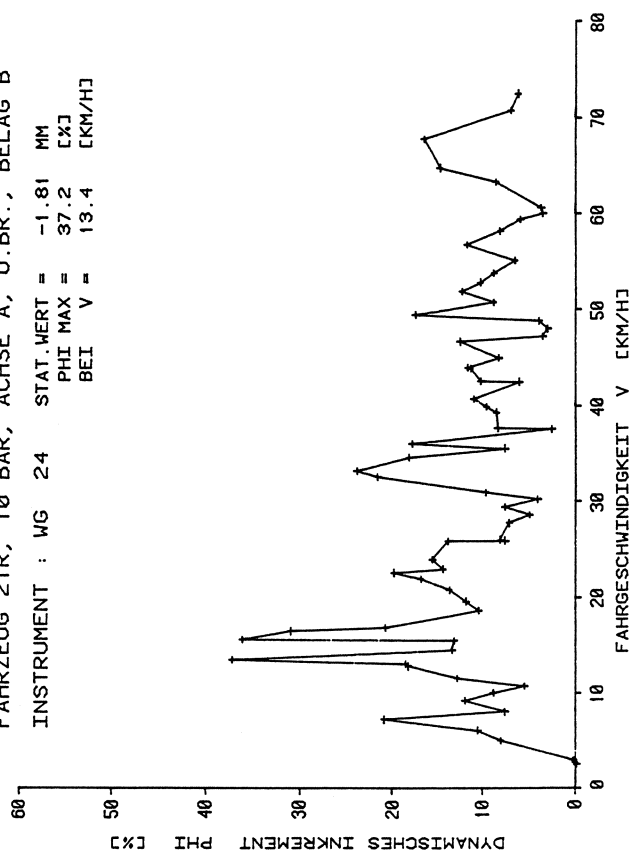
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 22 STAT.WERT = -1.78 MM
PHI MAX = 36.2 [%]
BEI V = 15.6 [KM/H]



FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 84 STAT.WERT = -1.08 MM
PHI MAX = 17.2 [%]
BEI V = 22.5 [KM/H]



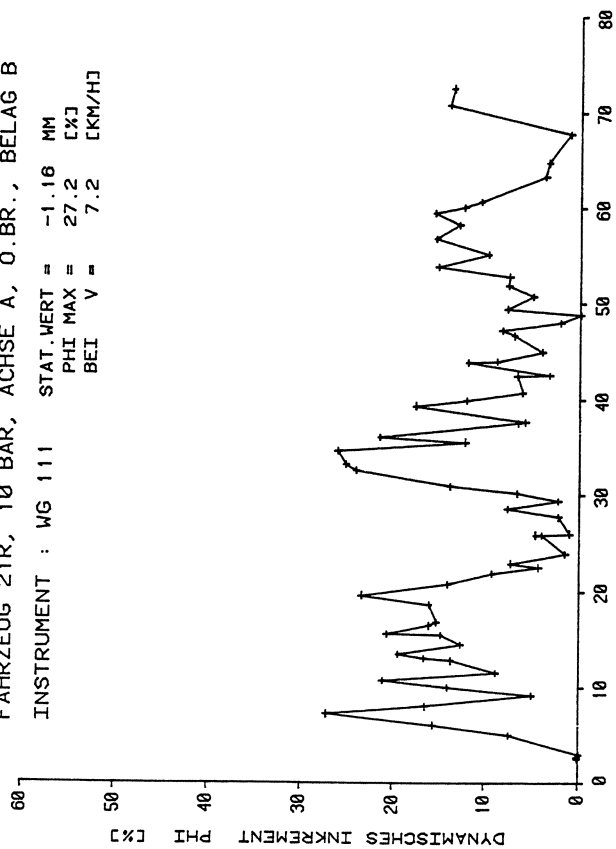
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 24 STAT.WERT = -1.81 MM
PHI MAX = 37.2 [%]
BEI V = 13.4 [KM/H]



Versuchsserie 21R10AoB, Durchbiegungen

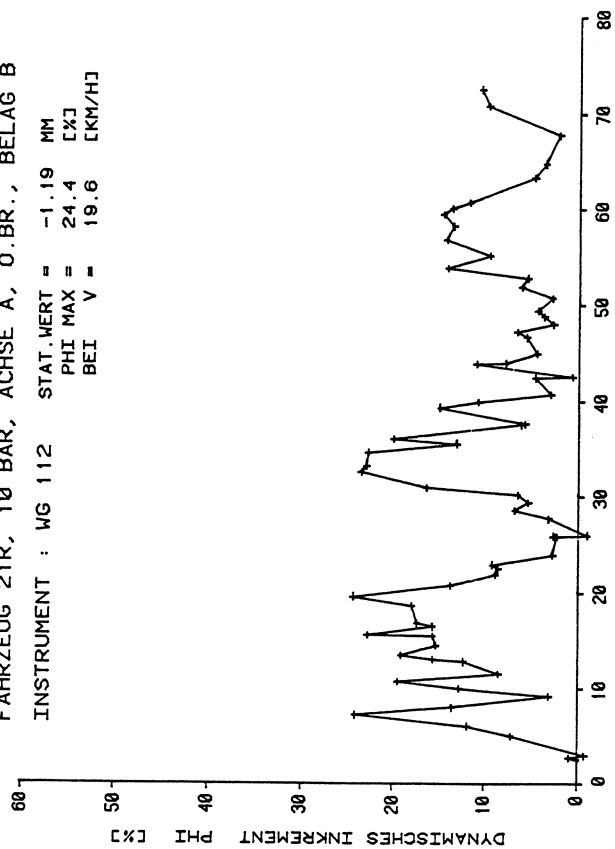
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 111 STAT.WERT = -1.16 MM
 PHI MAX = 27.2 [%]
 BEI V = 7.2 [KM/H]



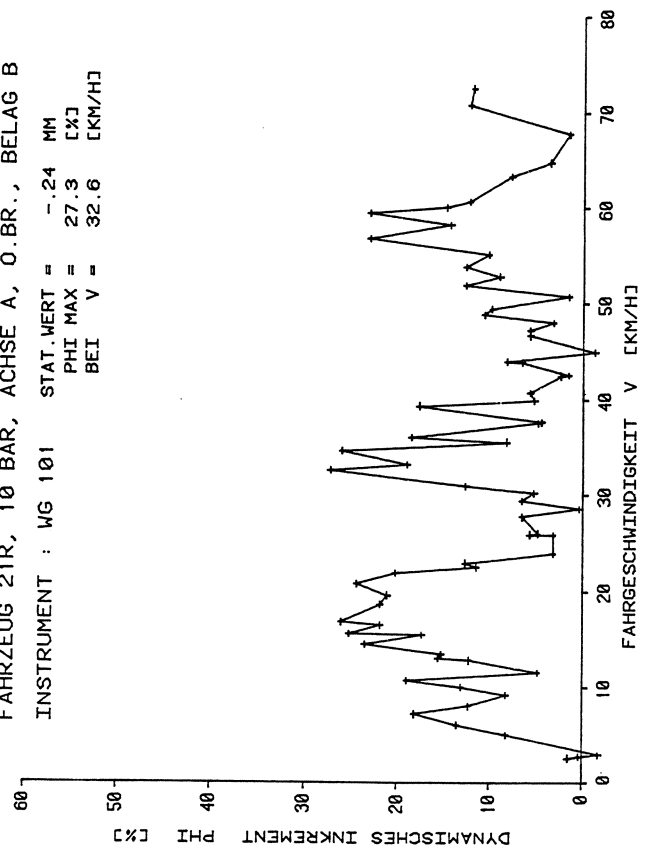
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 112 STAT.WERT = -1.19 MM
 PHI MAX = 24.4 [%]
 BEI V = 19.6 [KM/H]



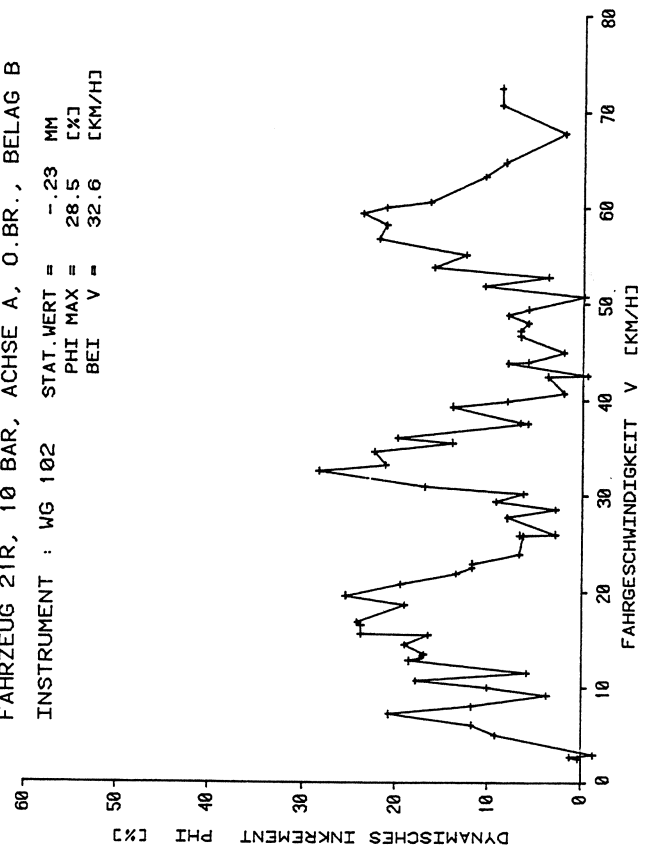
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 101 STAT.WERT = -1.24 MM
 PHI MAX = 27.3 [%]
 BEI V = 32.6 [KM/H]

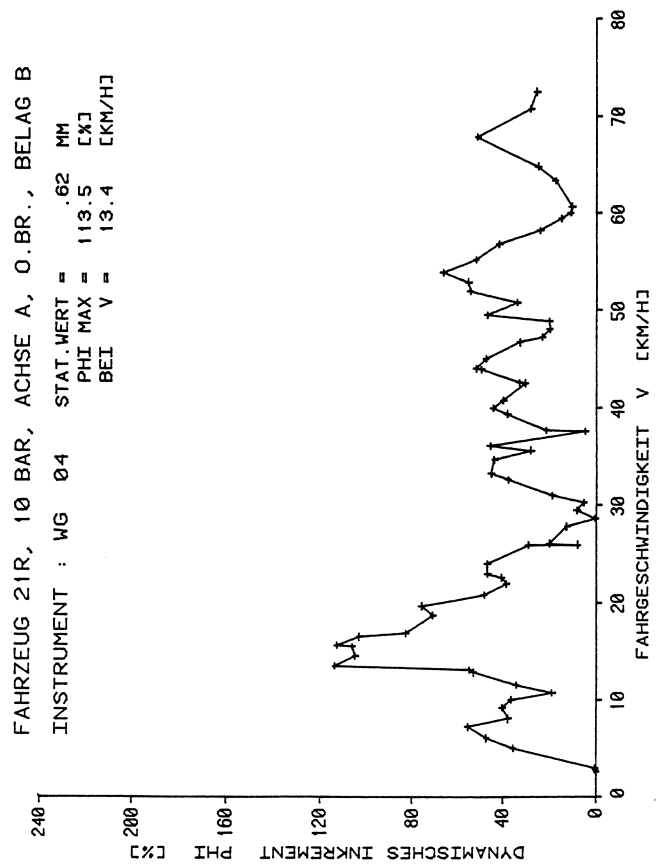
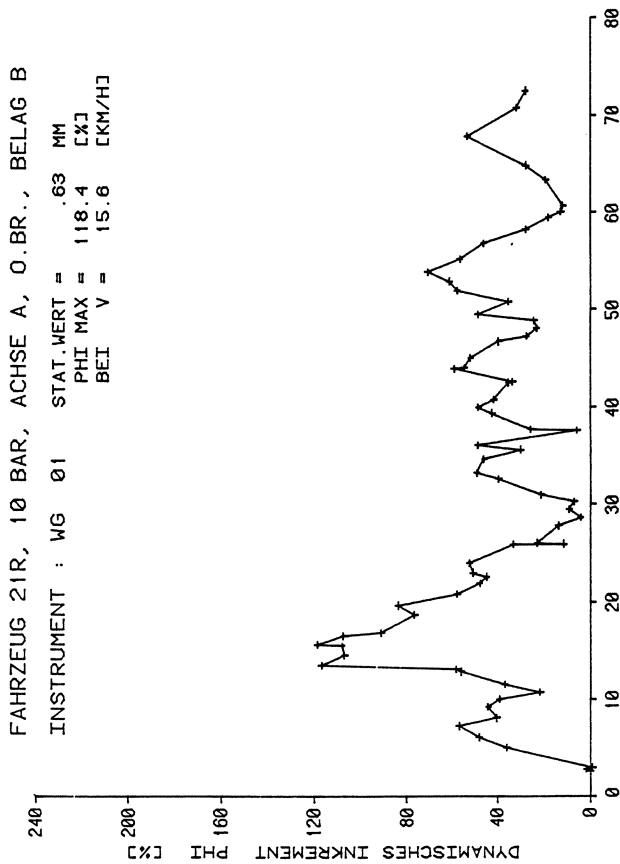
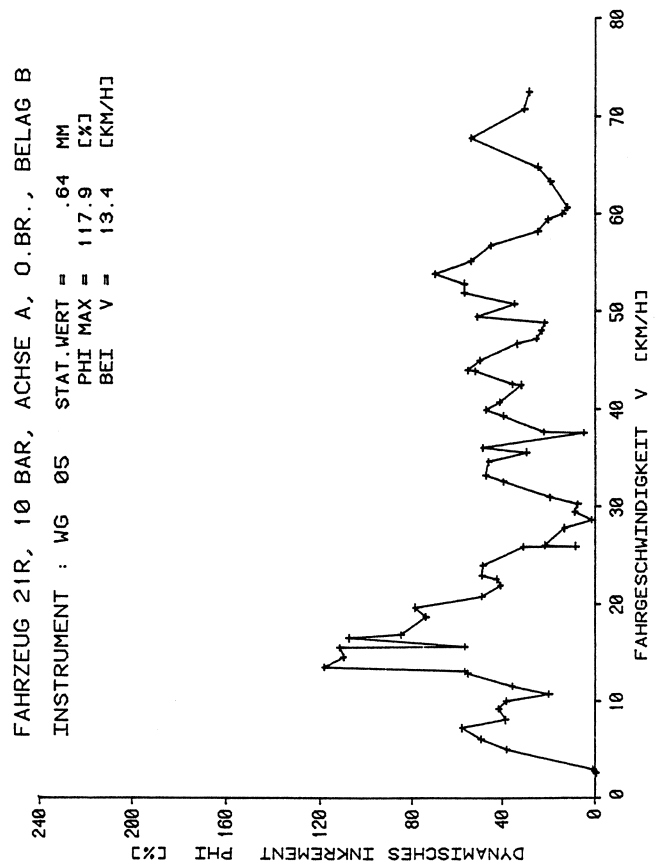
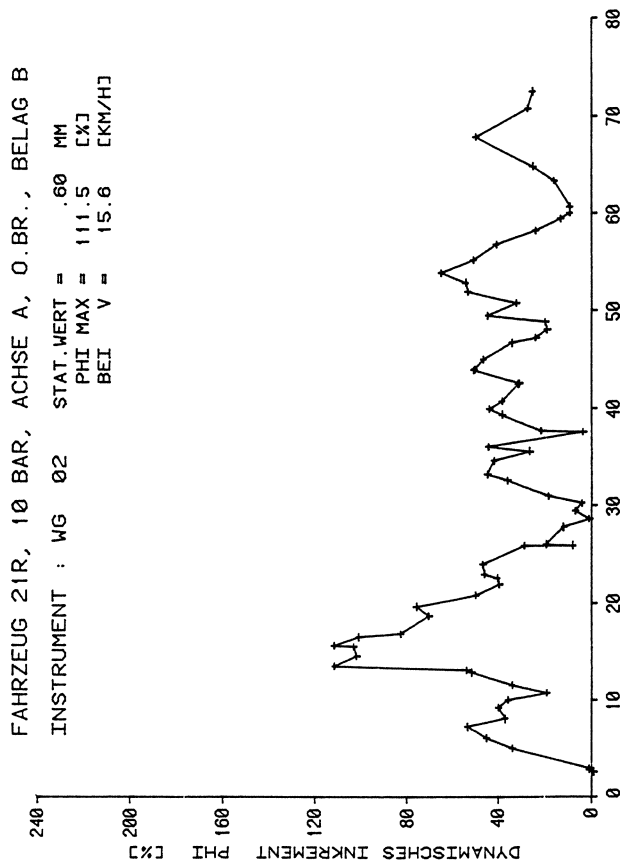


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 102 STAT.WERT = -1.23 MM
 PHI MAX = 28.5 [%]
 BEI V = 32.6 [KM/H]



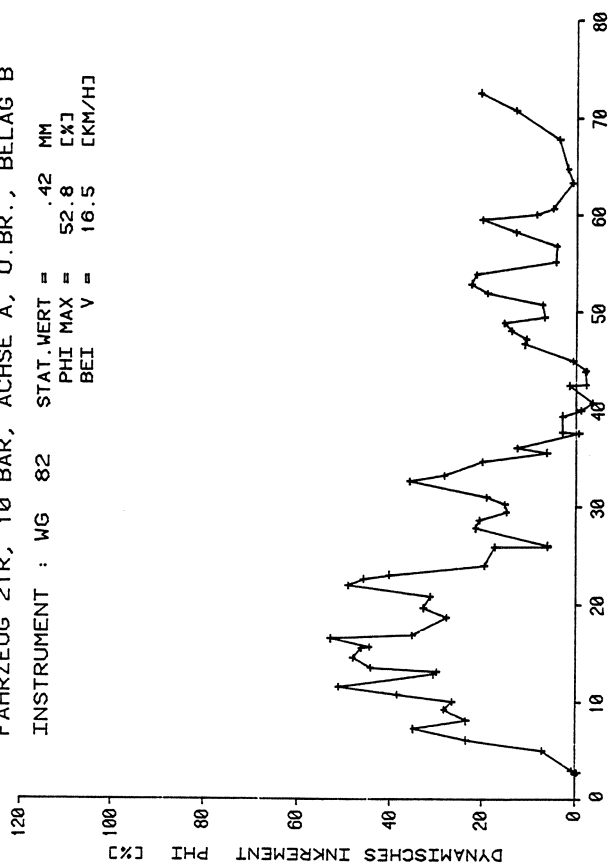
Versuchsserie 21R10AoB, Durchbiegungen



Versuchsserie 21R10AoB, Durchbiegungen

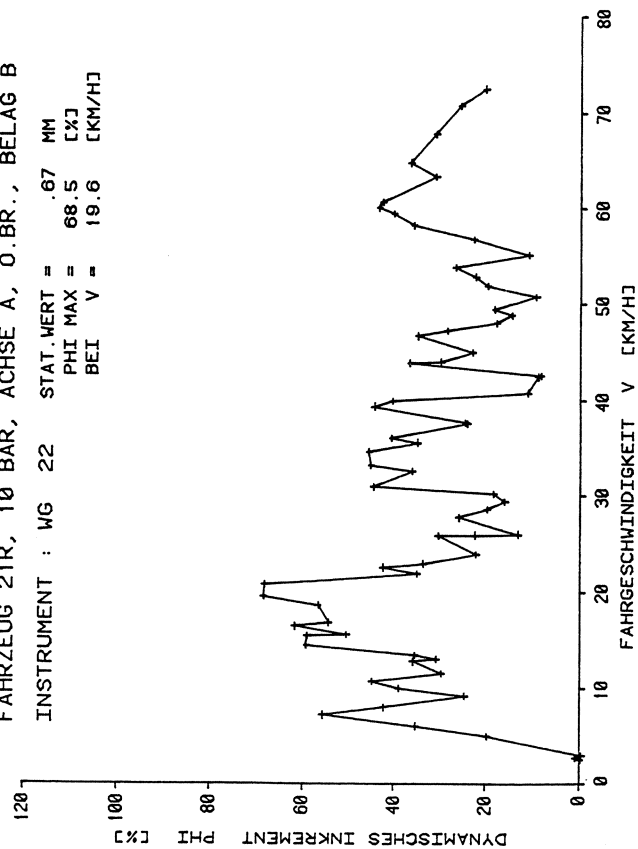
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 82 STAT.WERT = .42 MM
 PHI MAX = 52.8 [%]
 BEI V = 16.5 [KM/H]



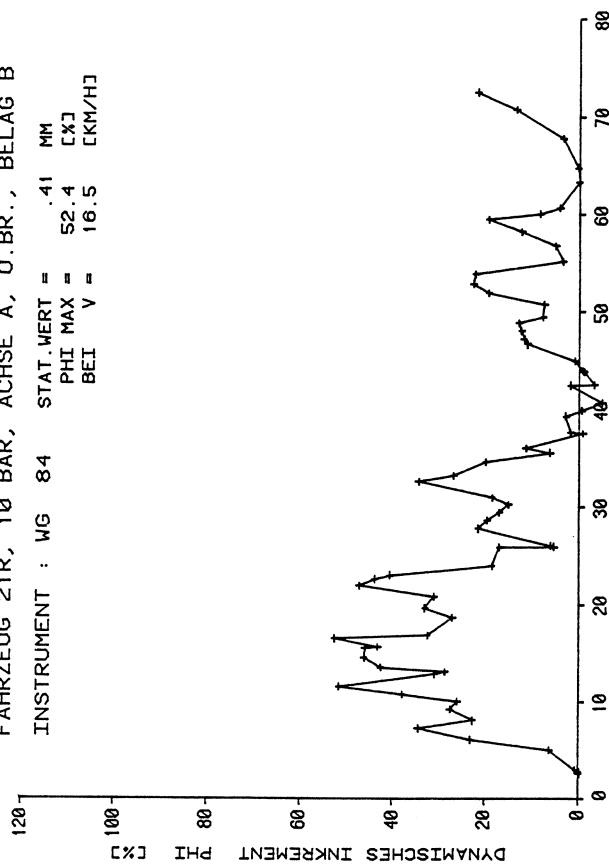
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 22 STAT.WERT = .67 MM
 PHI MAX = 68.5 [%]
 BEI V = 19.6 [KM/H]



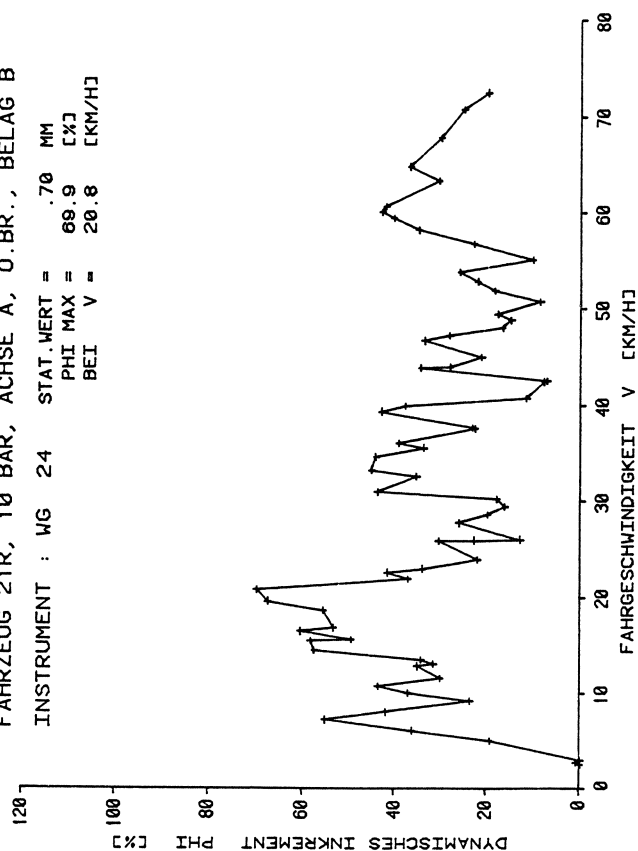
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 84 STAT.WERT = .41 MM
 PHI MAX = 52.4 [%]
 BEI V = 16.5 [KM/H]

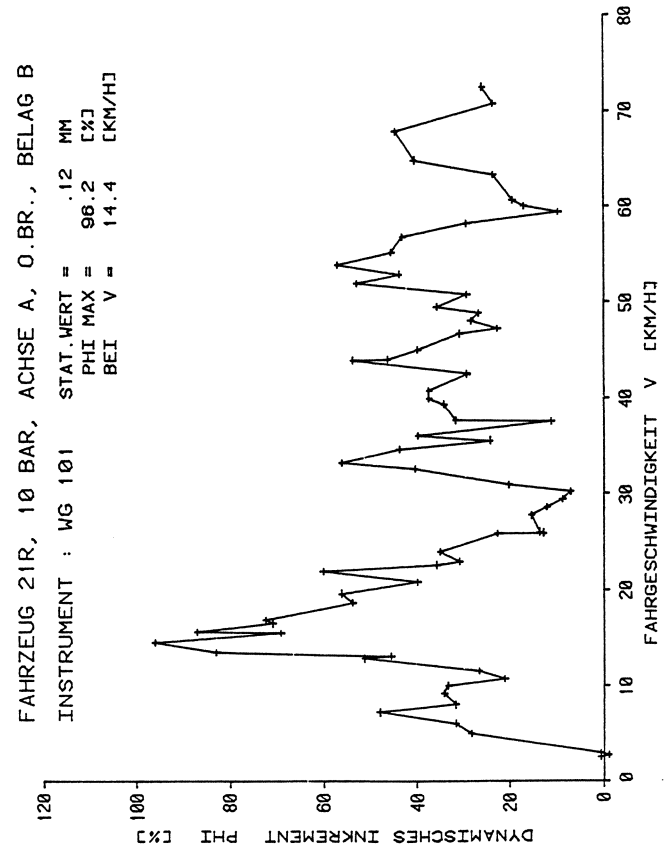
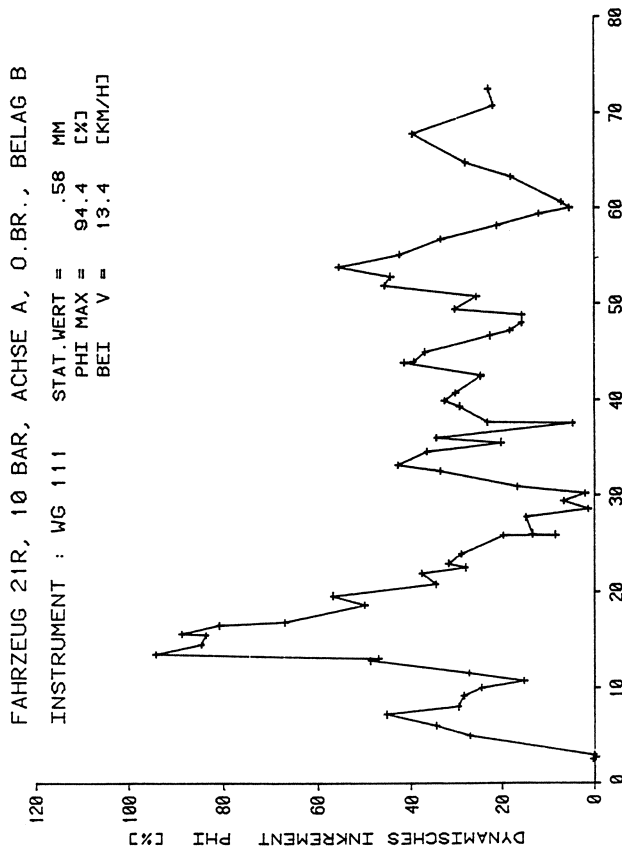
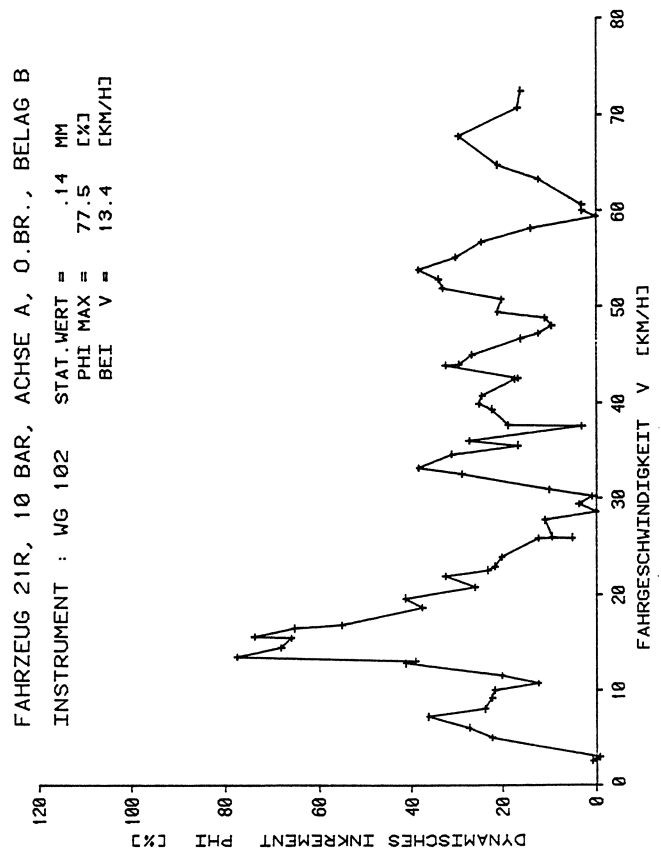
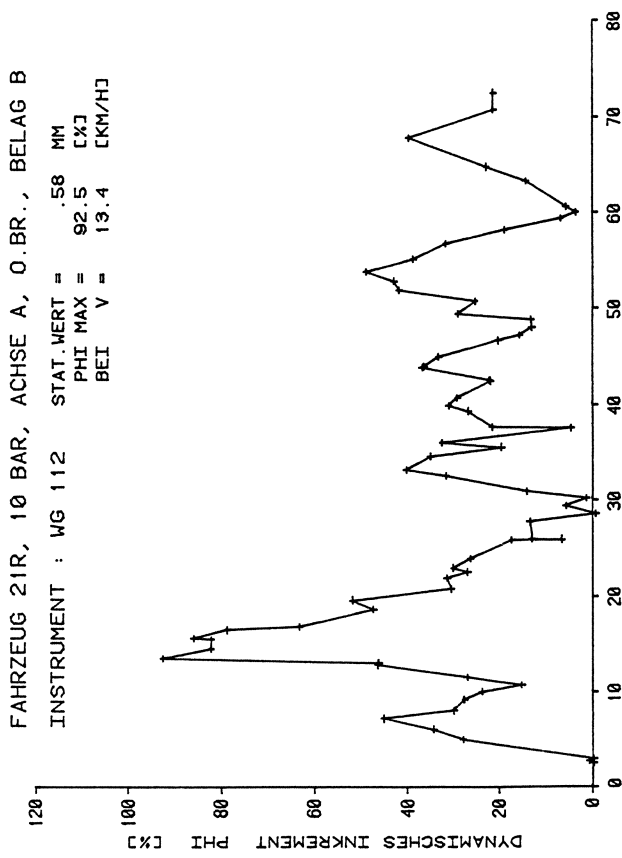


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, O.BR., BELAG B

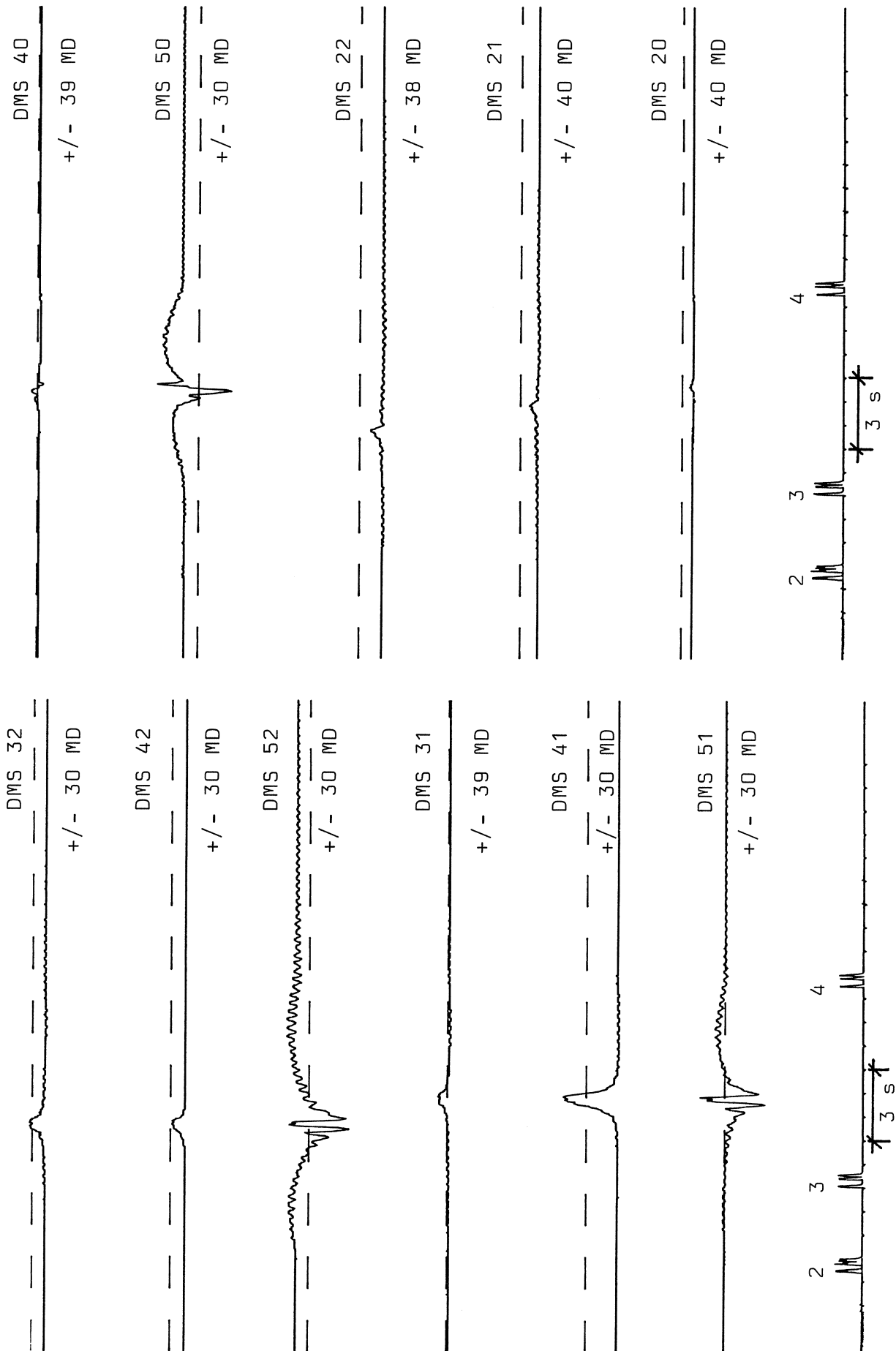
INSTRUMENT : WG 24 STAT.WERT = .70 MM
 PHI MAX = 69.9 [%]
 BEI V = 20.8 [KM/H]



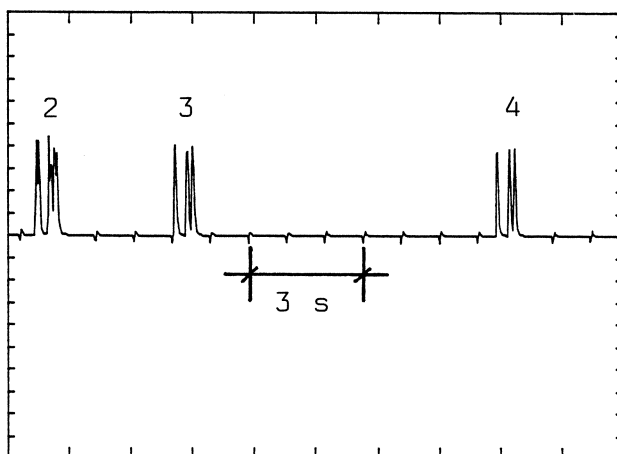
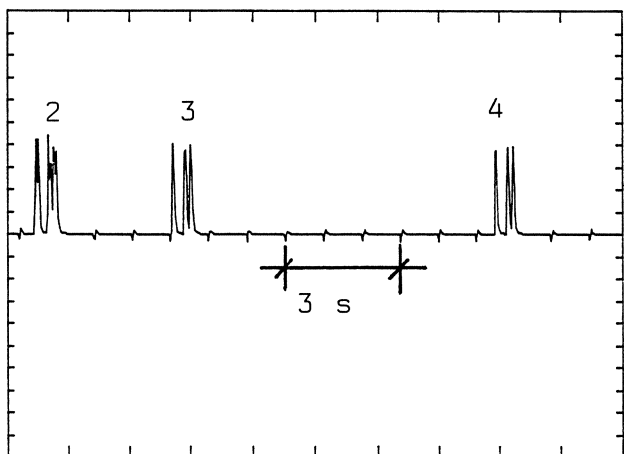
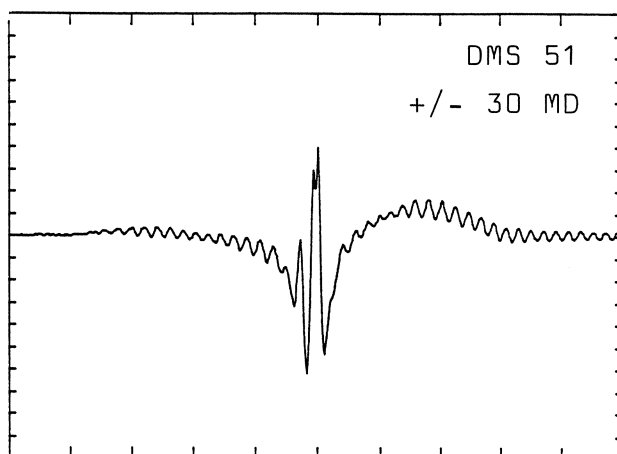
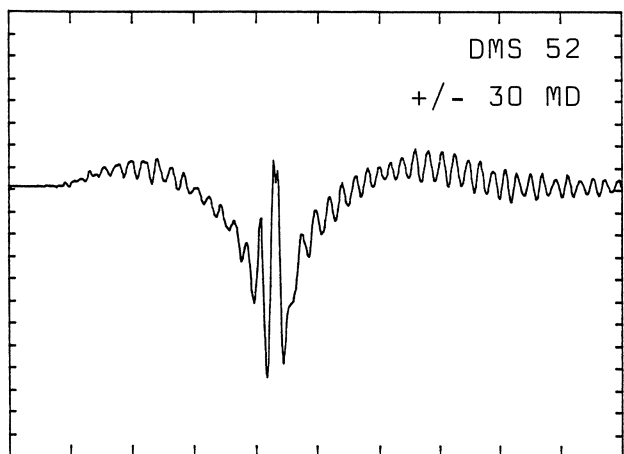
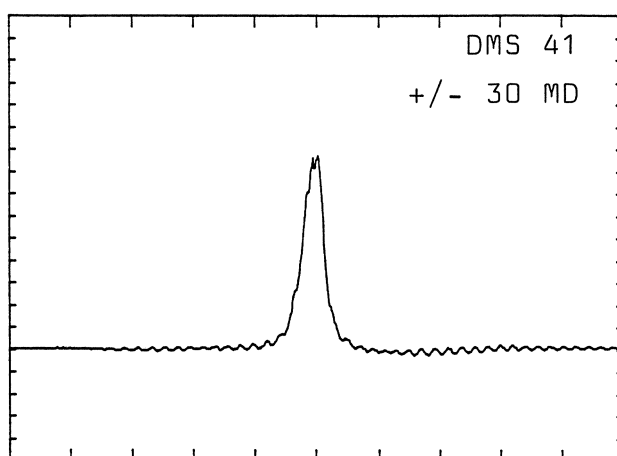
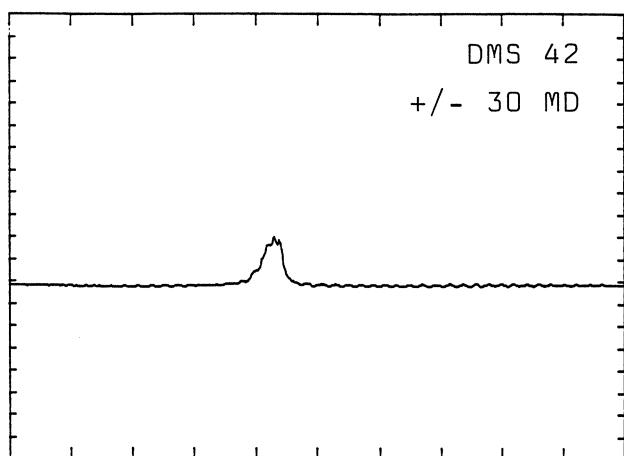
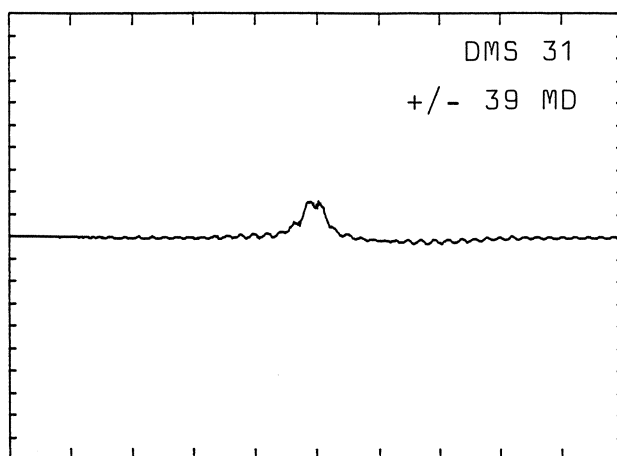
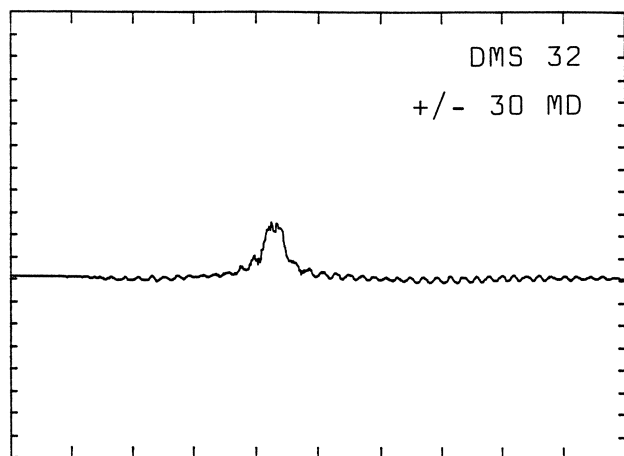
Versuchsserie 21R10AoB, Durchbiegungen



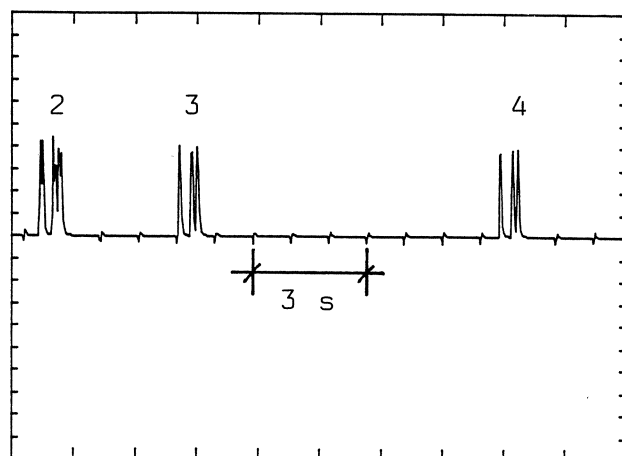
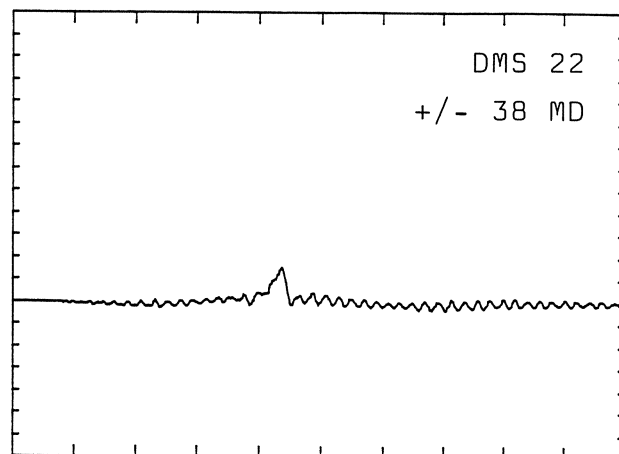
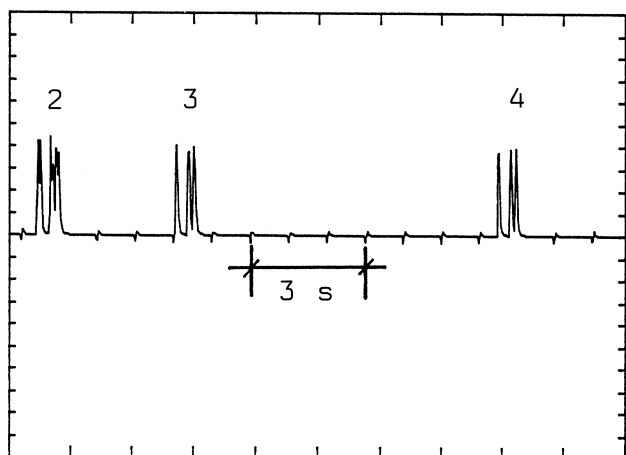
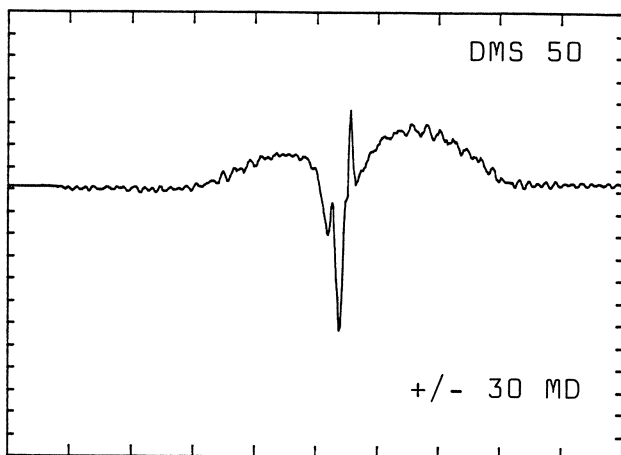
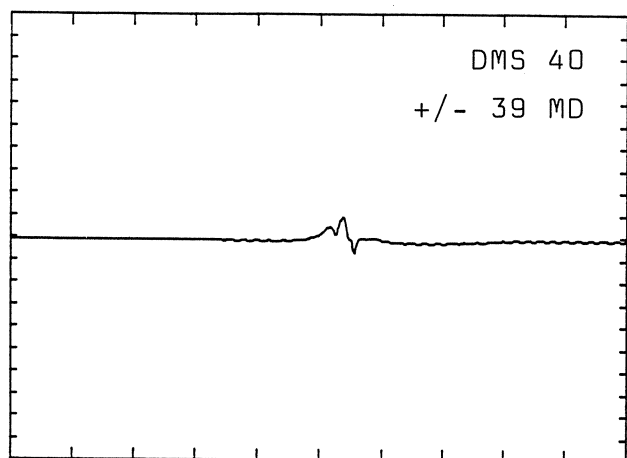
Versuch Nr. 5335, 21R10AoB, $v = 33.20 \text{ km/h}$, Dehnungen

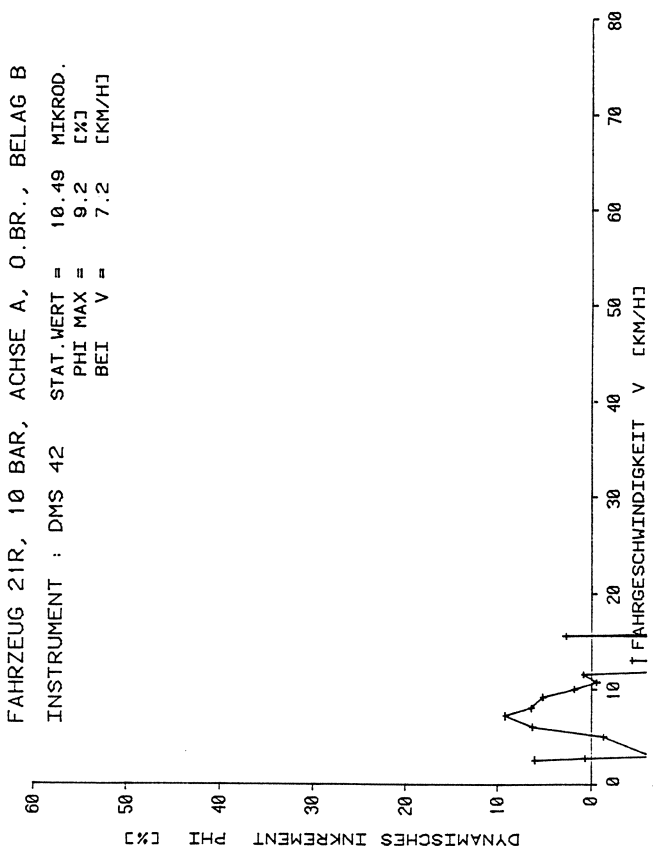
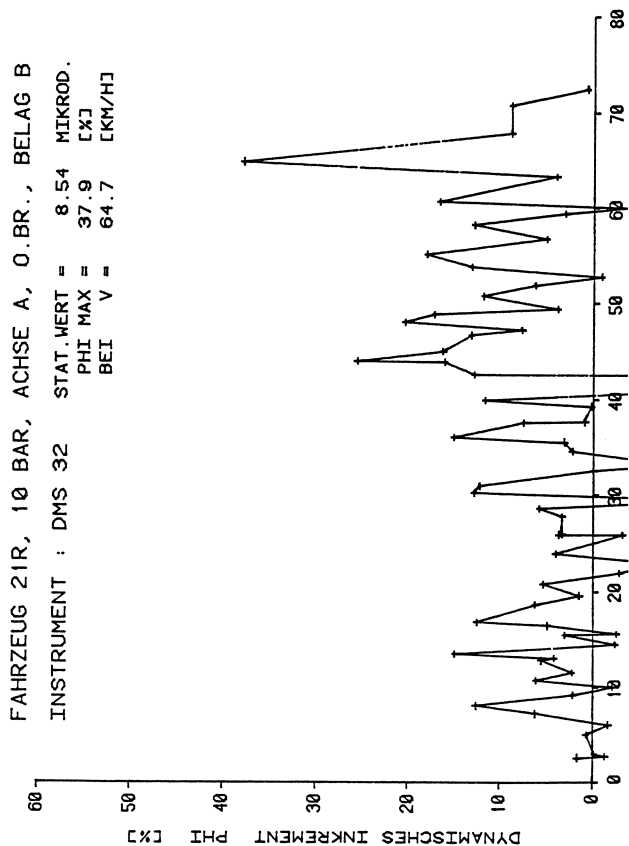
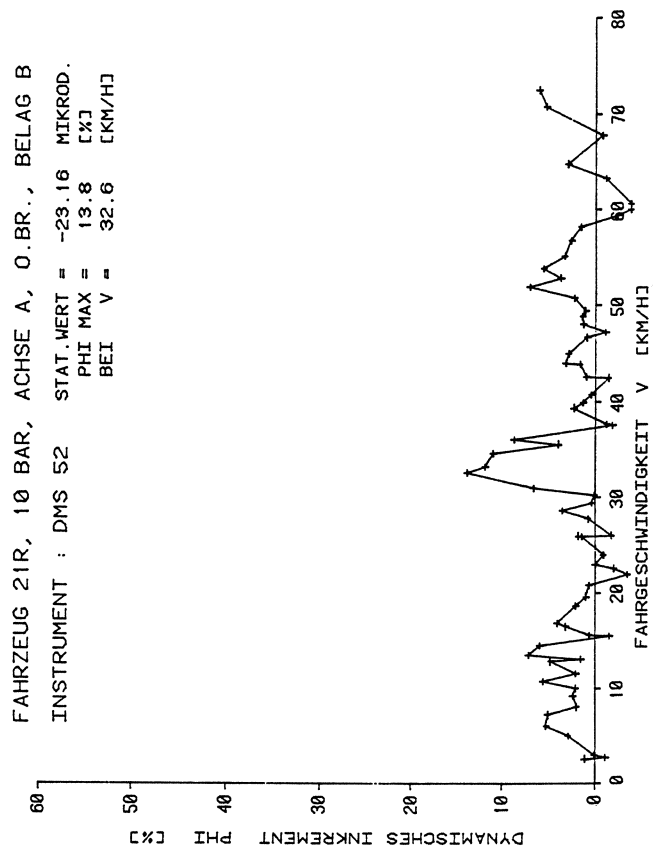
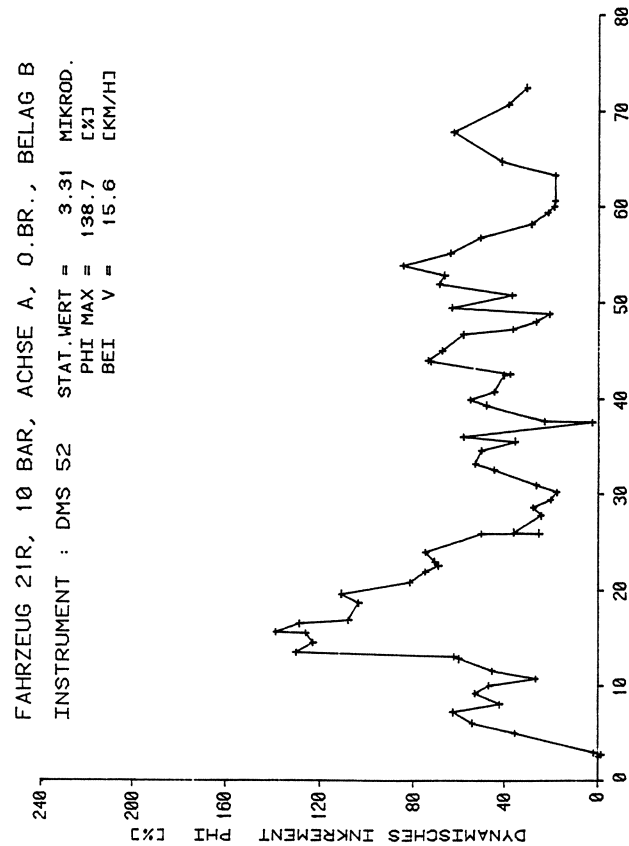


Versuch Nr. 5335, 21R10AoB, $v = 33.20$ km/h, Dehnungen



Versuch Nr. 5335, 21R10AoB, $v = 33.20$ km/h, Dehnungen

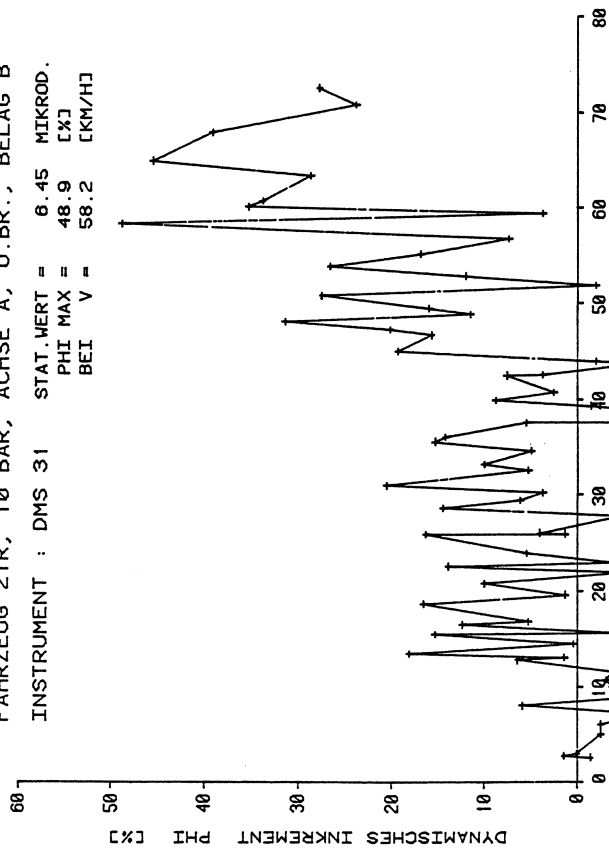




Versuchsserie 21R10AoB, Dehnungen

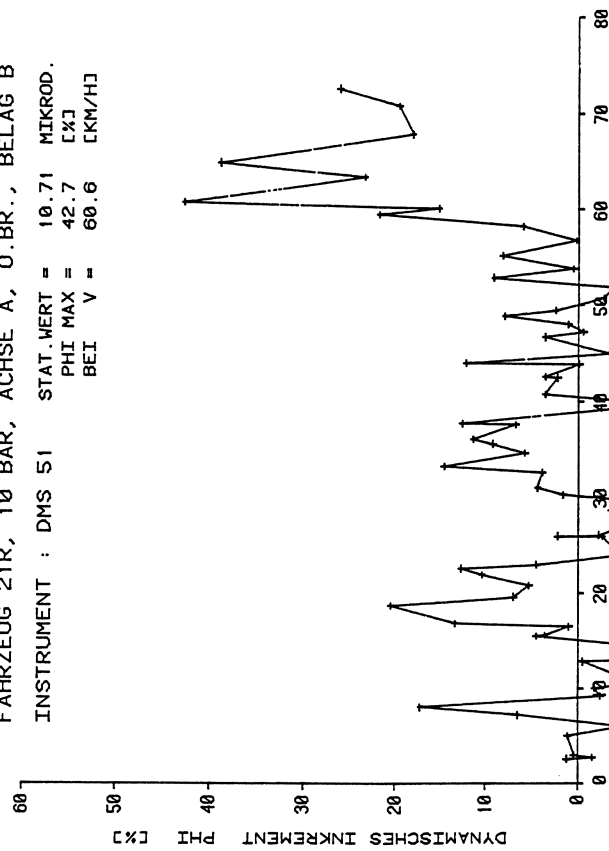
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B

INSTRUMENT : DMS 31 STAT.WERT = 6.45 MIKROD.
 PHI MAX = 48.9 [%]
 BEI V = 58.2 [KM/H]



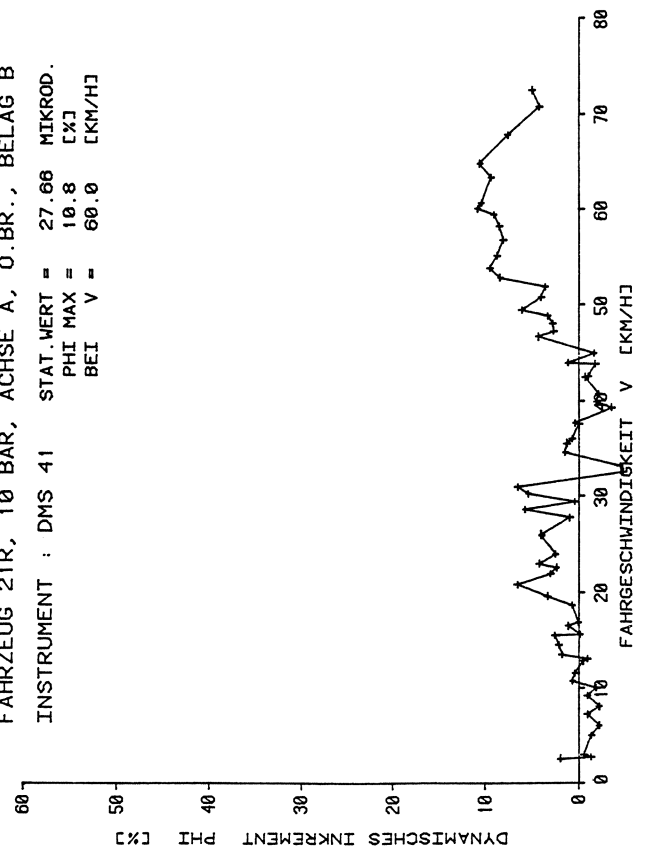
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B

INSTRUMENT : DMS 51 STAT.WERT = 10.71 MIKROD.
 PHI MAX = 42.7 [%]
 BEI V = 60.6 [KM/H]



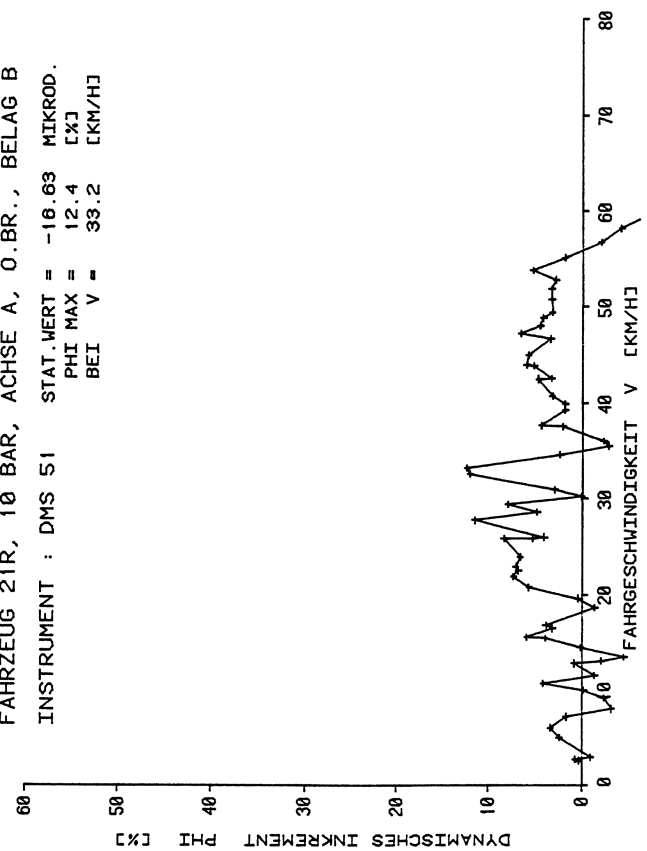
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B

INSTRUMENT : DMS 41 STAT.WERT = 27.66 MIKROD.
 PHI MAX = 10.8 [%]
 BEI V = 60.0 [KM/H]

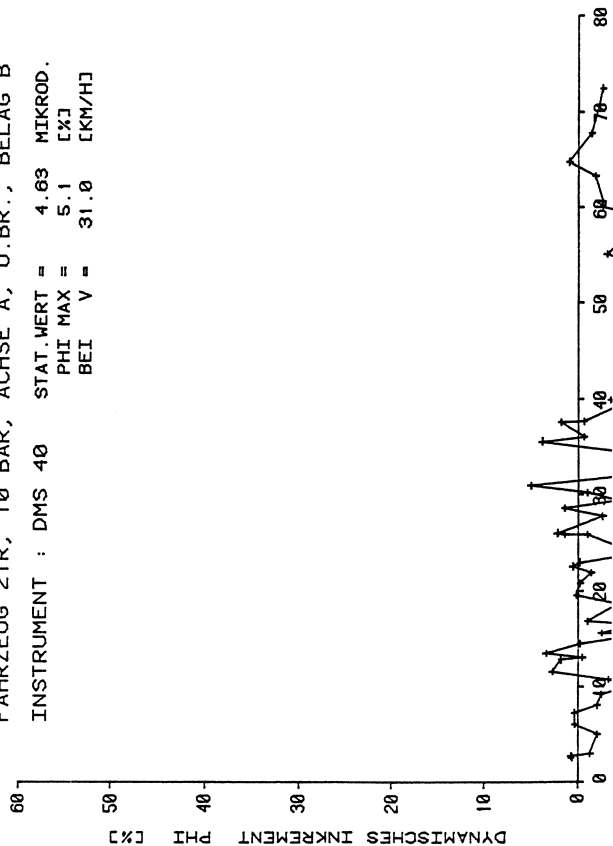


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B

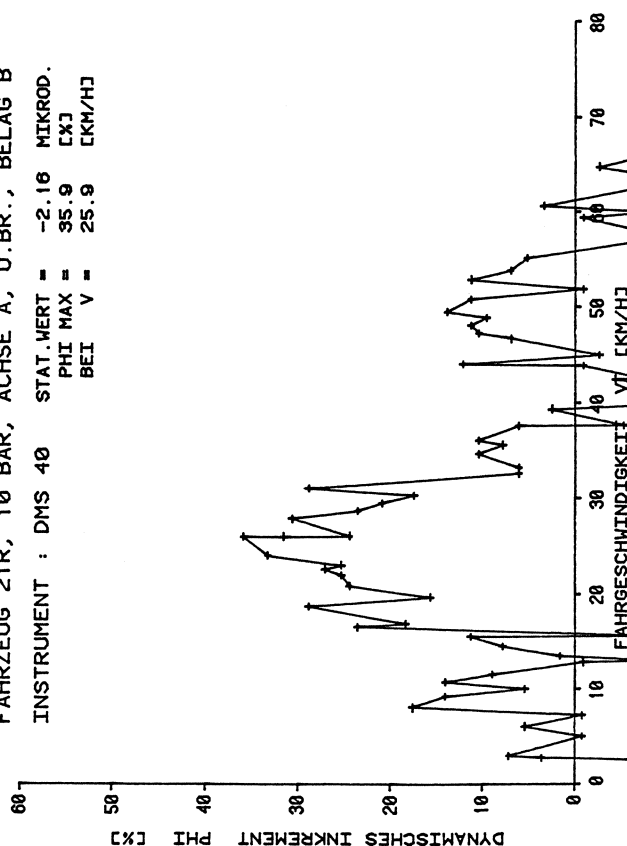
INSTRUMENT : DMS 51 STAT.WERT = -16.63 MIKROD.
 PHI MAX = 12.4 [%]
 BEI V = 33.2 [KM/H]



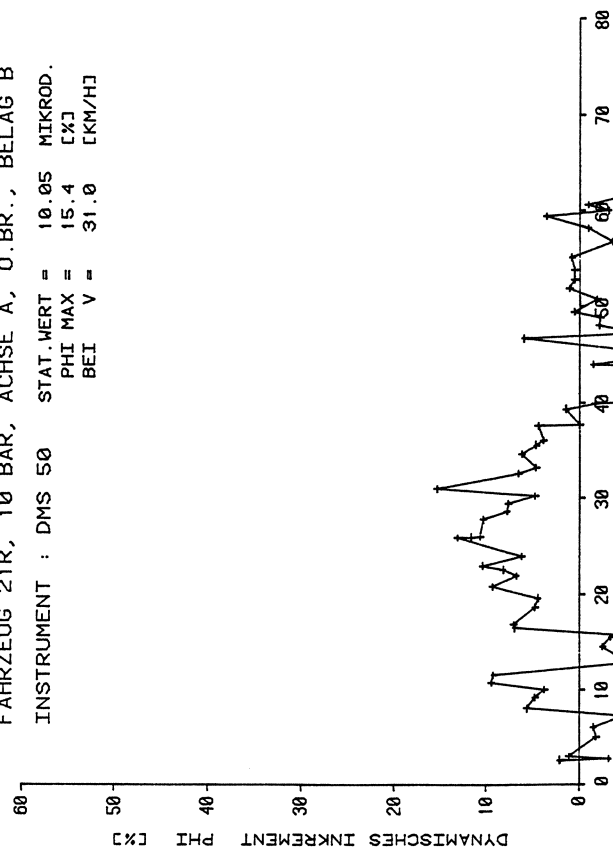
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 40 STAT.WERT = 4.63 MIKROD.
PHI MAX = 5.1 [%]
BEI V = 31.0 [KM/H]



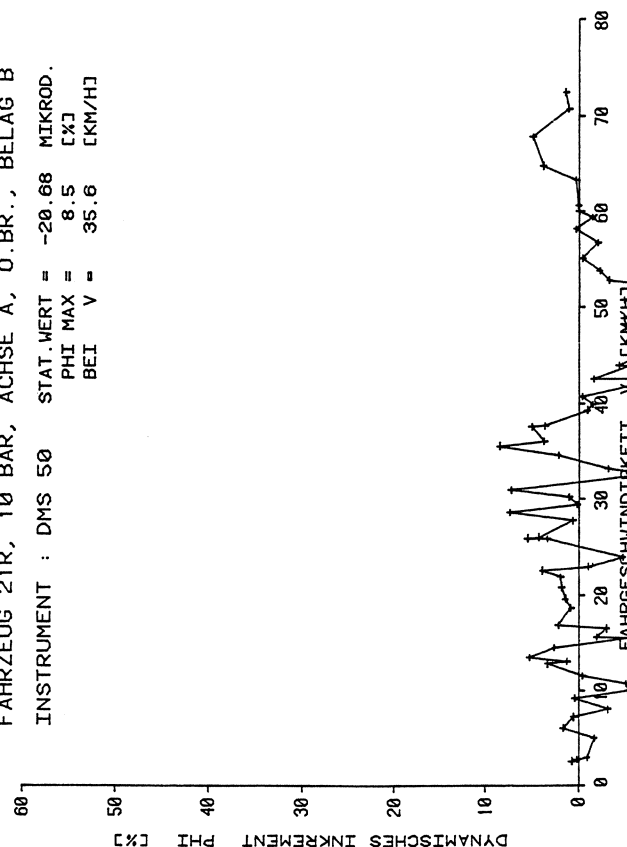
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 40 STAT.WERT = -2.16 MIKROD.
PHI MAX = 35.9 [%]
BEI V = 25.9 [KM/H]

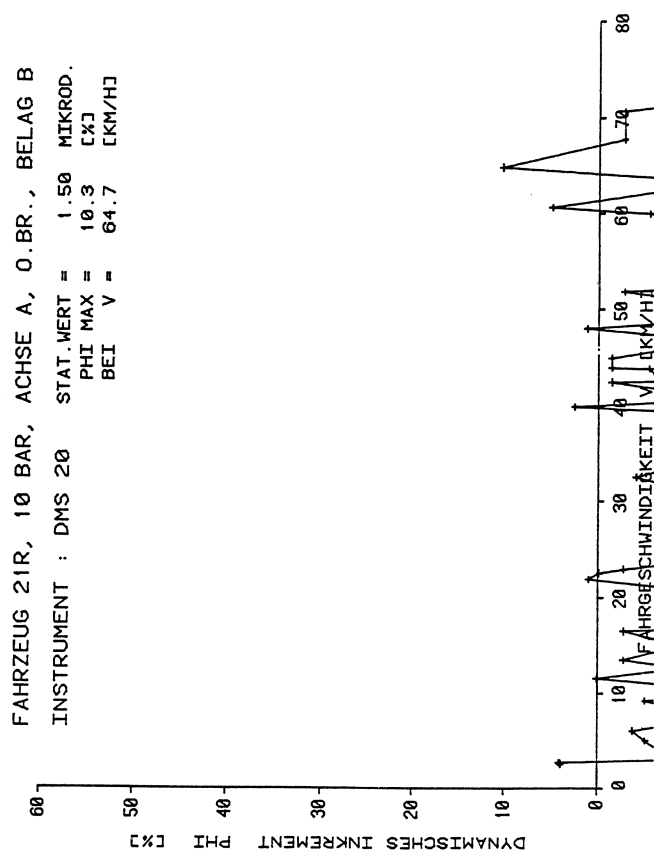
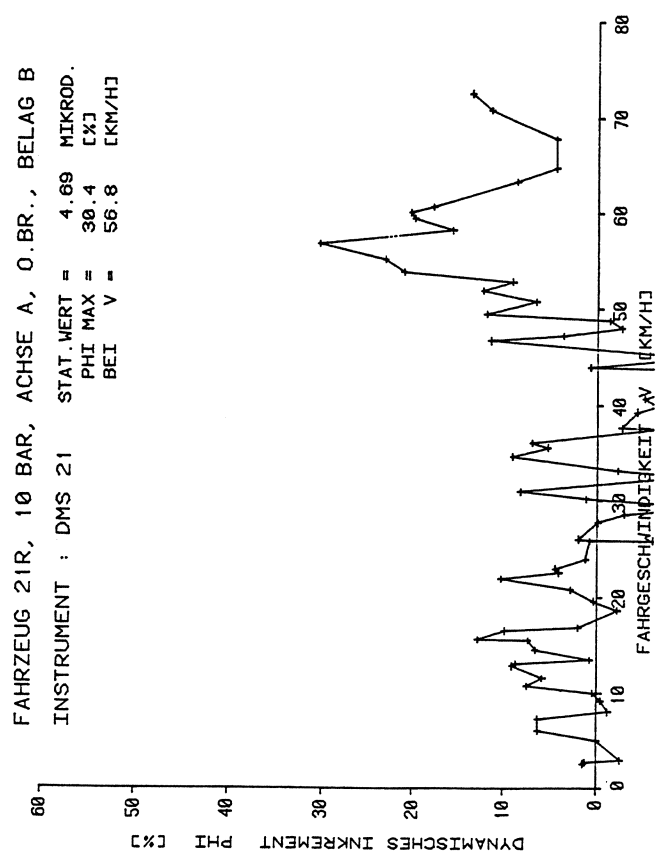
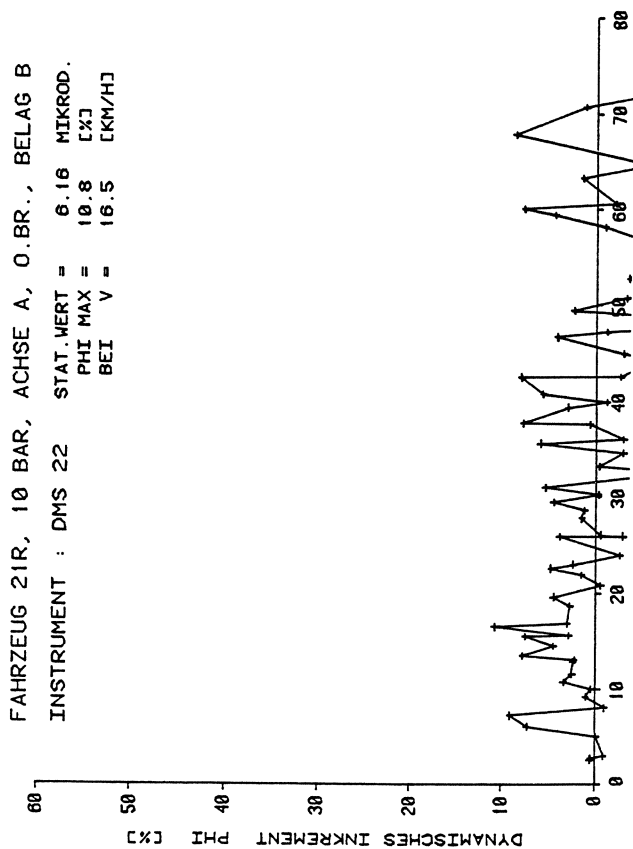


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 50 STAT.WERT = 10.05 MIKROD.
PHI MAX = 15.4 [%]
BEI V = 31.0 [KM/H]

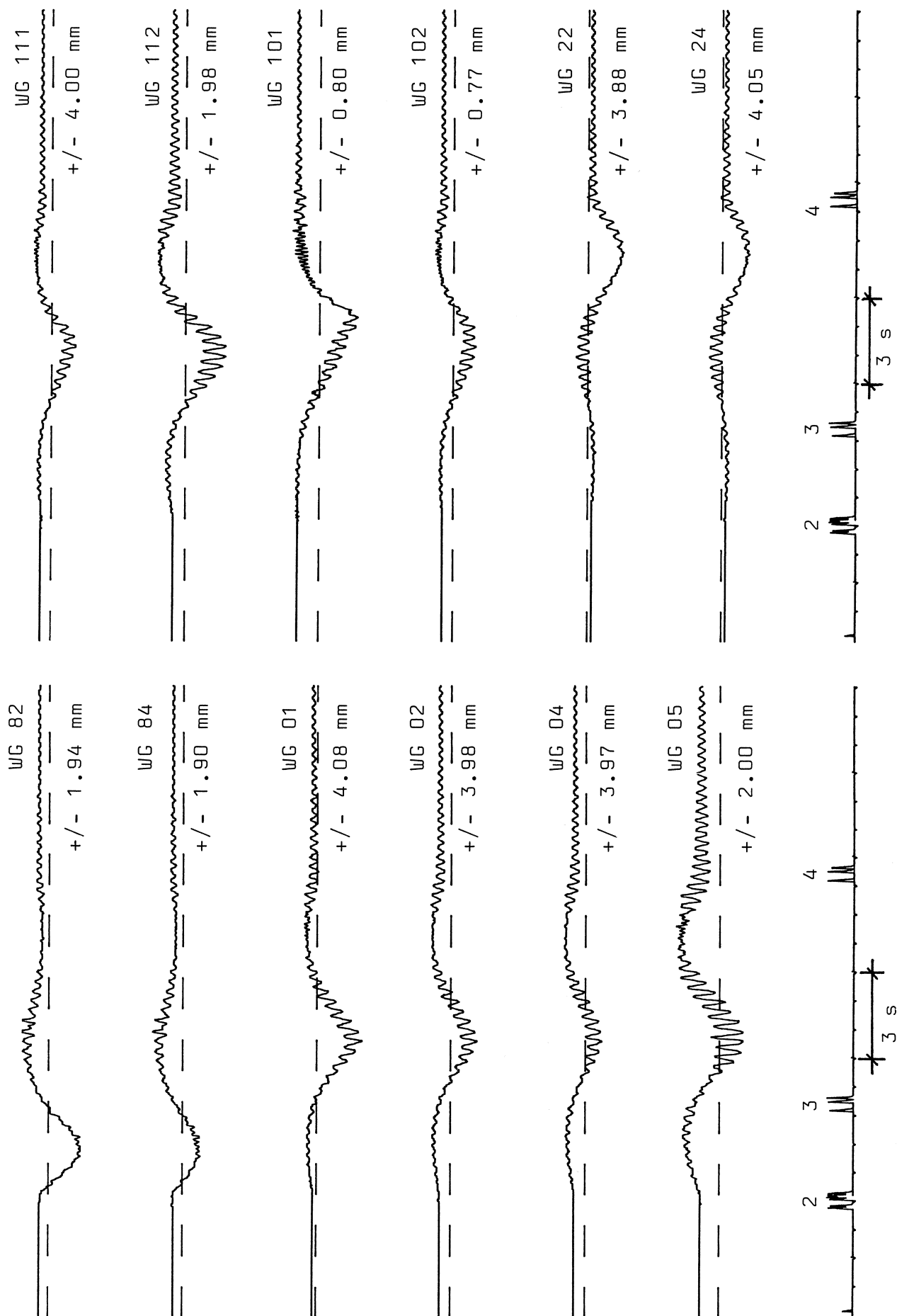


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, 0.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 50 STAT.WERT = -20.68 MIKROD.
PHI MAX = 8.5 [%]
BEI V = 35.6 [KM/H]

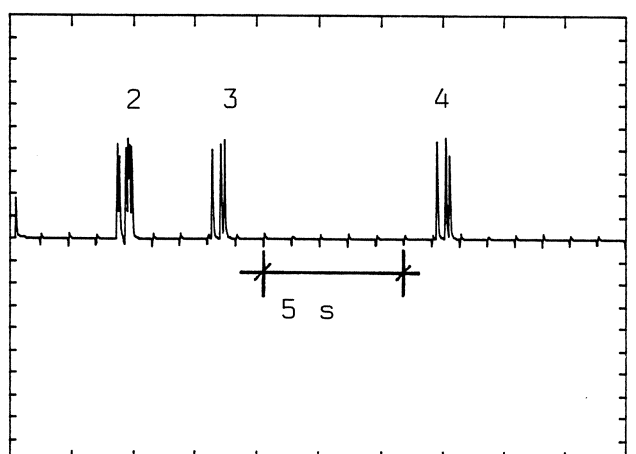
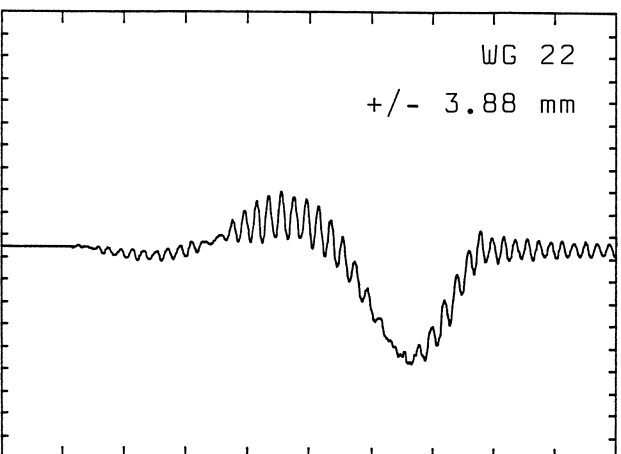
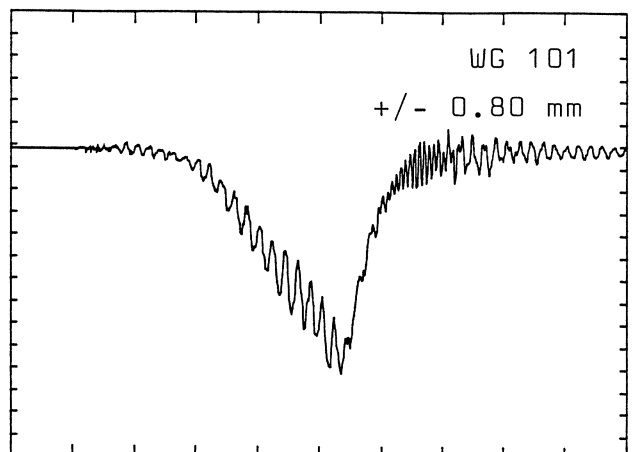
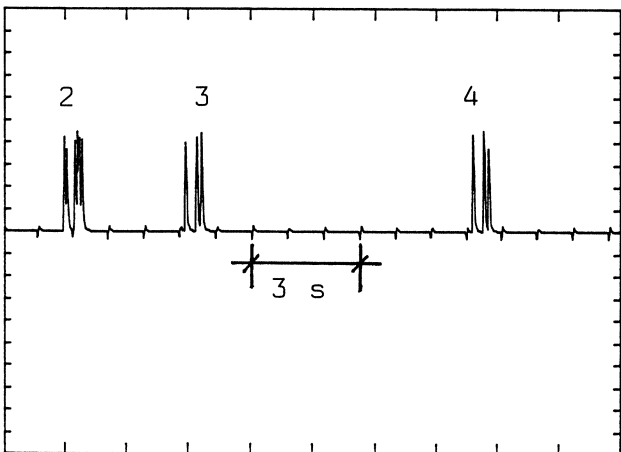
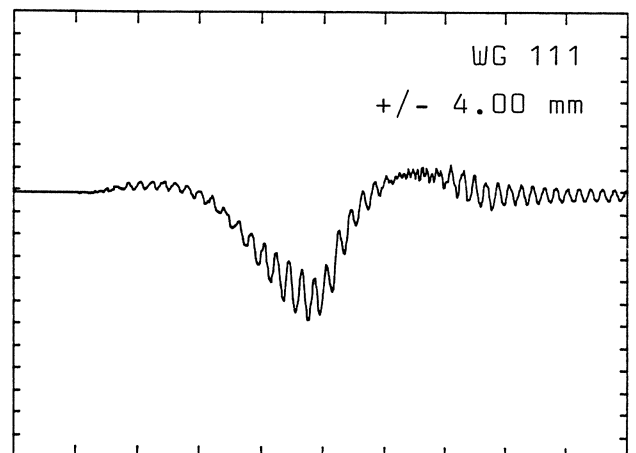
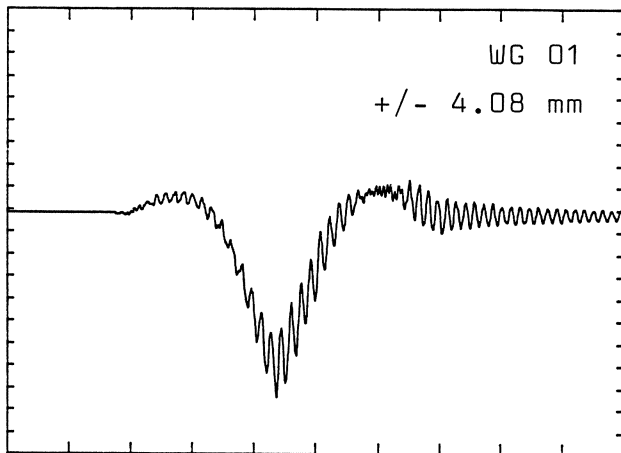
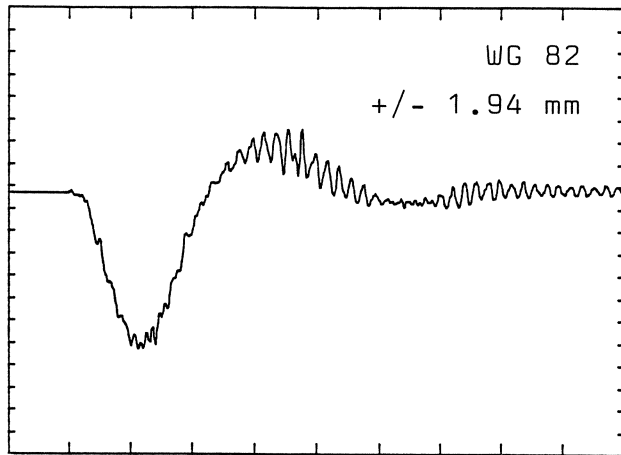




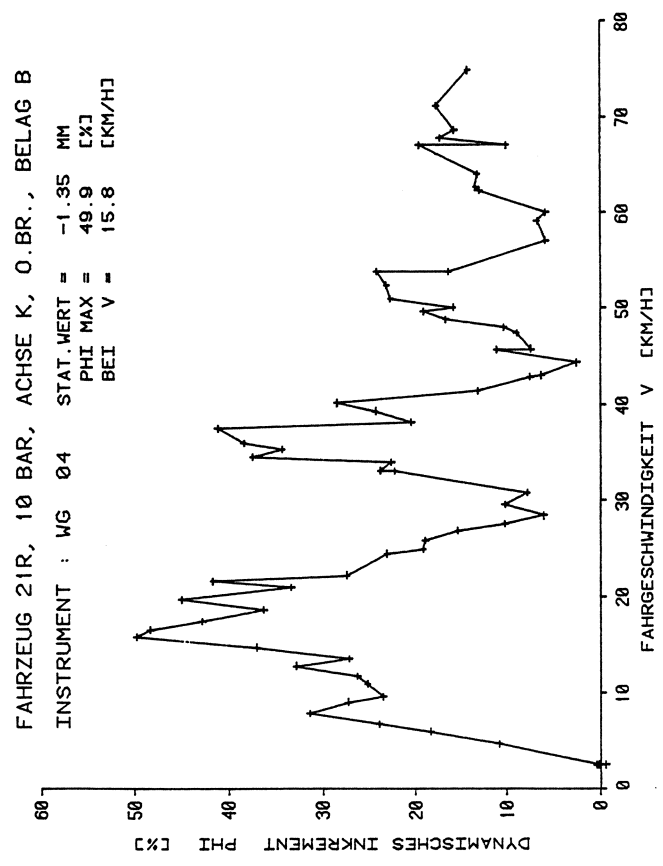
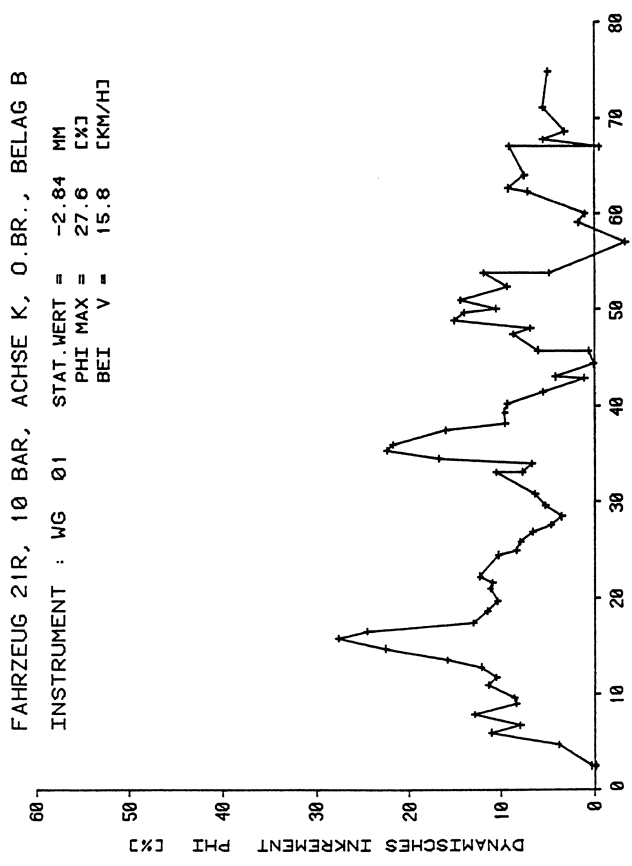
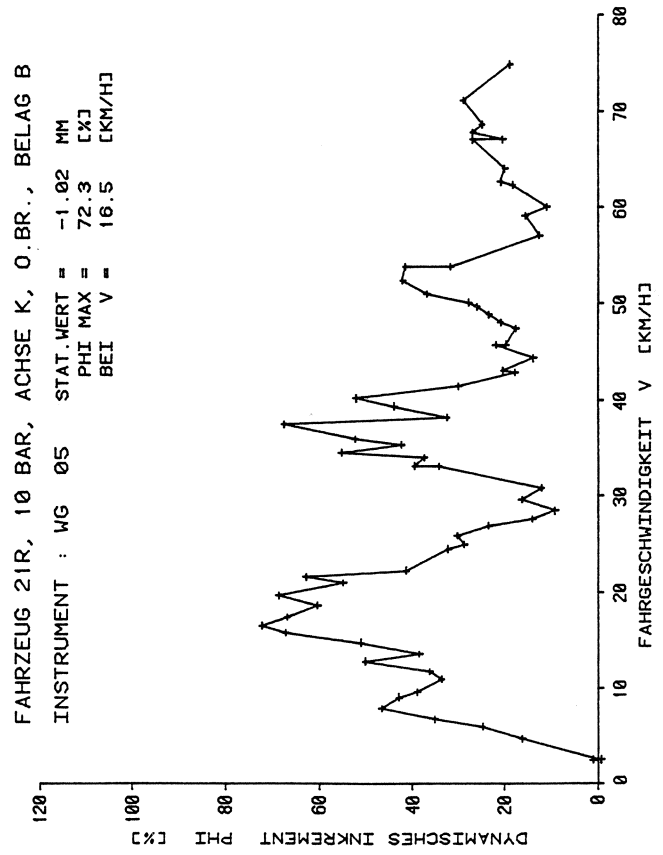
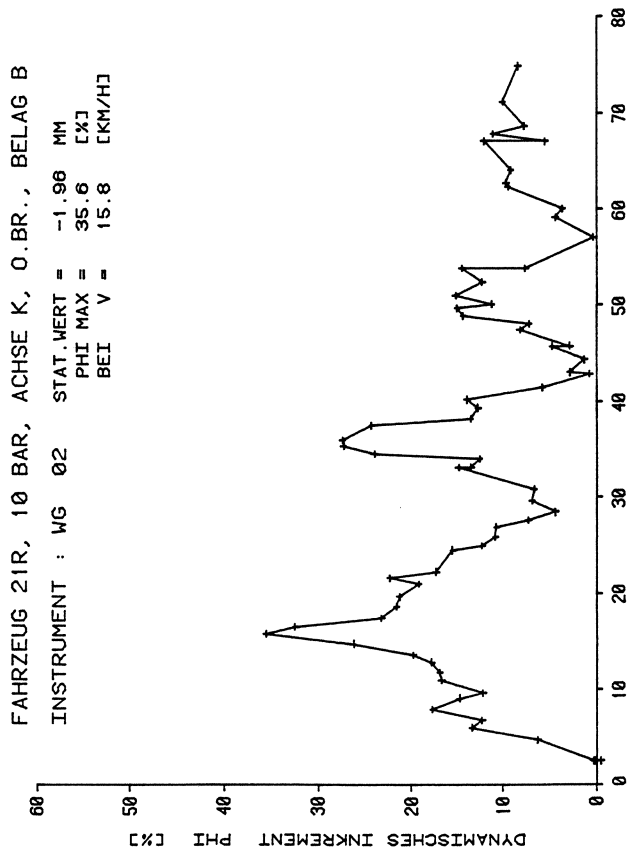
Versuch Nr. 5210, 21R10KoB, $v = 35.34 \text{ km/h}$, Durchbiegungen



Versuch Nr. 5210, 21R10KoB, $v = 35.34$ km/h, Durchbiegungen



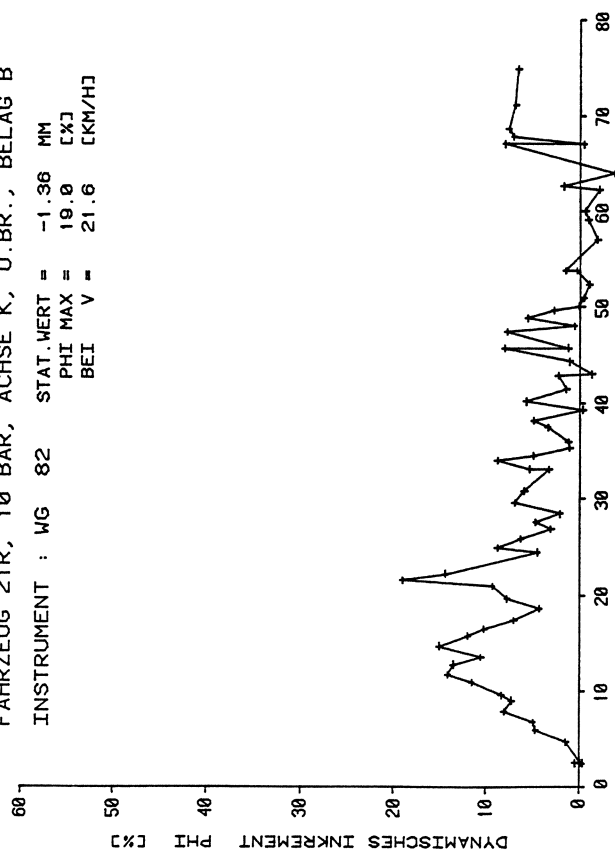
Versuchsserie 21R10KoB, Durchbiegungen



Versuchsserie 21R10KoB, Durchbiegungen

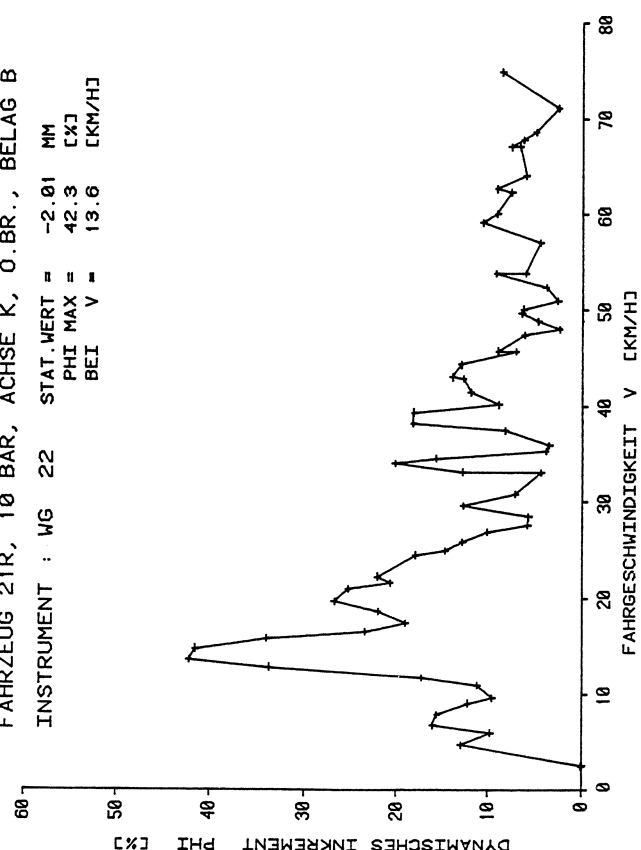
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, 0.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 82 STAT.WERT = -1.36 MM
 PHI MAX = 19.0 [X]
 BEI V = 21.6 [KM/H]



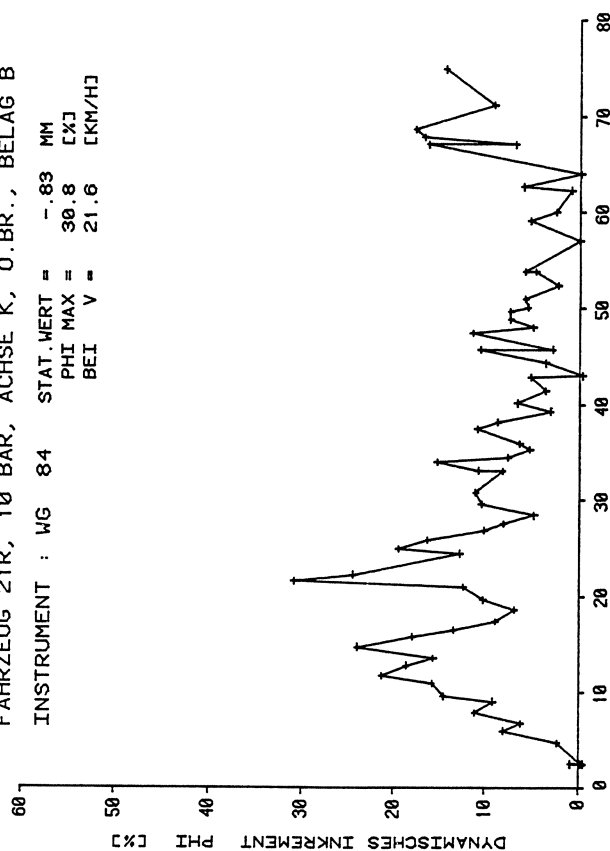
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, 0.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 22 STAT.WERT = -2.01 MM
 PHI MAX = 42.3 [X]
 BEI V = 13.6 [KM/H]



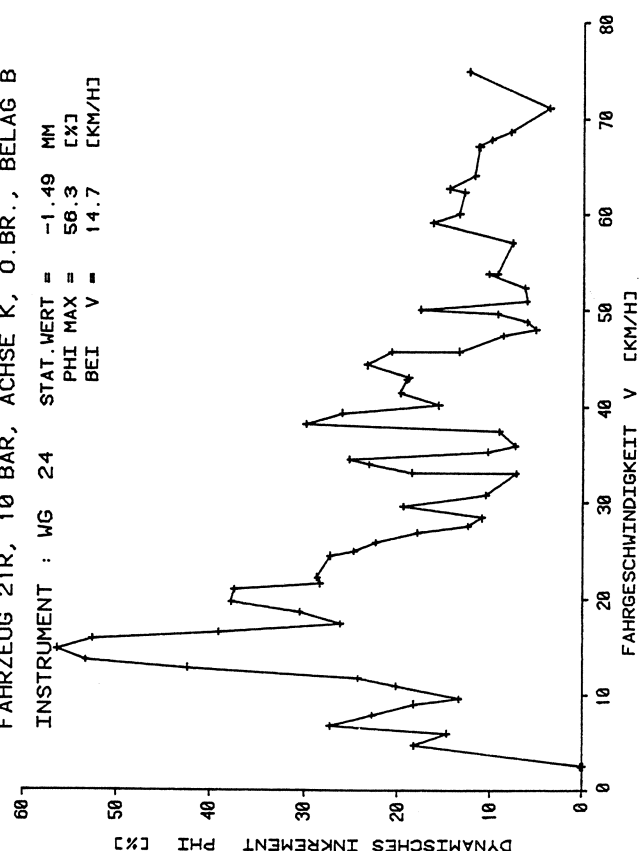
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, 0.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 84 STAT.WERT = -0.83 MM
 PHI MAX = 30.8 [X]
 BEI V = 21.6 [KM/H]

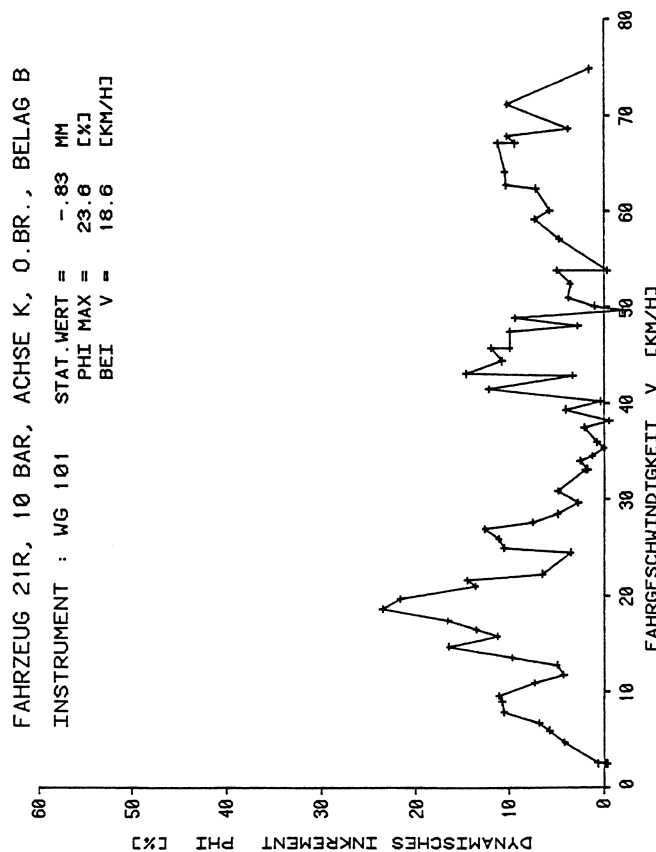
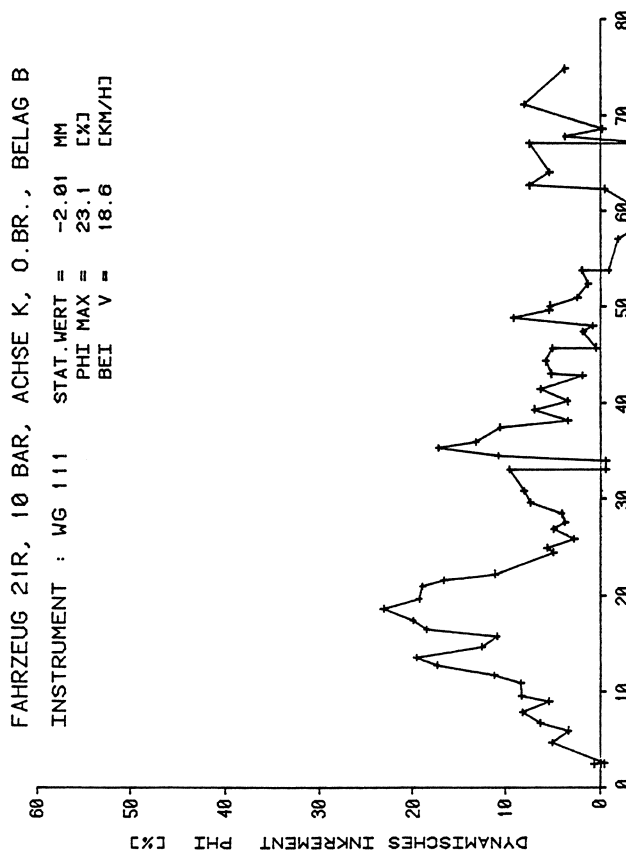
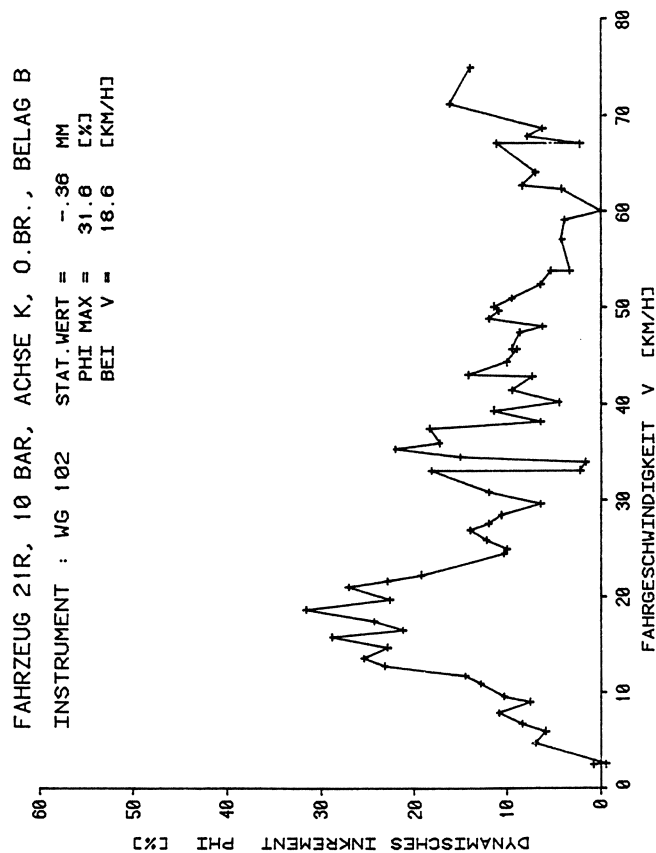
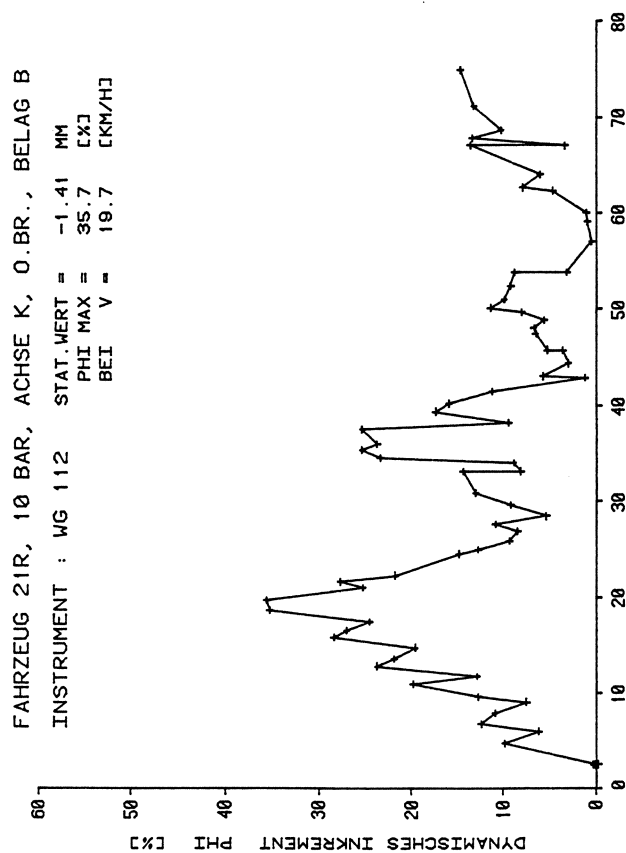


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, 0.BR., BELAG B

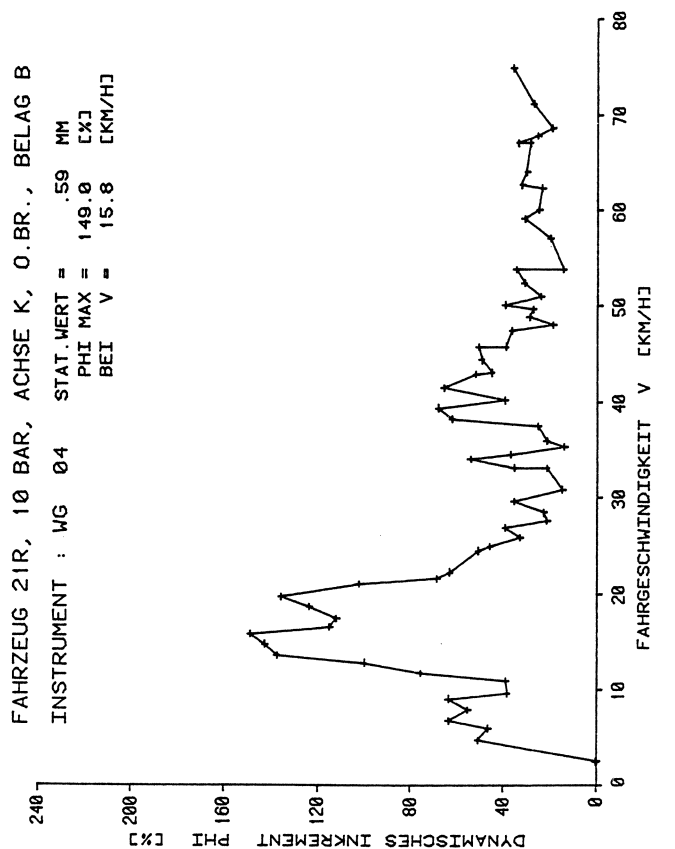
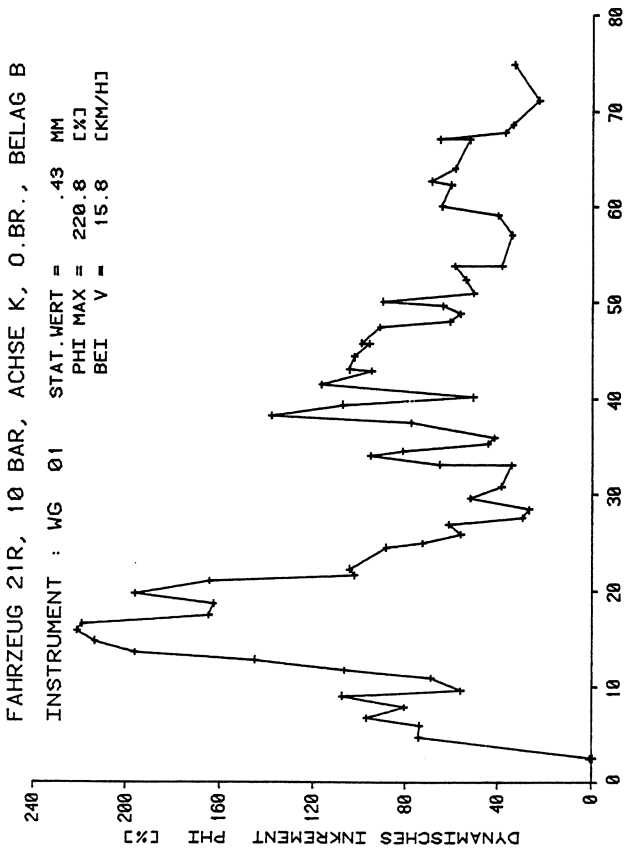
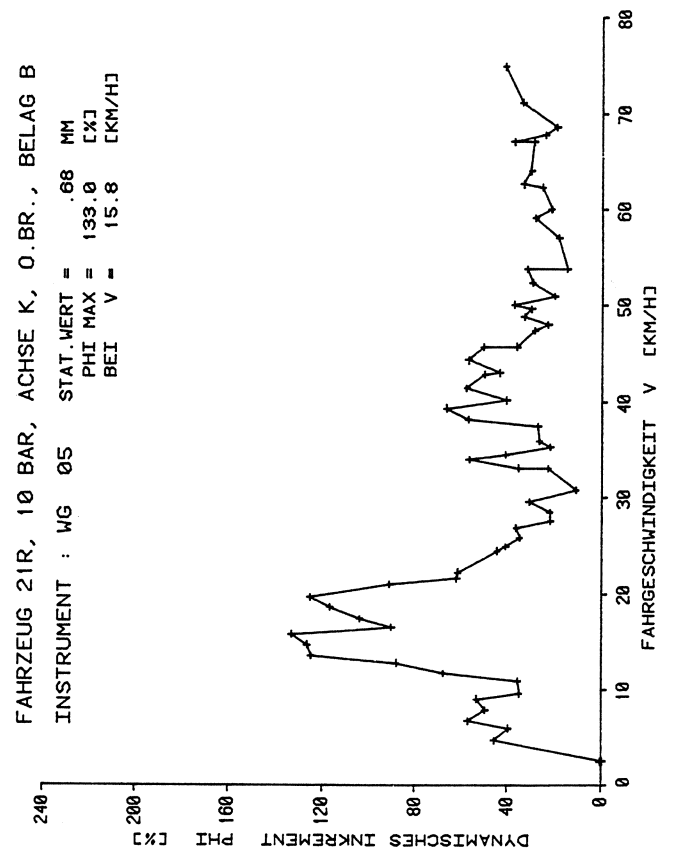
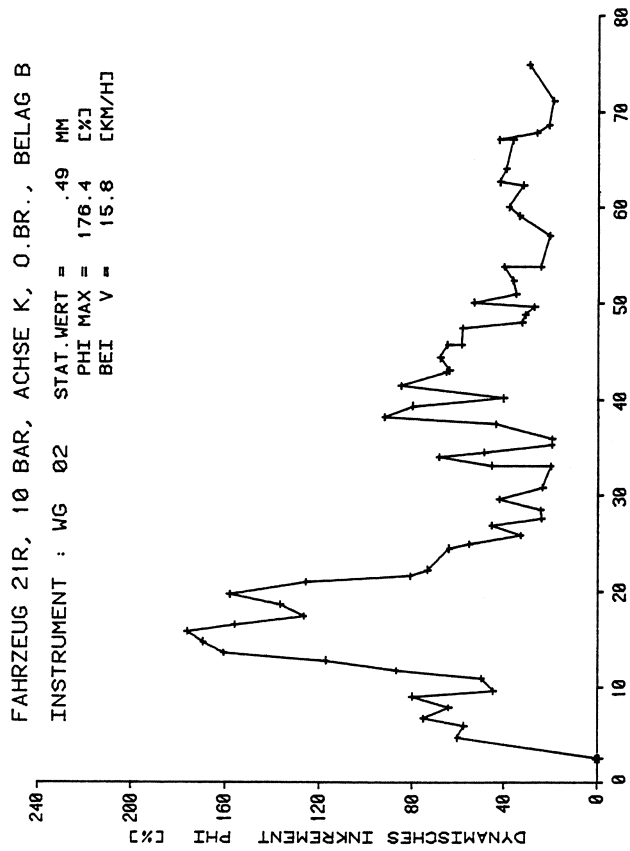
INSTRUMENT : WG 24 STAT.WERT = -1.49 MM
 PHI MAX = 56.3 [X]
 BEI V = 14.7 [KM/H]



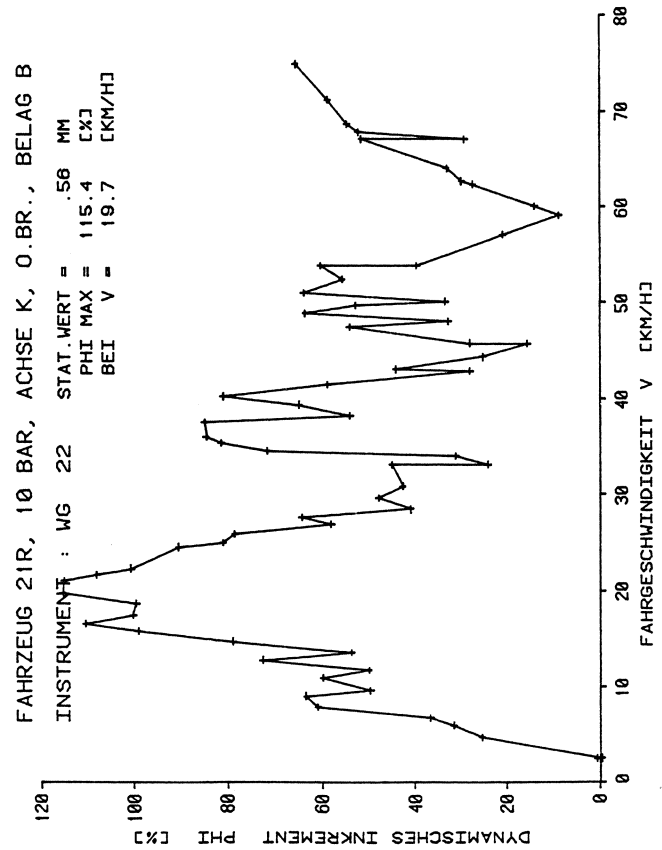
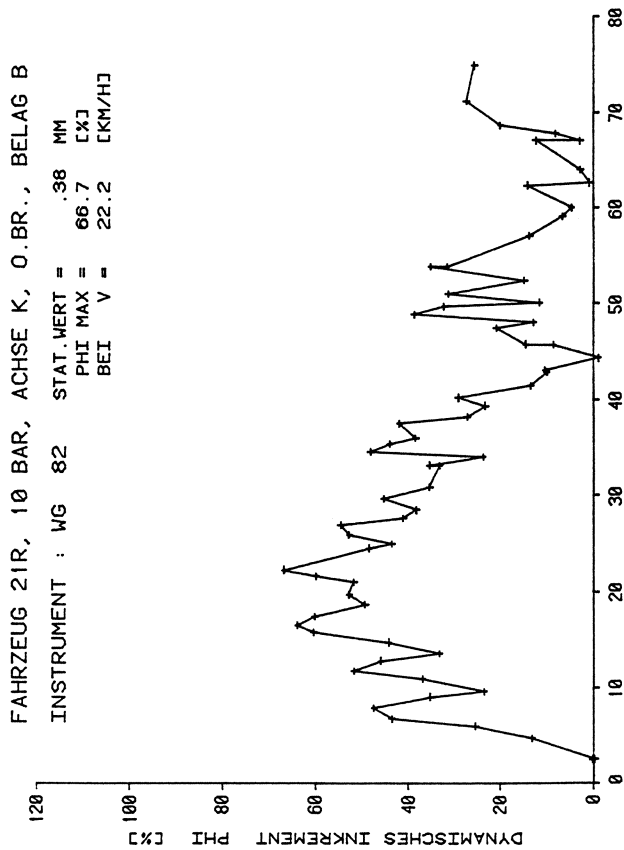
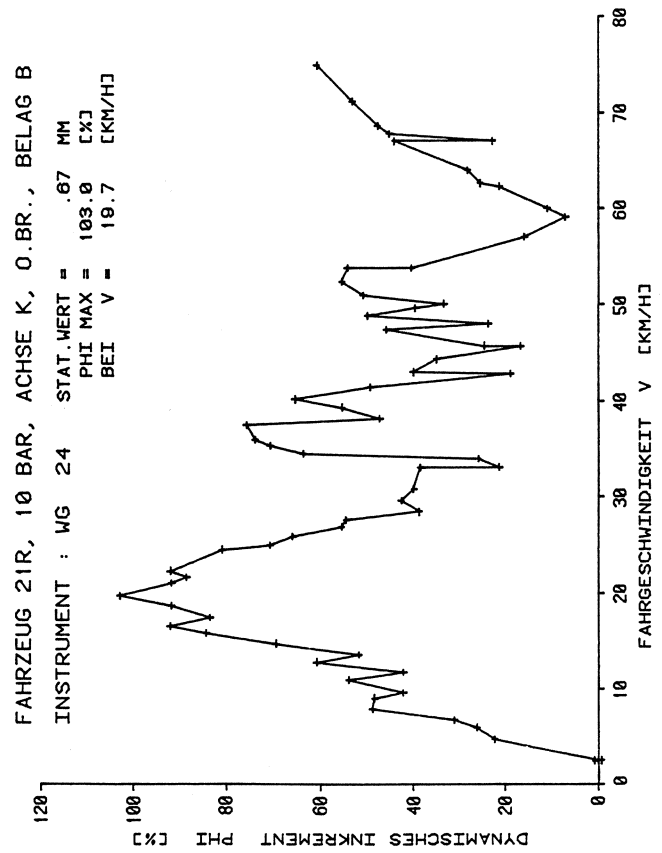
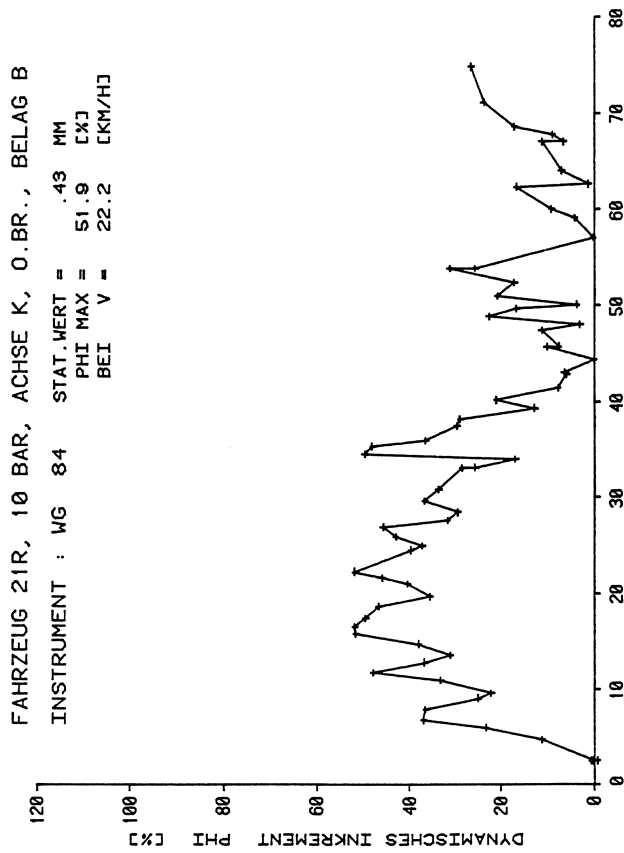
Versuchsserie 21R10KoB, Durchbiegungen



Versuchsserie 21R10KoB, Durchbiegungen

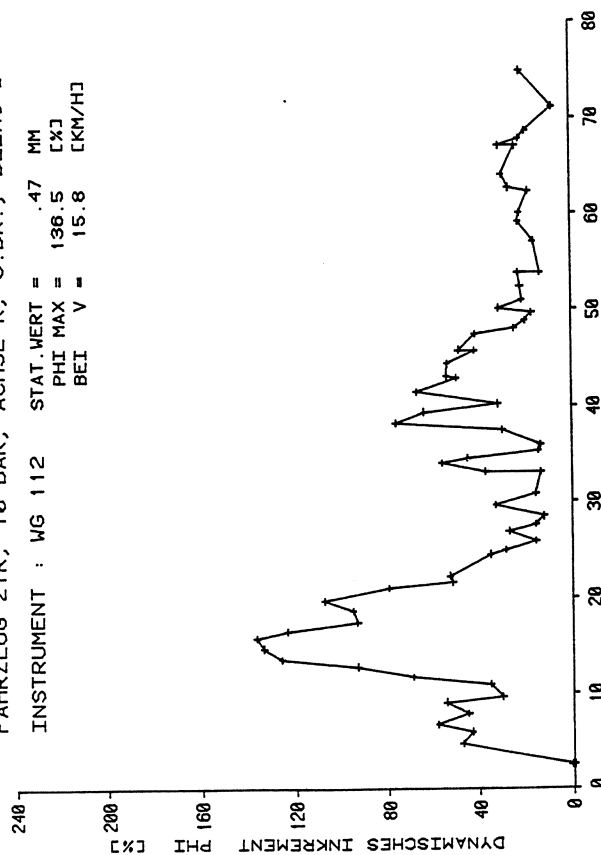


Versuchsserie 21R10KoB, Durchbiegungen

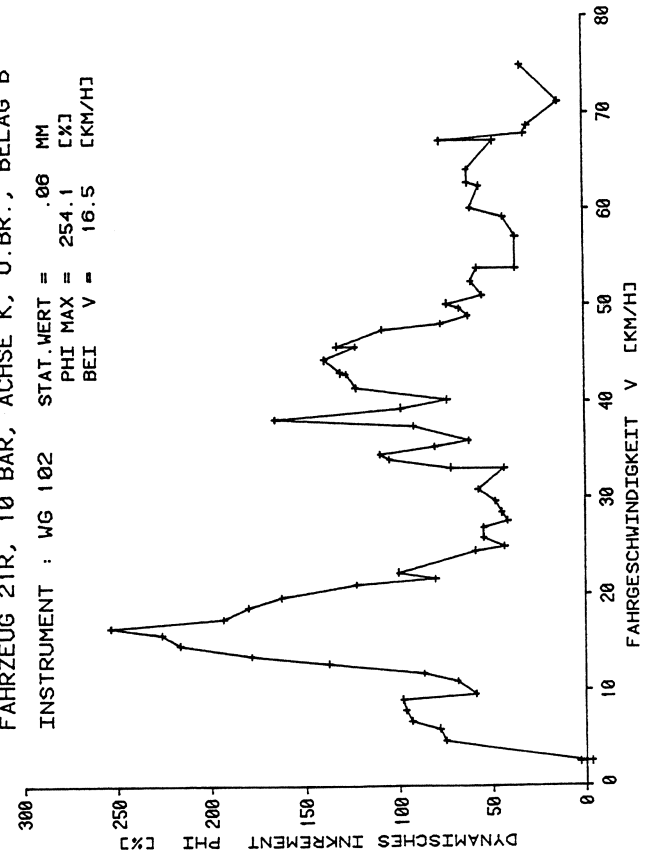


Versuchsserie 21R10KoB, Durchbiegungen

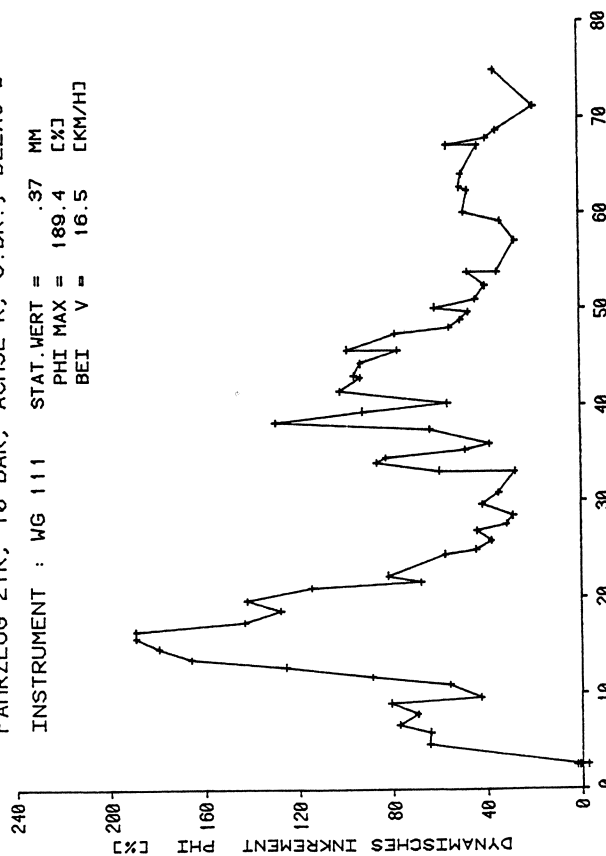
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 112 STAT.WERT = .47 MM
PHI MAX = 136.5 [°]
BEI V = 15.8 [KM/H]



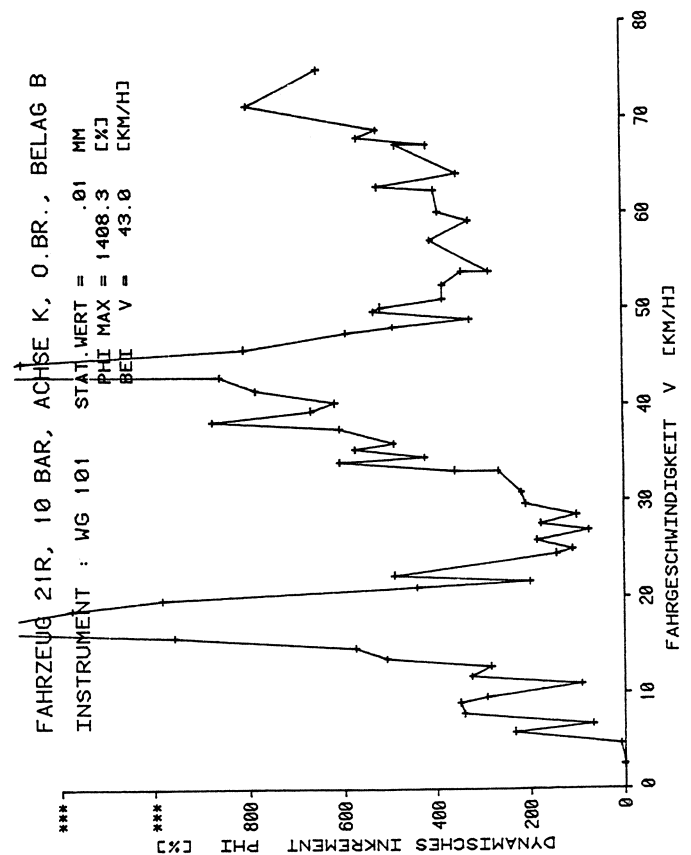
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 102 STAT.WERT = .06 MM
PHI MAX = 254.1 [°]
BEI V = 16.5 [KM/H]

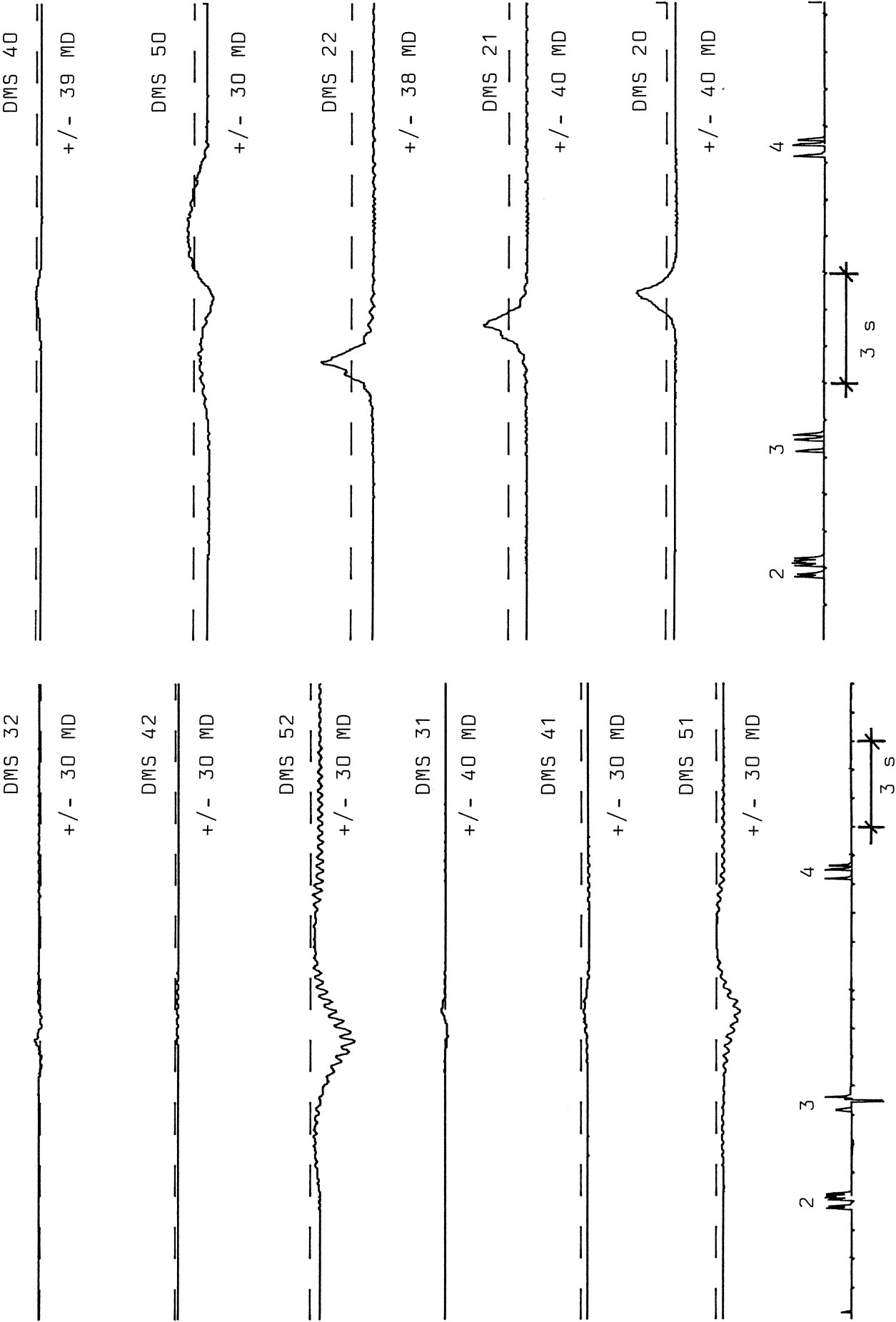


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 111 STAT.WERT = .37 MM
PHI MAX = 189.4 [°]
BEI V = 16.5 [KM/H]

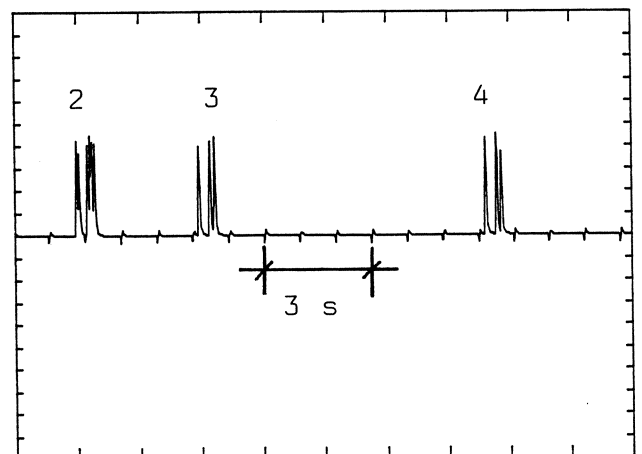
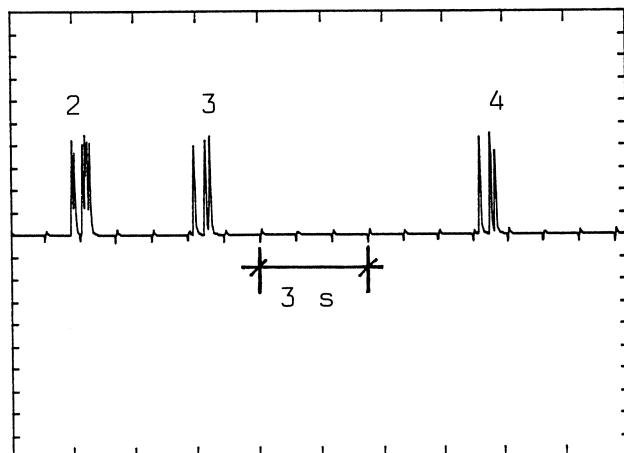
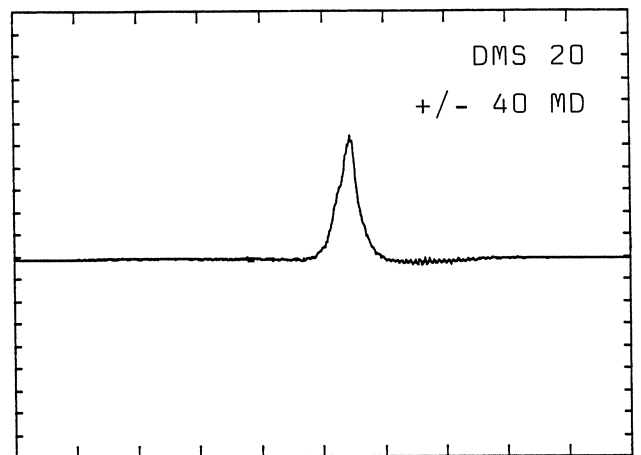
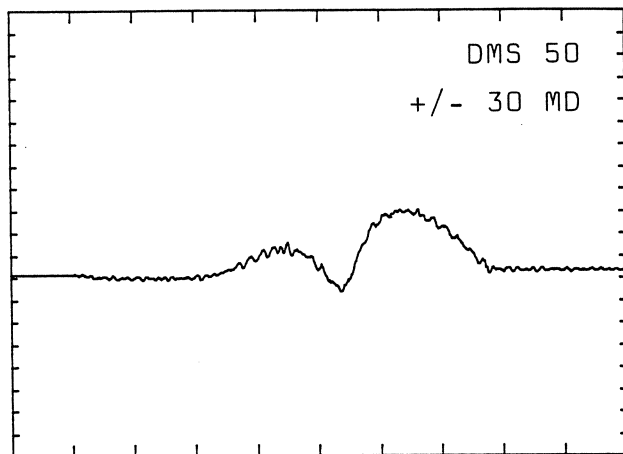
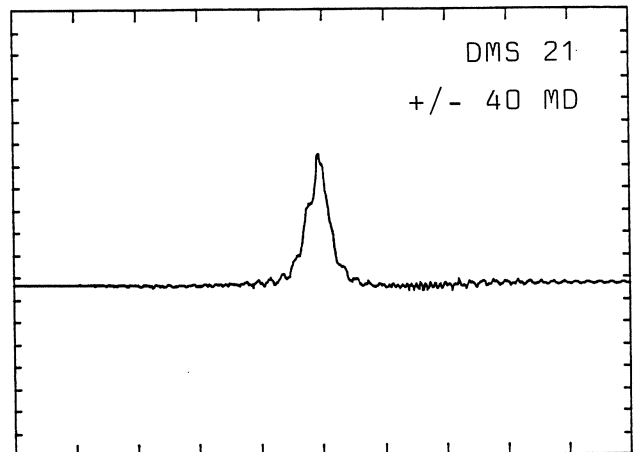
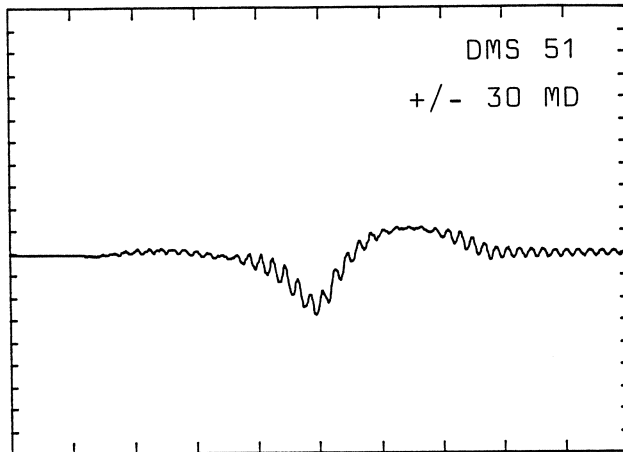
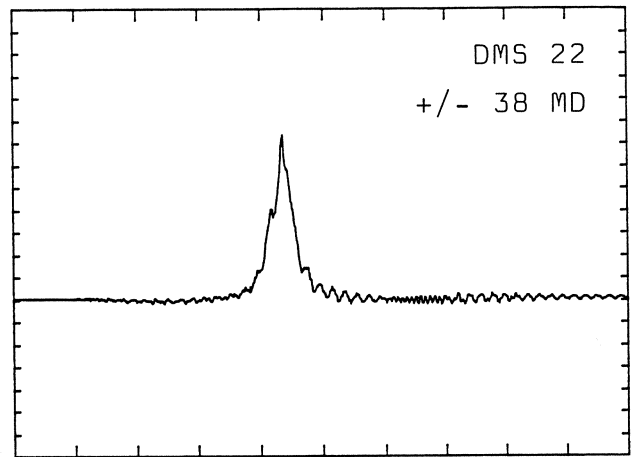
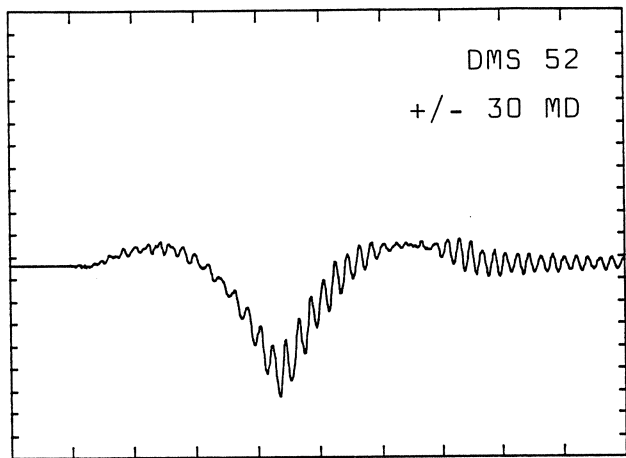


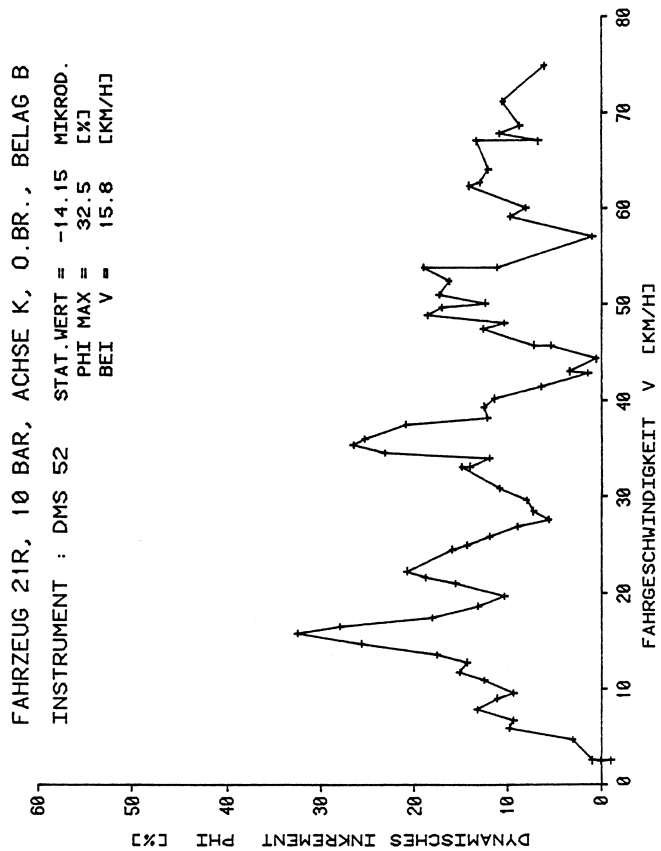
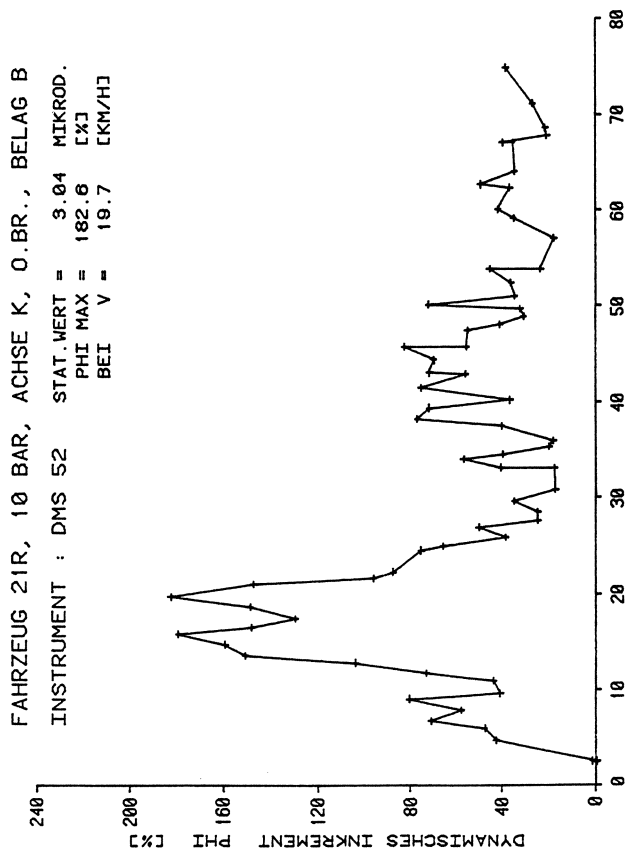
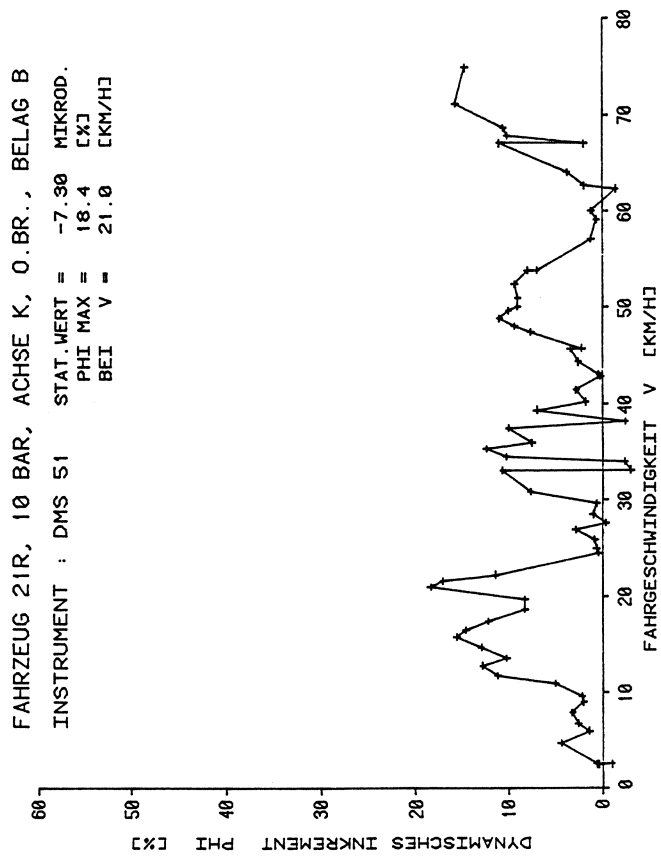
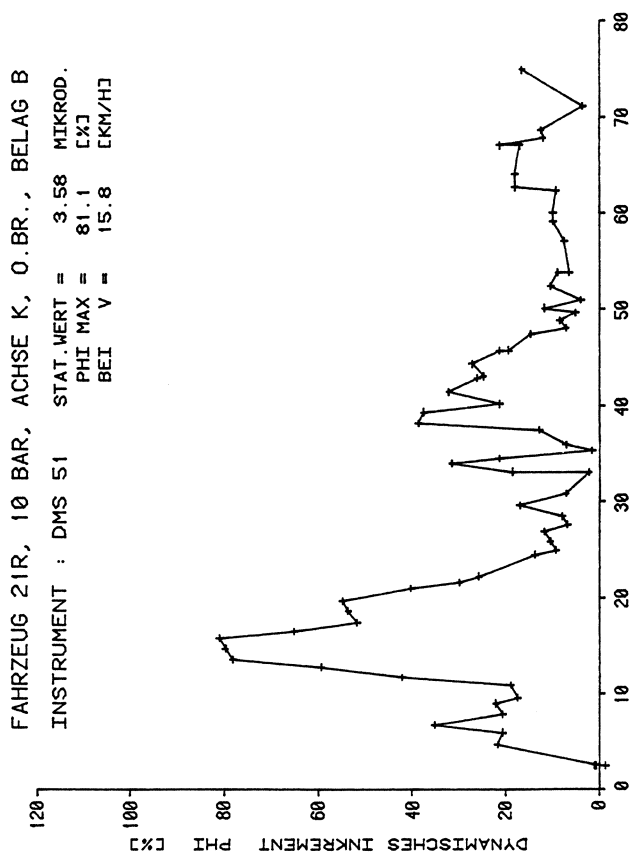
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, O.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 101 STAT.WERT = .01 MM
PHI MAX = 1408.3 [°]
BEI V = 43.0 [KM/H]

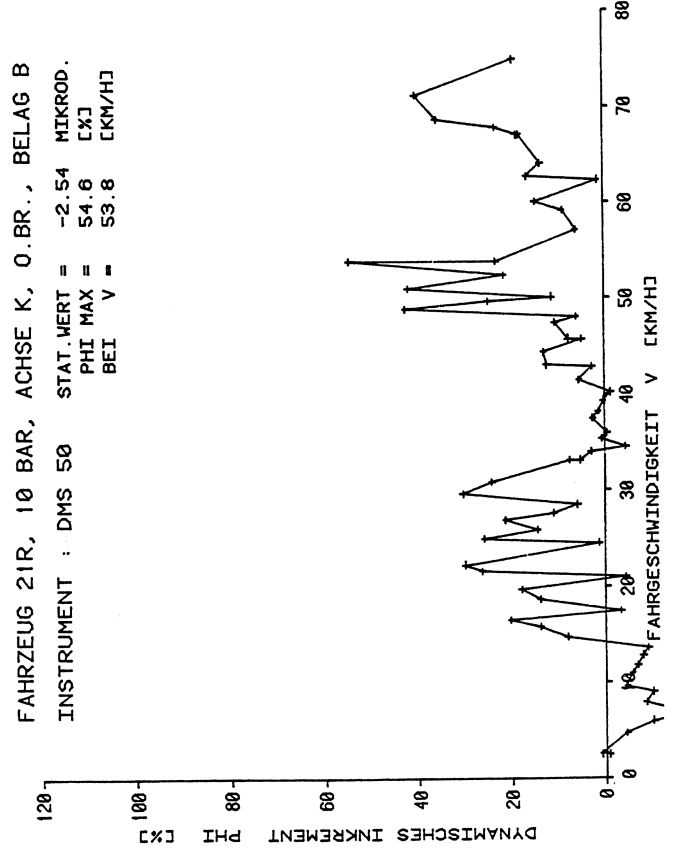
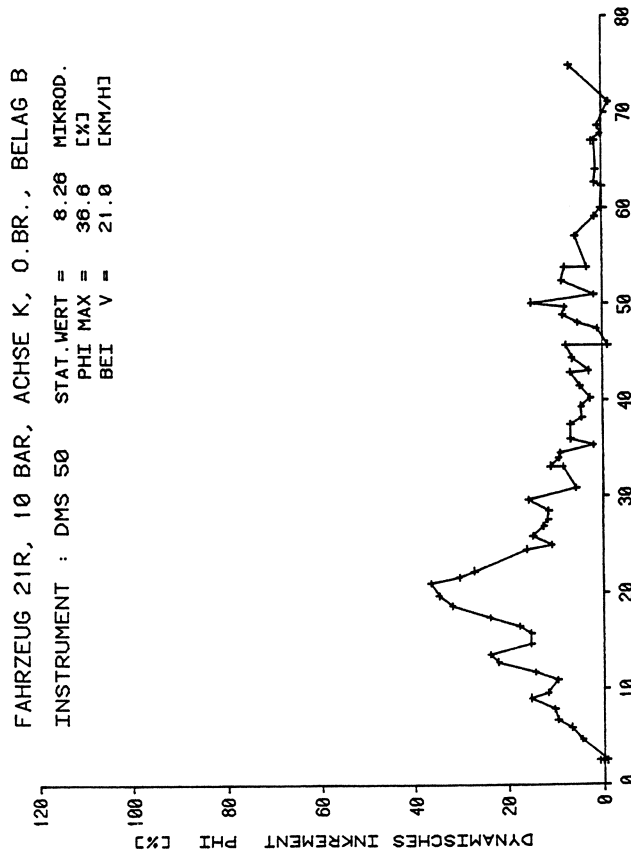


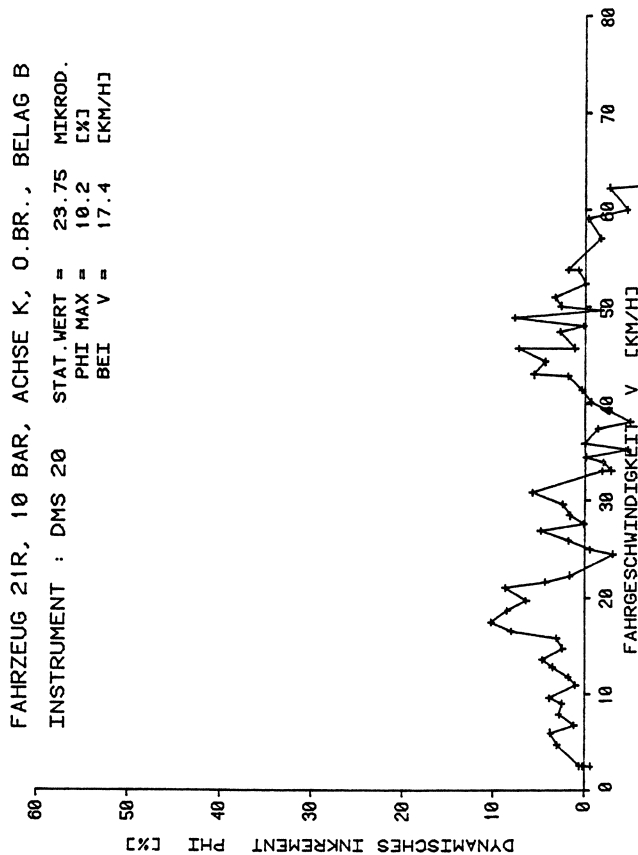
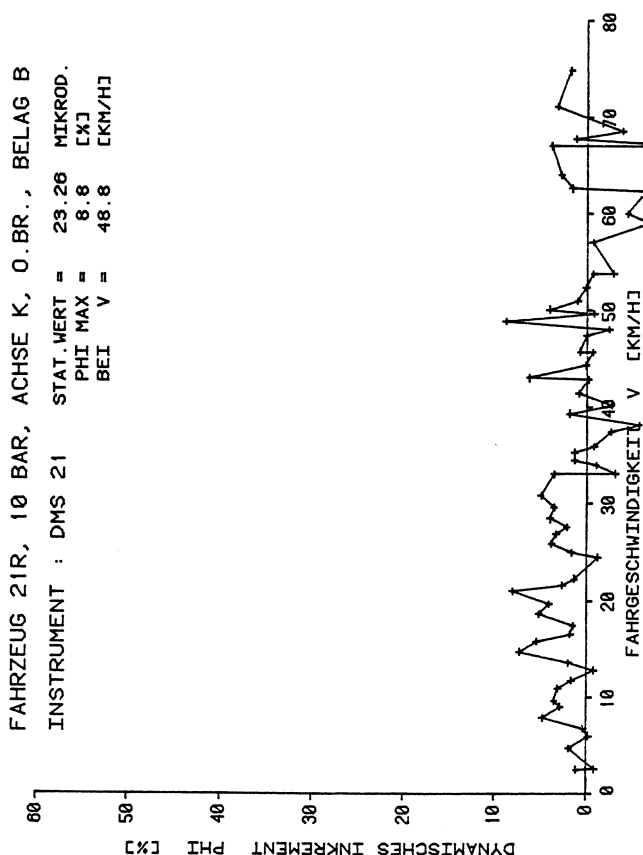
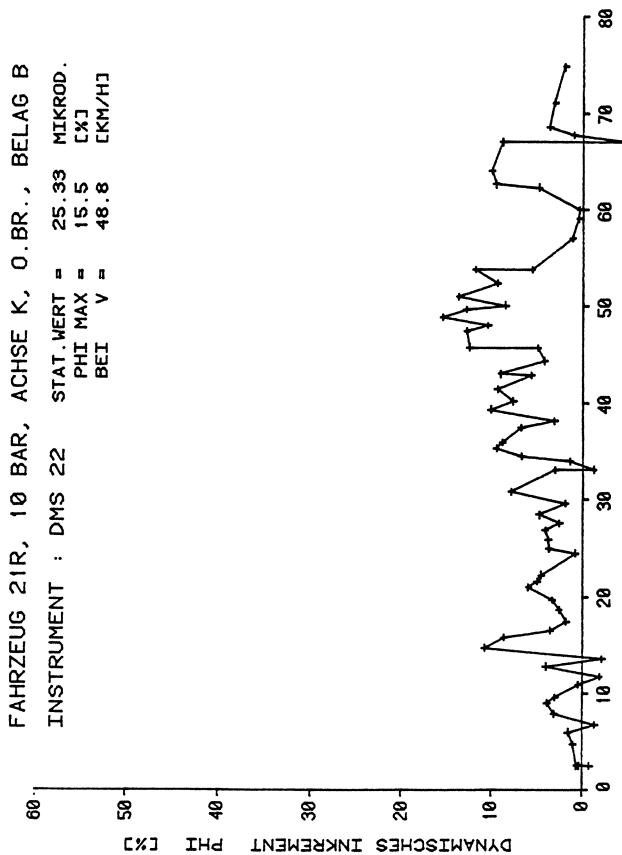


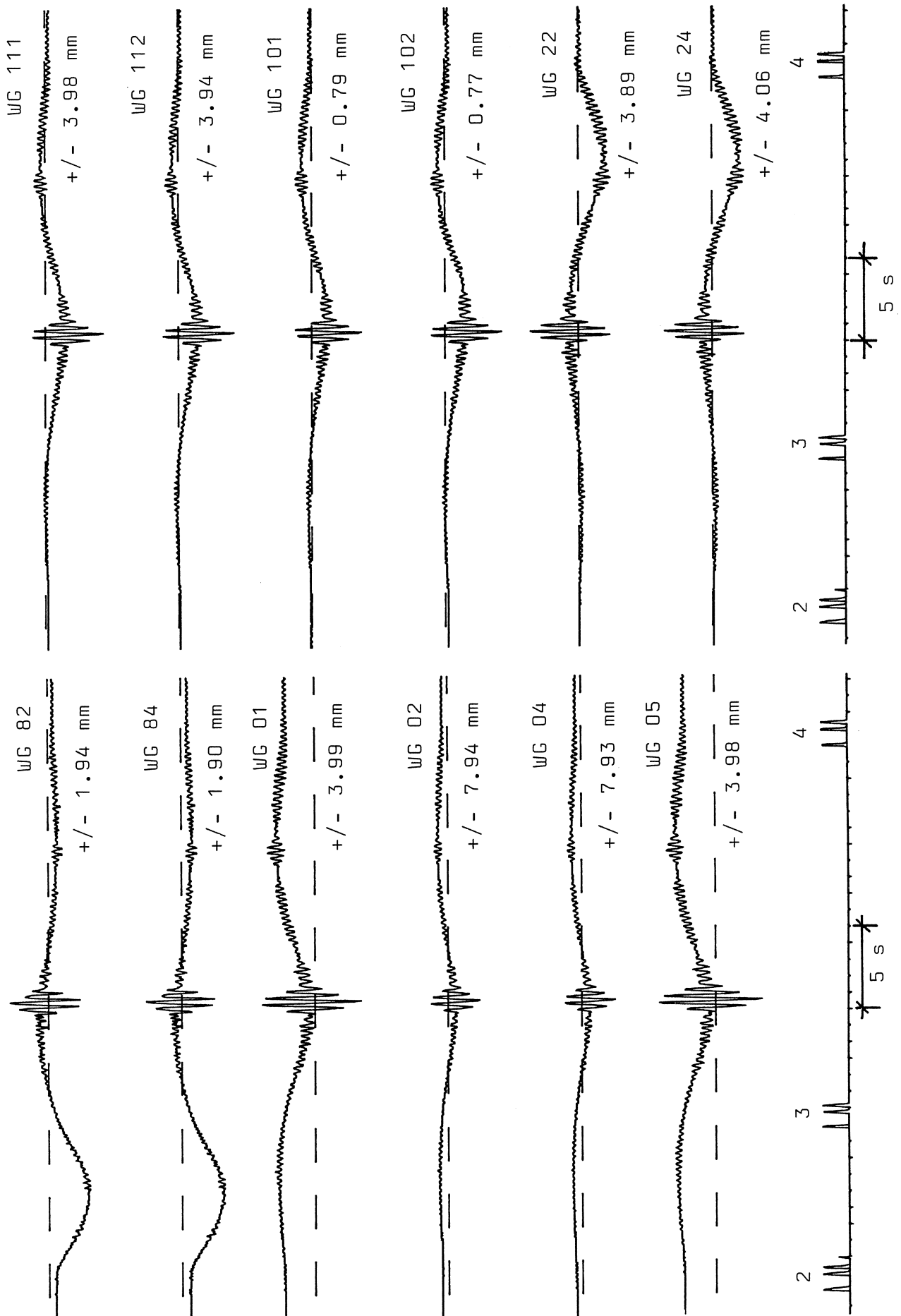
Versuch Nr. 5210, 21R10KoB, $v = 35.34$ km/h, Dehnungen



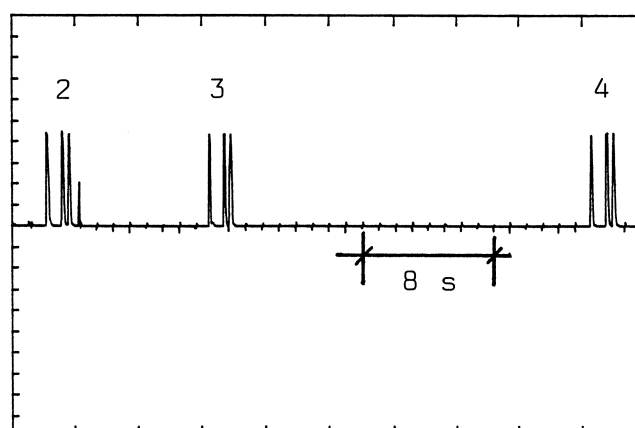
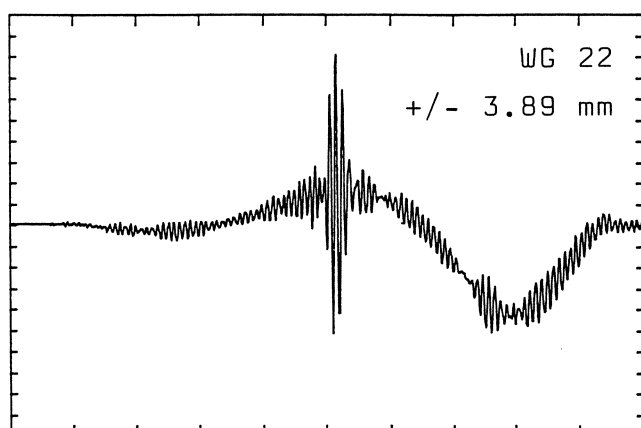
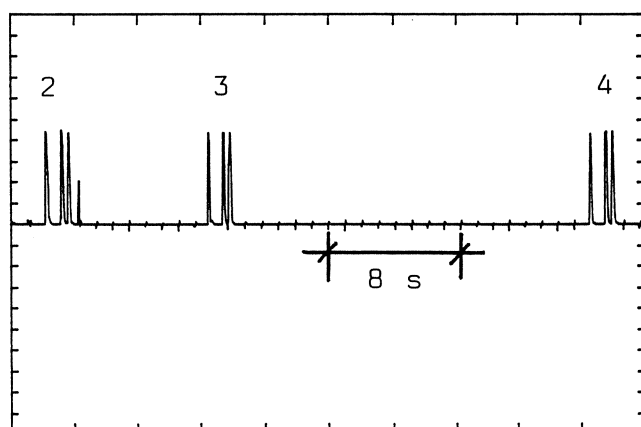
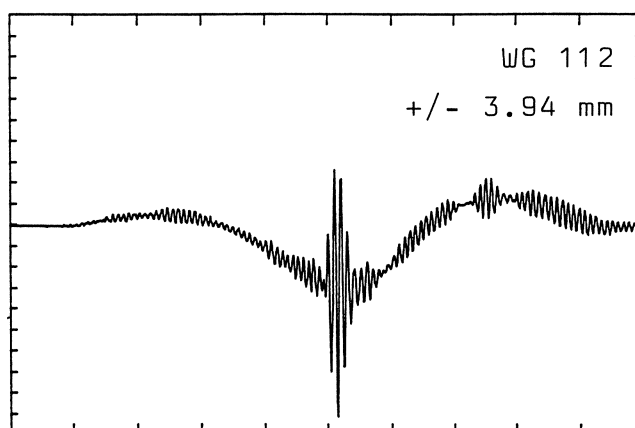
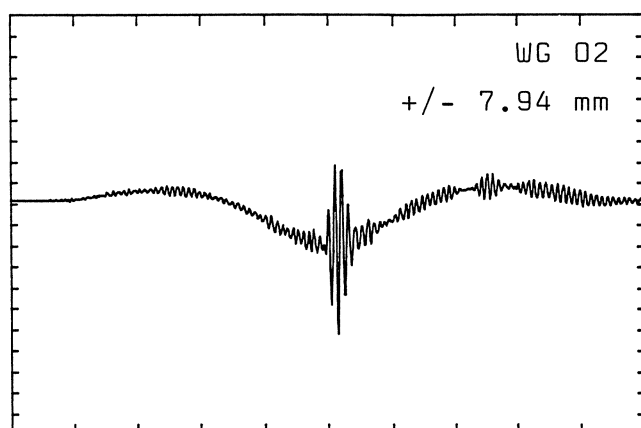
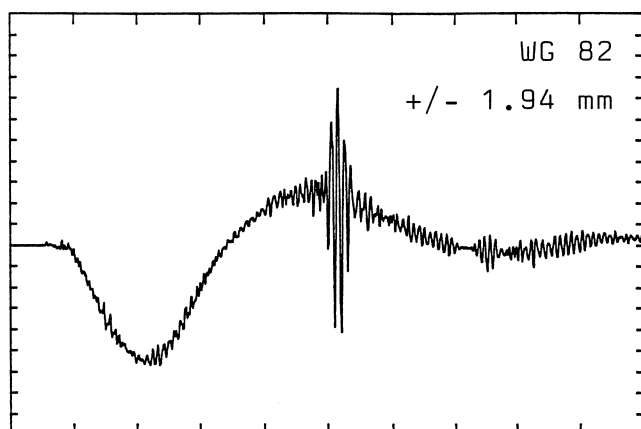




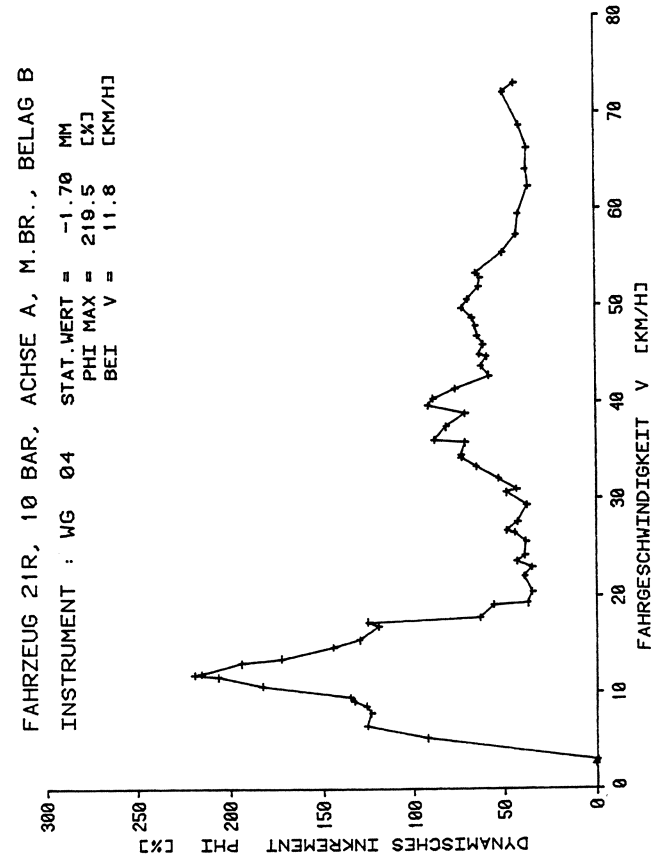
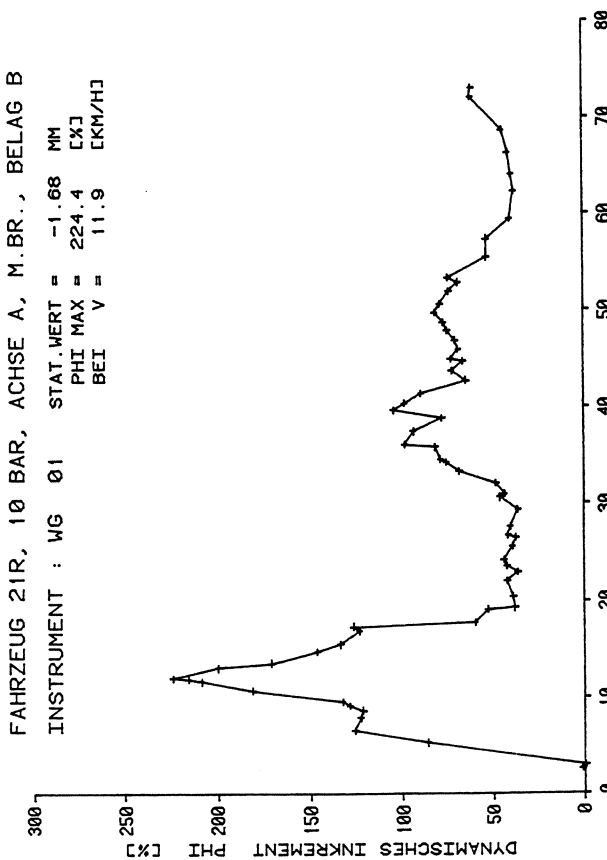
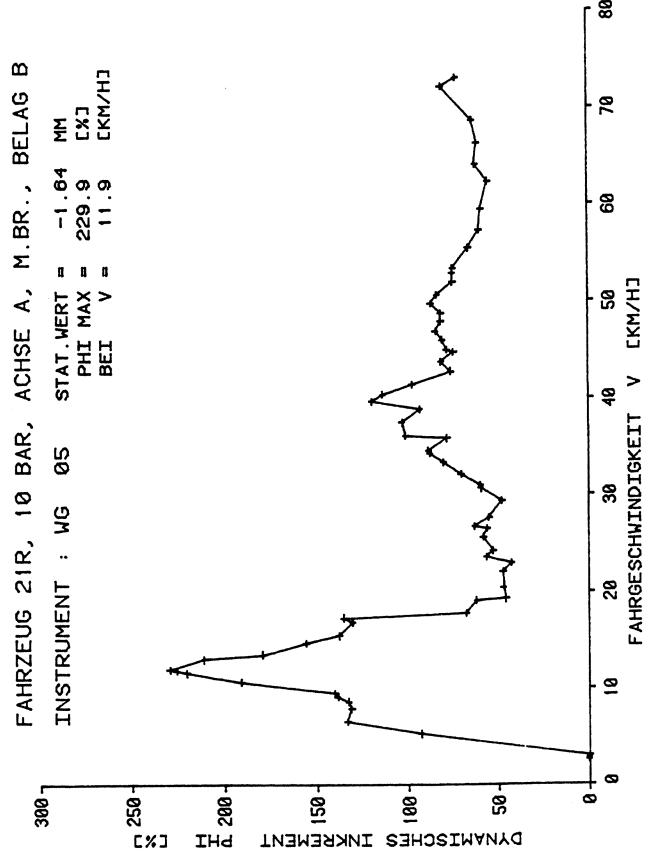
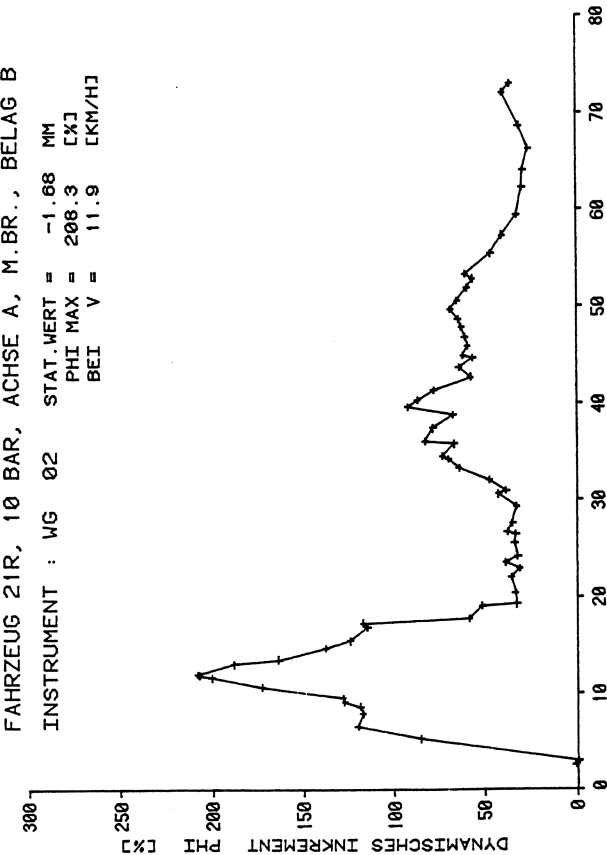


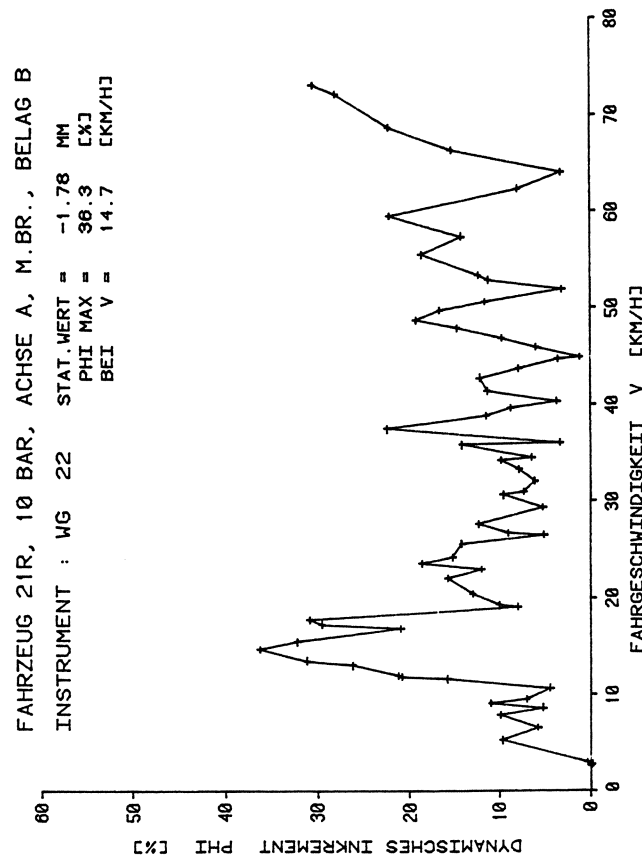
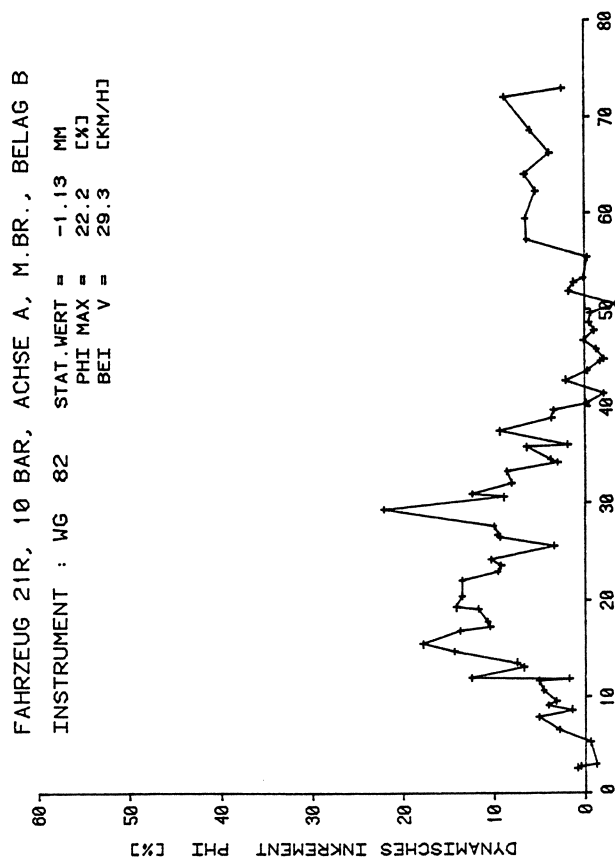
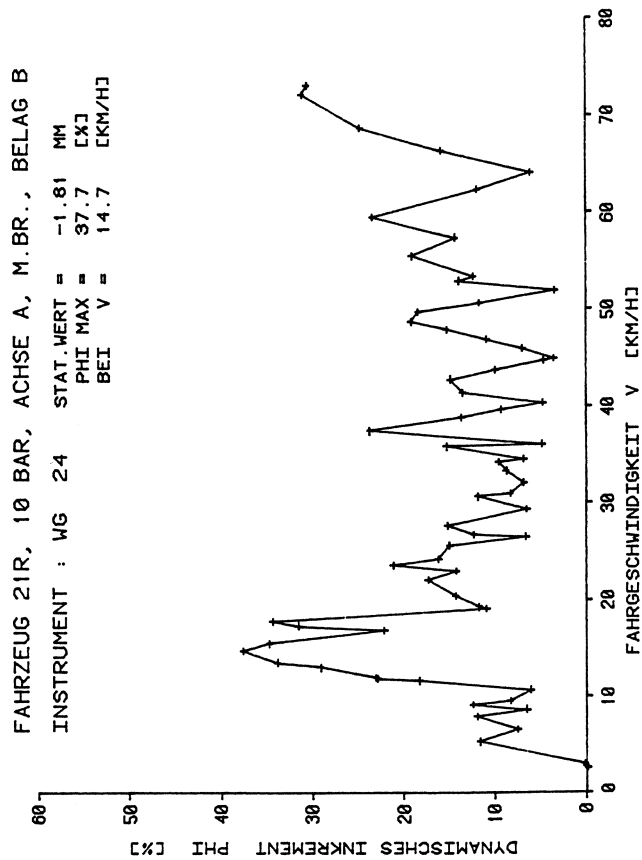
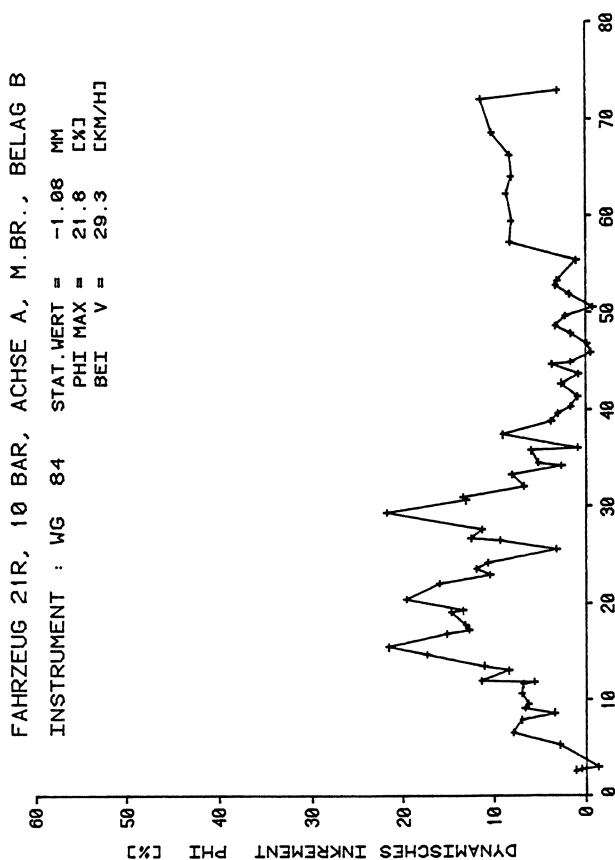


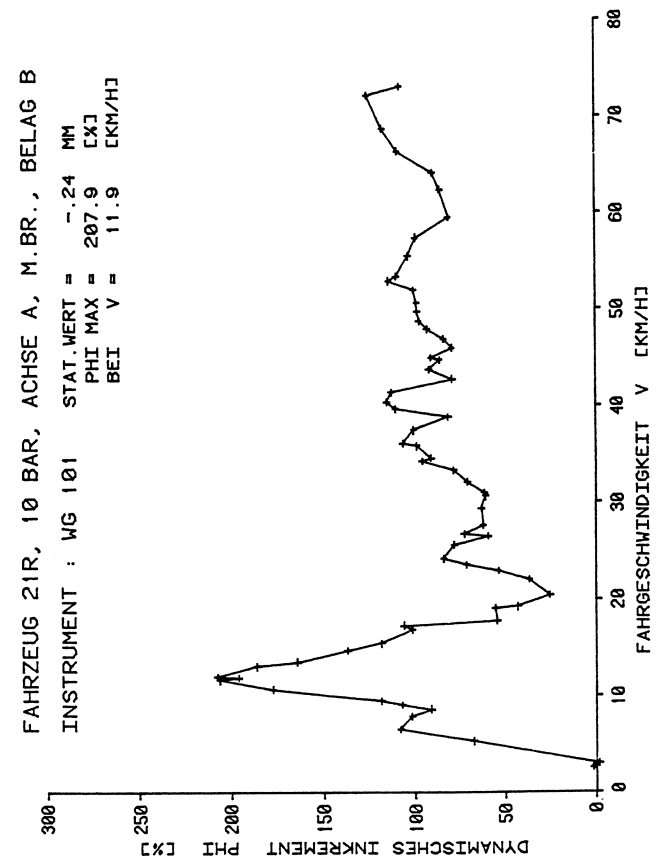
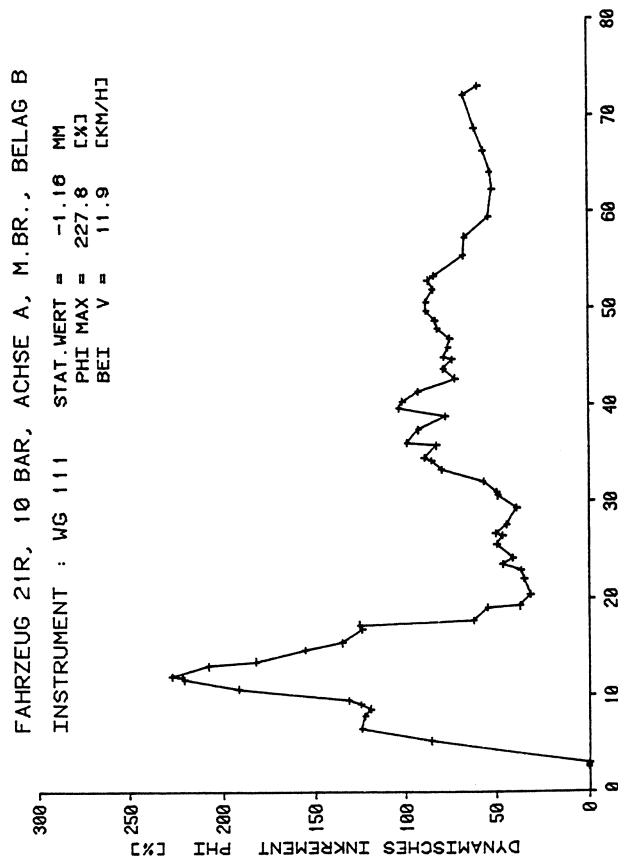
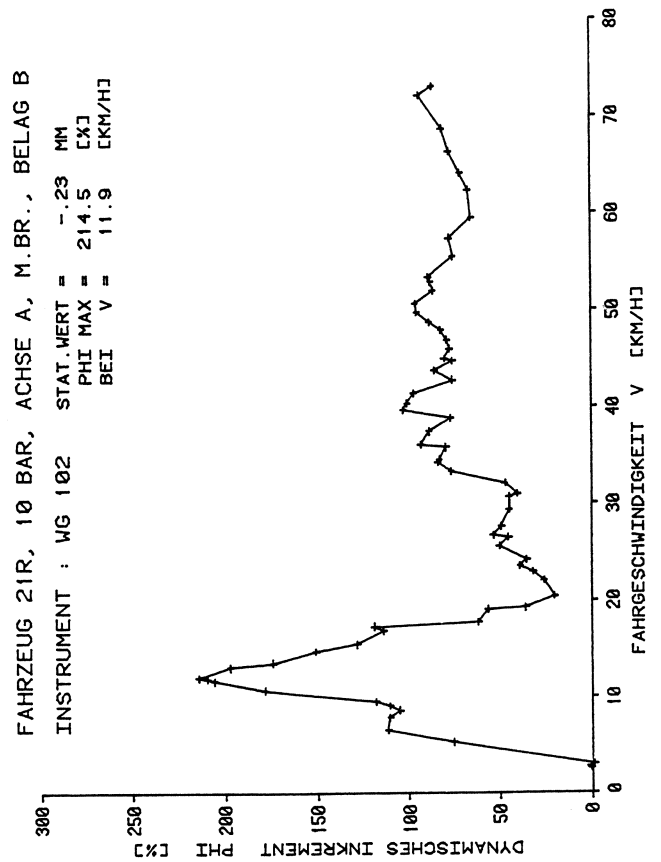
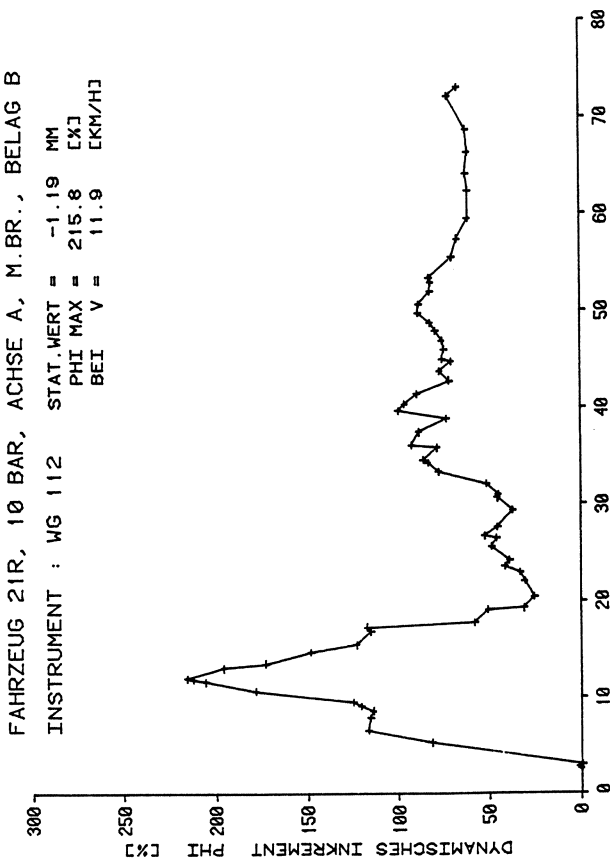
Versuch Nr. 5122, 21R10AmB, $v = 11.82 \text{ km/h}$, Durchbiegungen

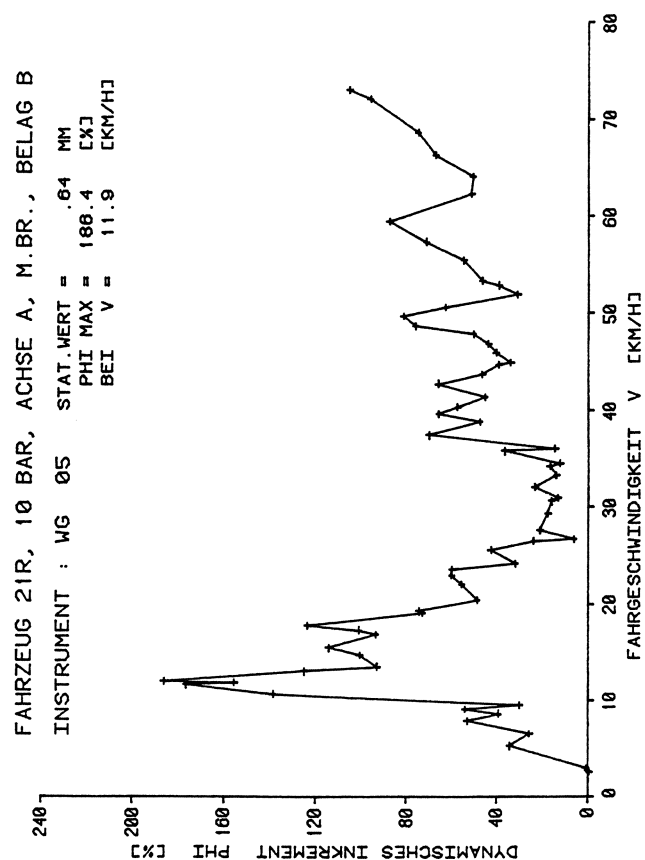
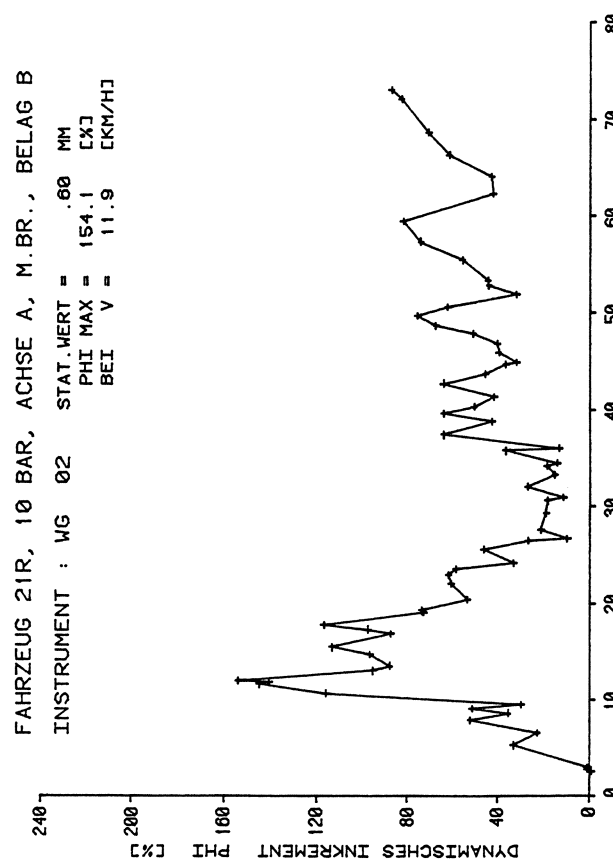
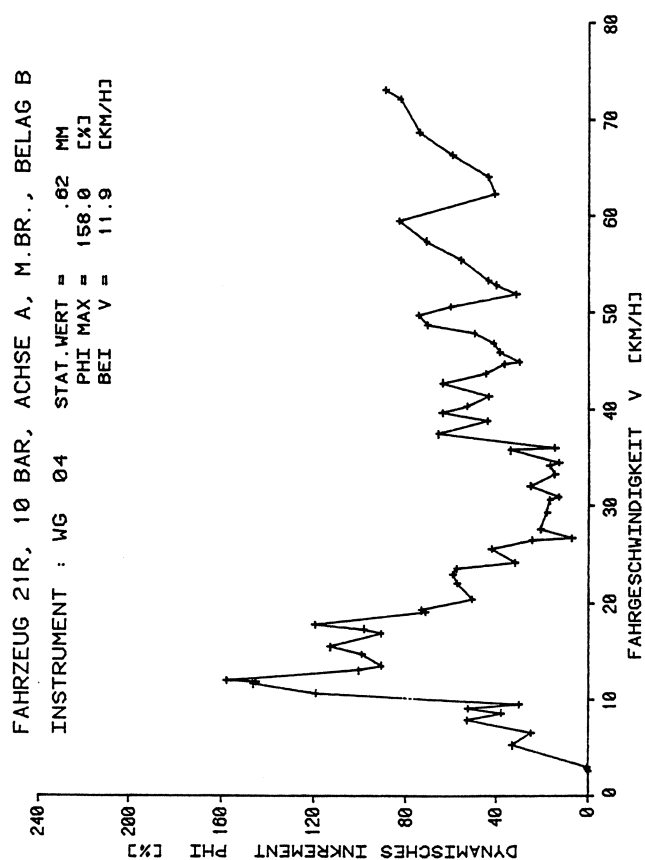
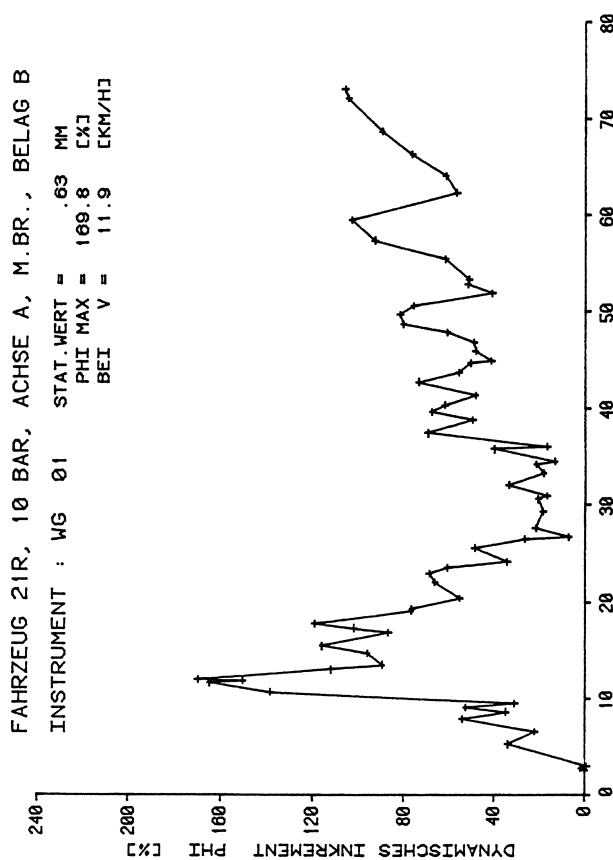


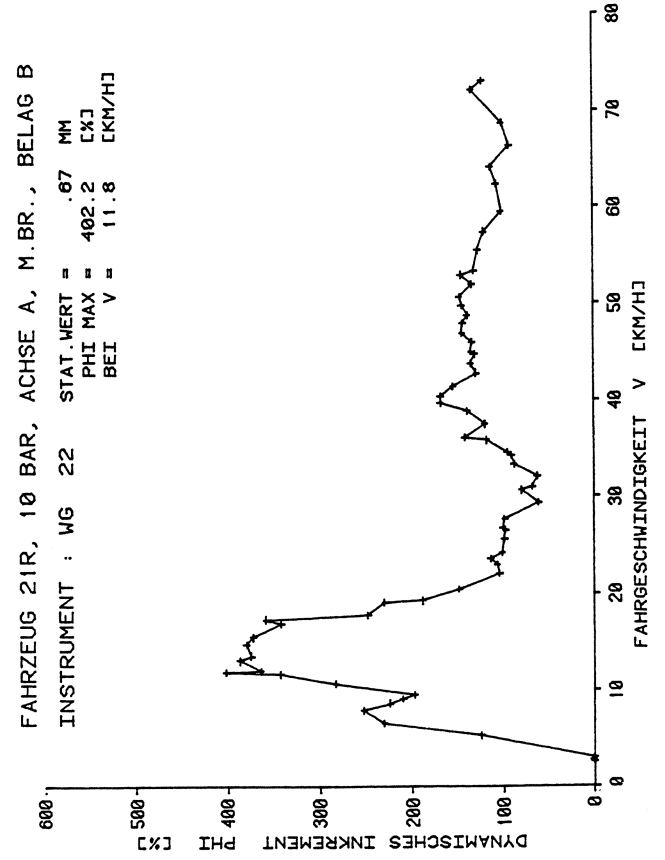
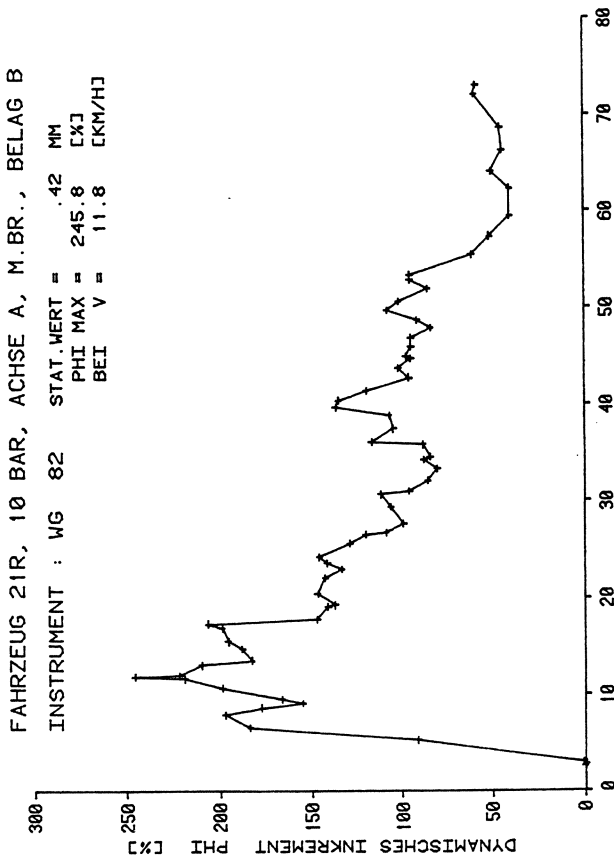
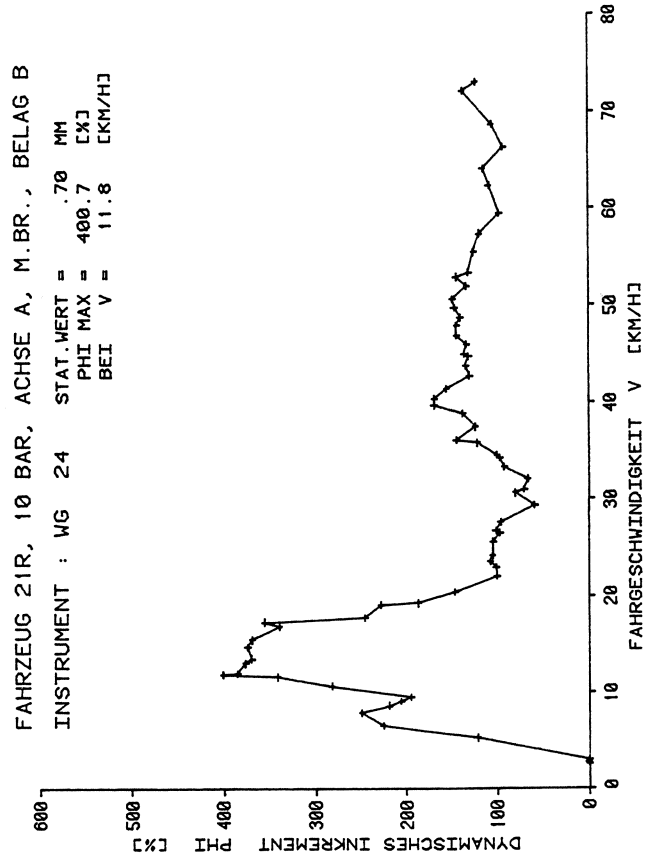
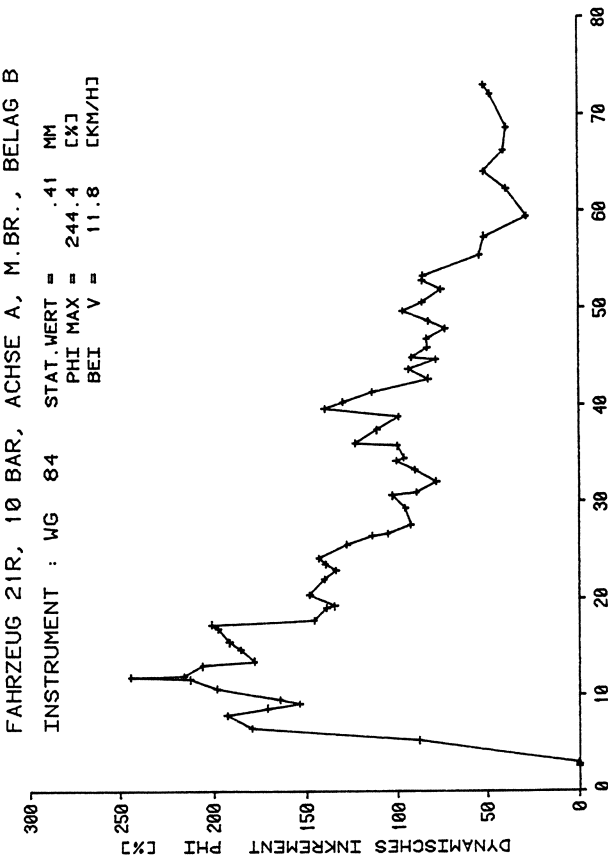
Versuchsserie 21R10AmB, Durchbiegungen



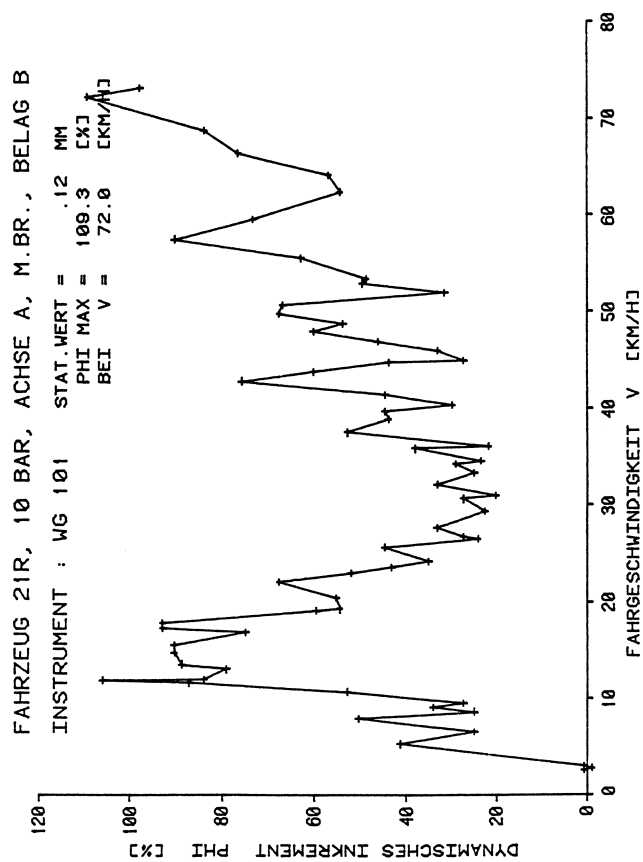
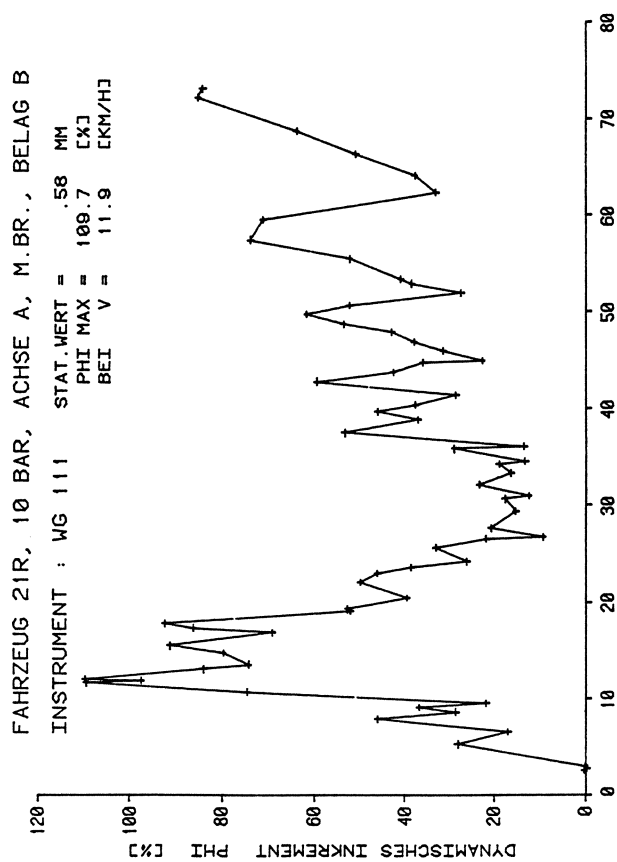
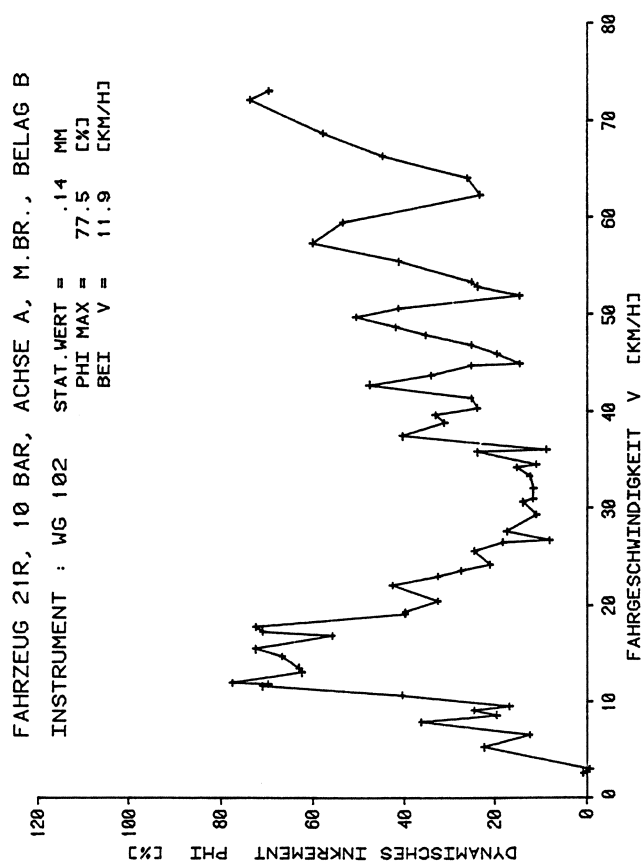
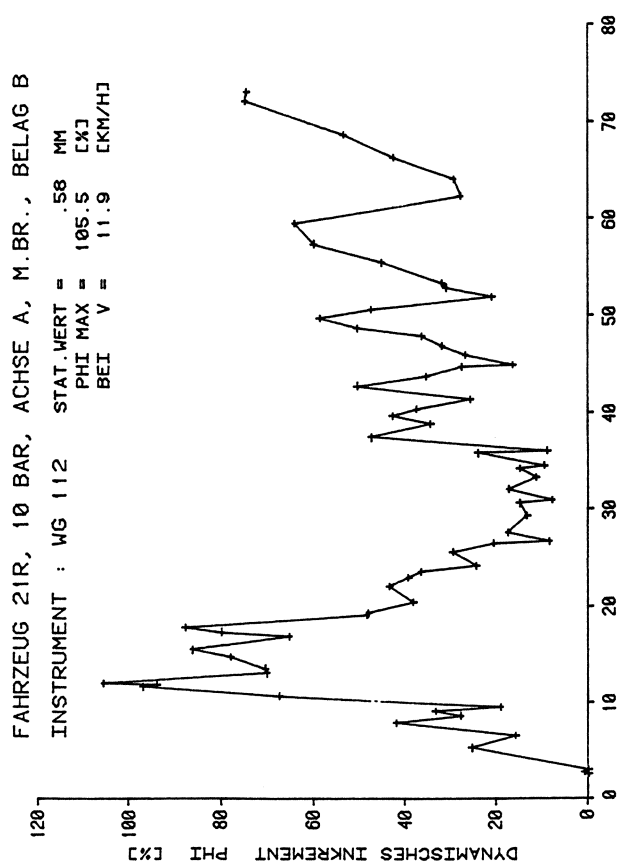


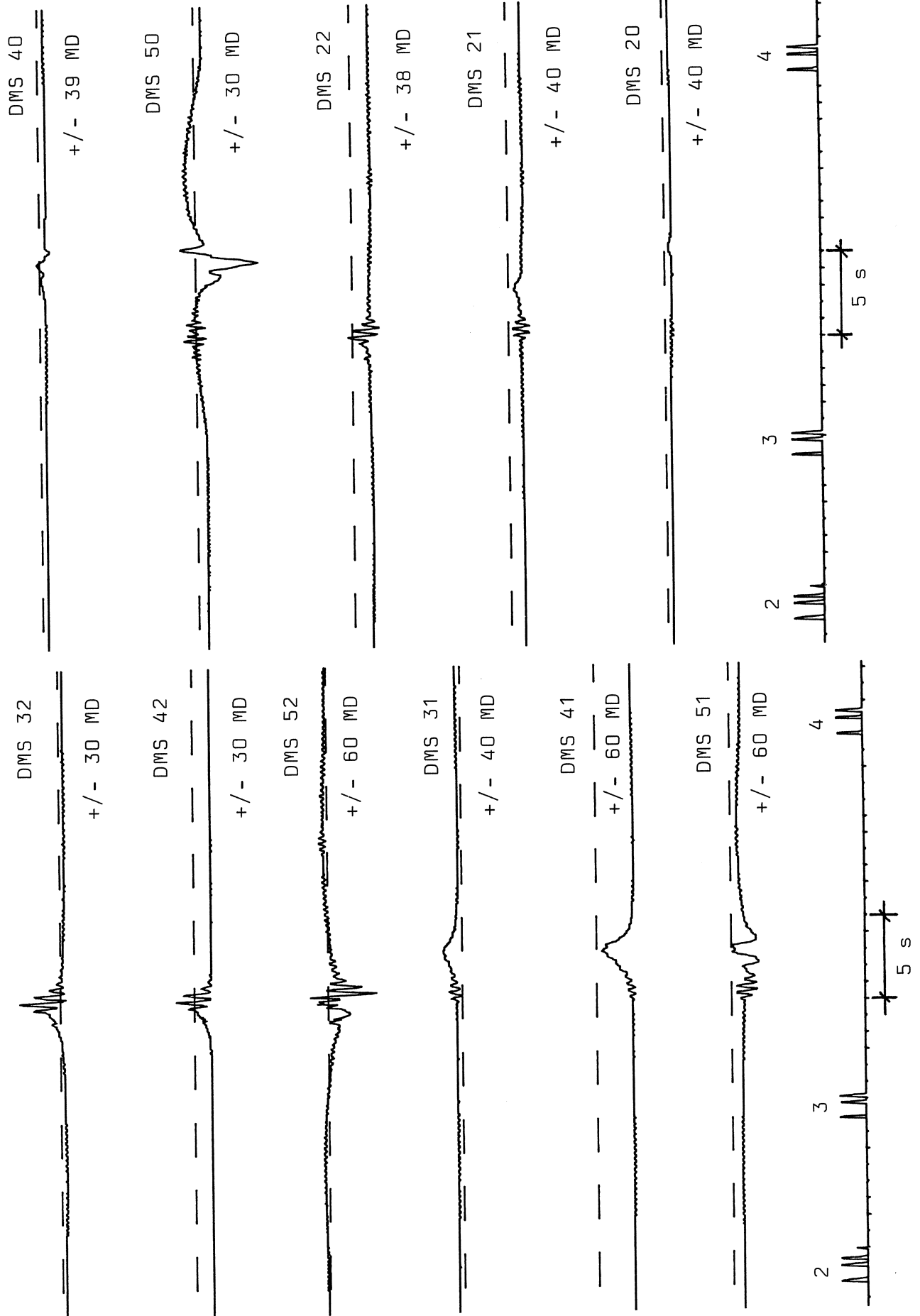




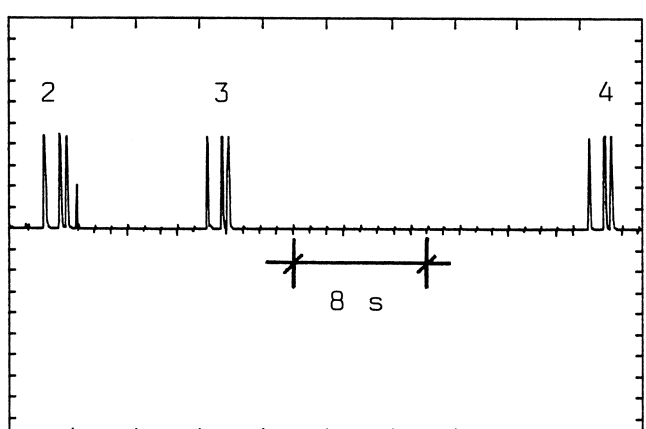
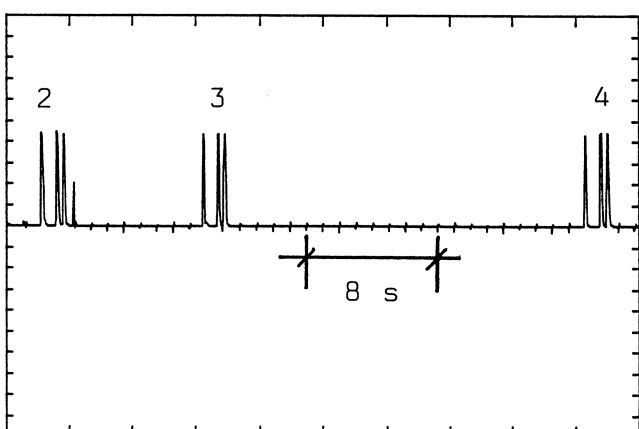
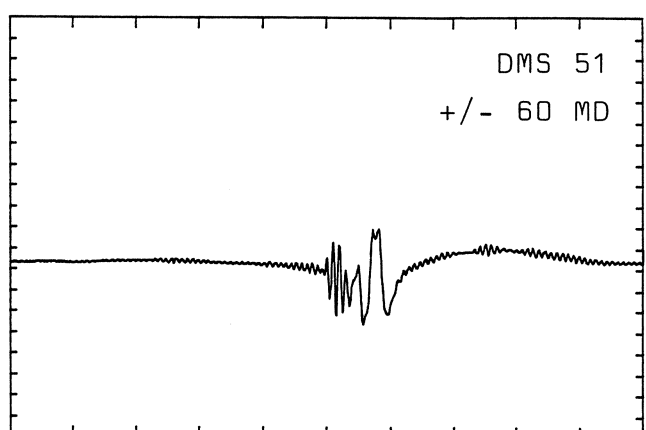
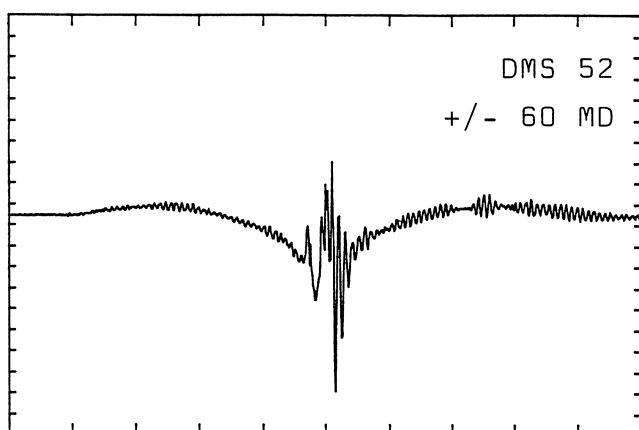
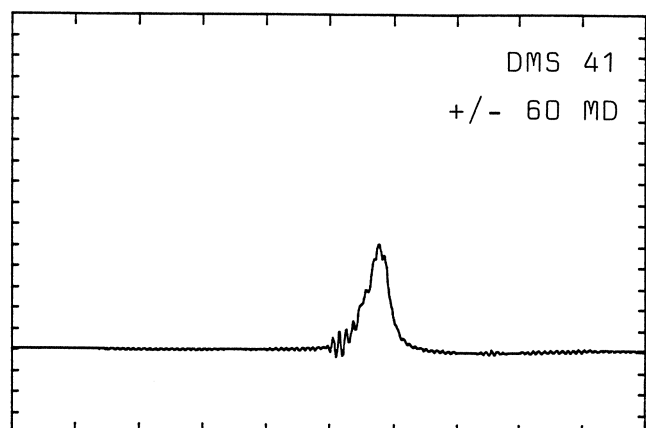
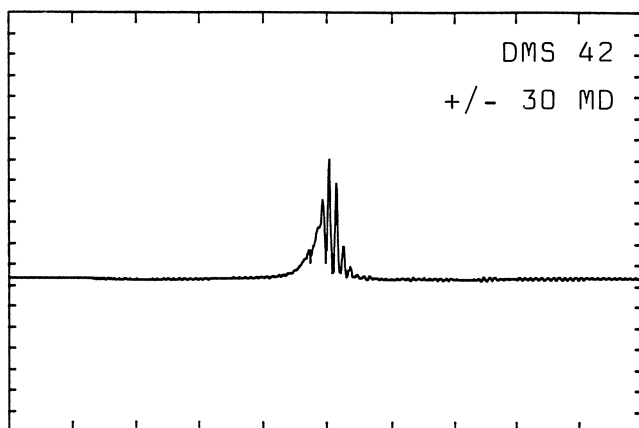
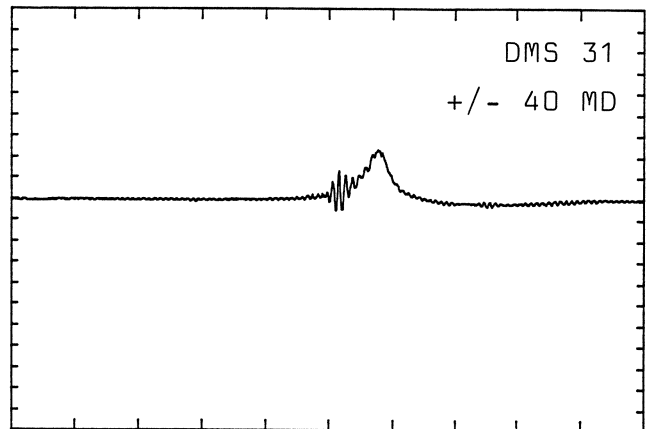
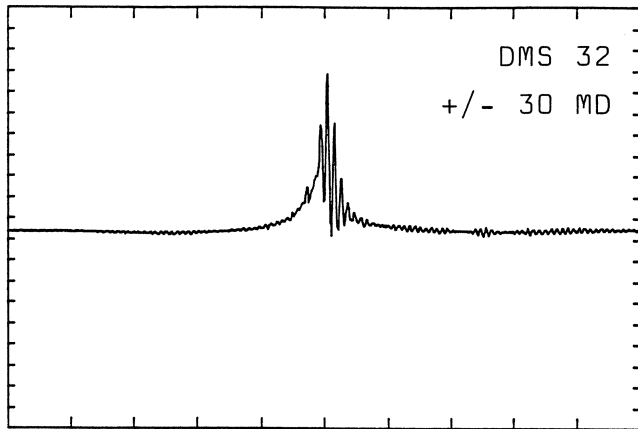


Versuchsserie 21R10AmB, Durchbiegungen

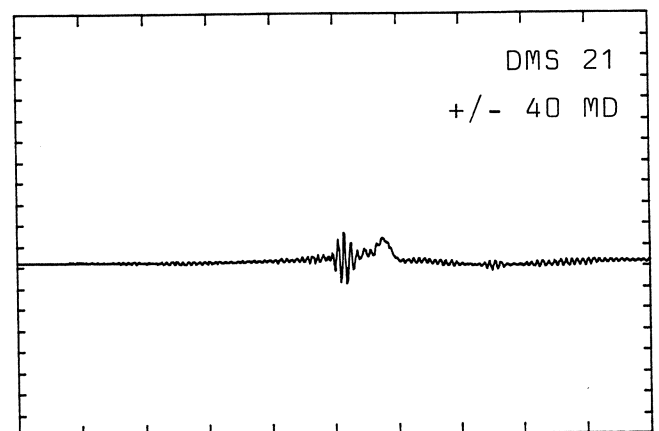
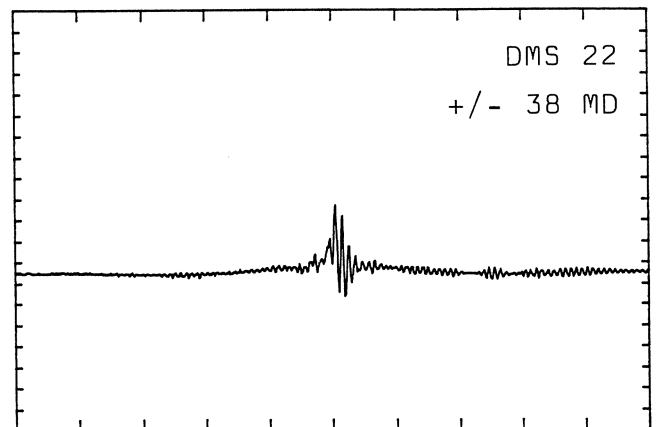
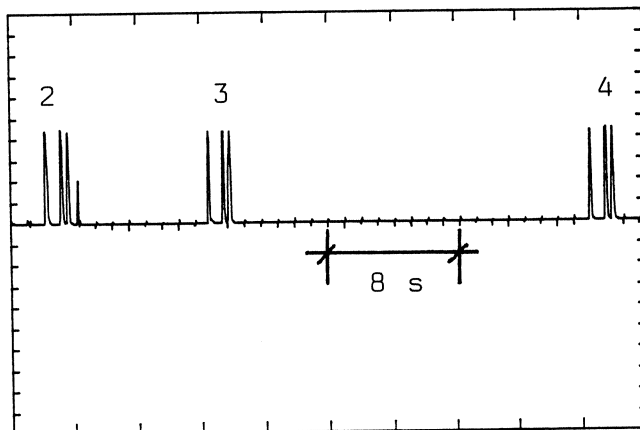
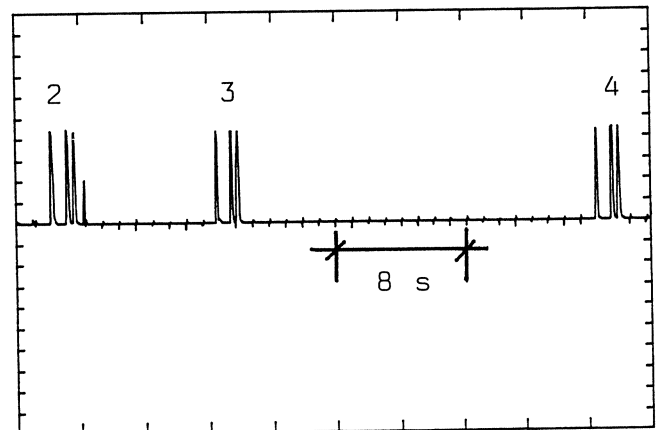
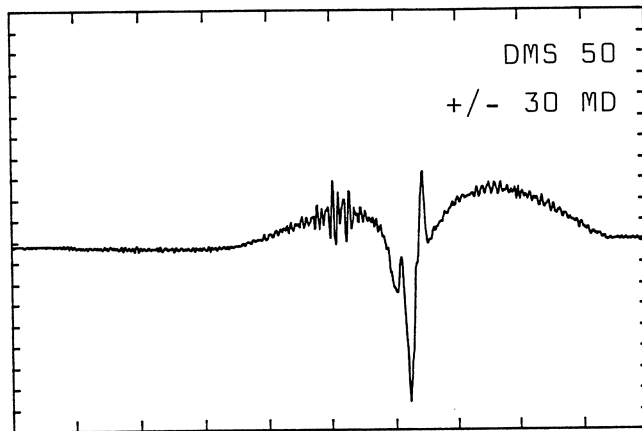
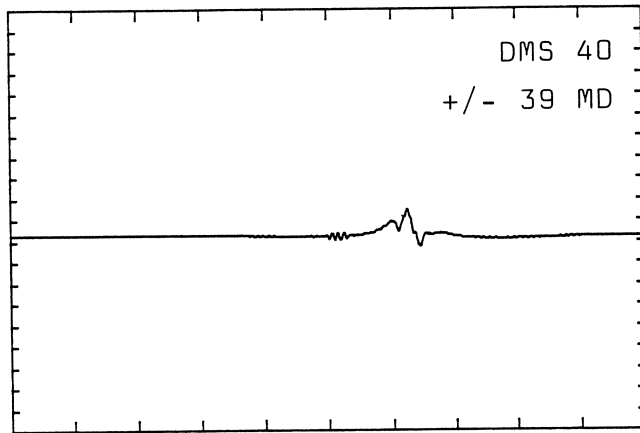




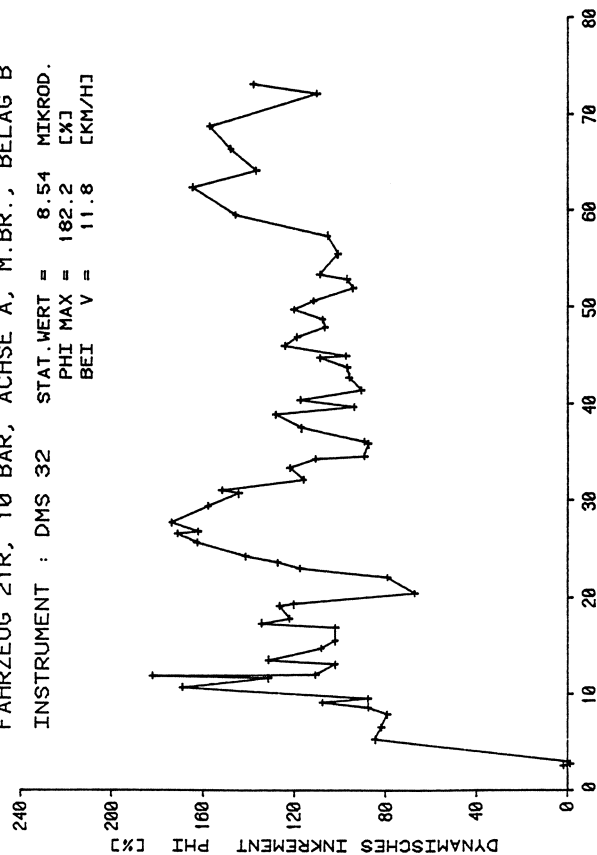
Versuch Nr. 5122, 21R10AmB, $v = 11.82 \text{ km/h}$, Dehnungen



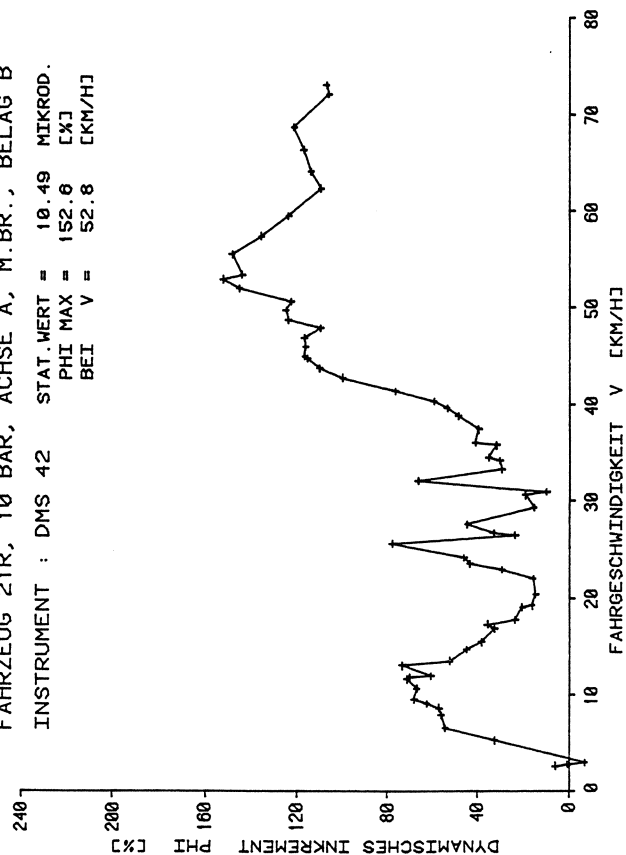
Versuch Nr. 5122, 21R10AmB, $v = 11.82 \text{ km/h}$, Dehnungen



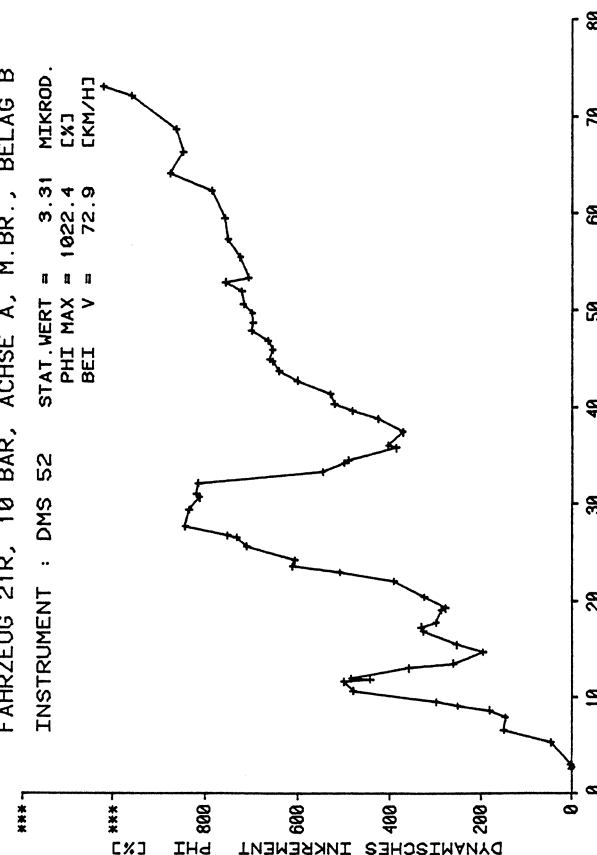
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 32 STAT.WERT = 8.54 MIKROD.
PHI MAX = 182.2 [%]
BEI V = 11.8 [KM/H]



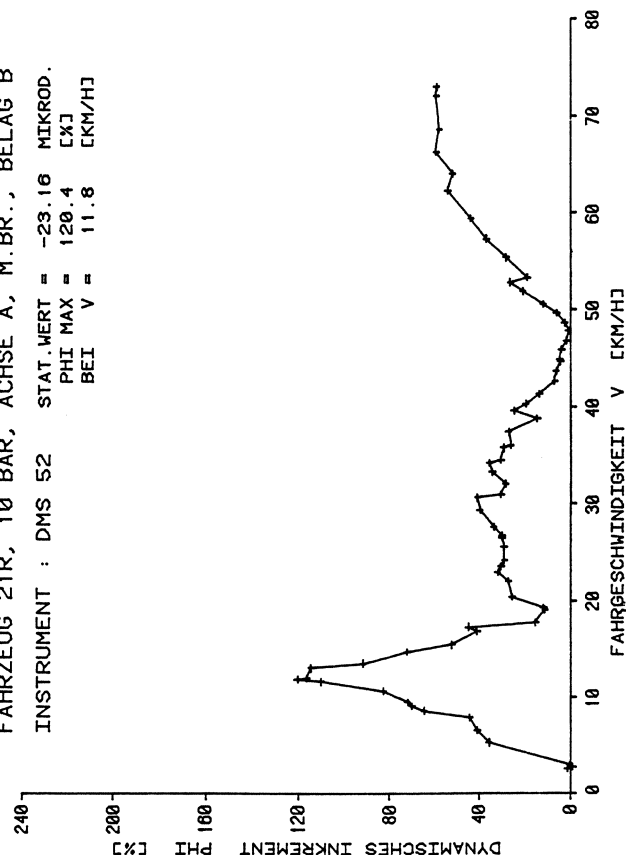
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 42 STAT.WERT = 10.49 MIKROD.
PHI MAX = 152.6 [%]
BEI V = 52.8 [KM/H]



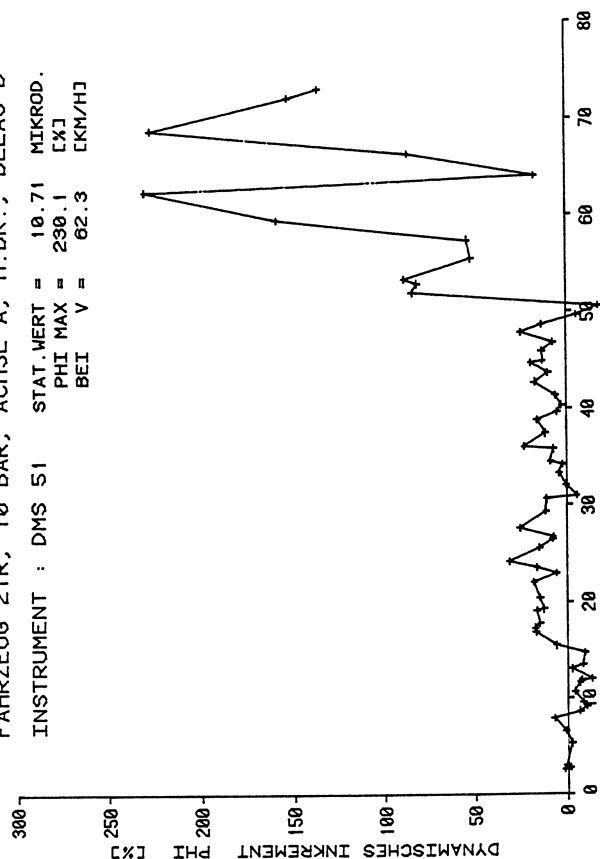
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 52 STAT.WERT = 9.31 MIKROD.
PHI MAX = 1022.4 [%]
BEI V = 72.9 [KM/H]



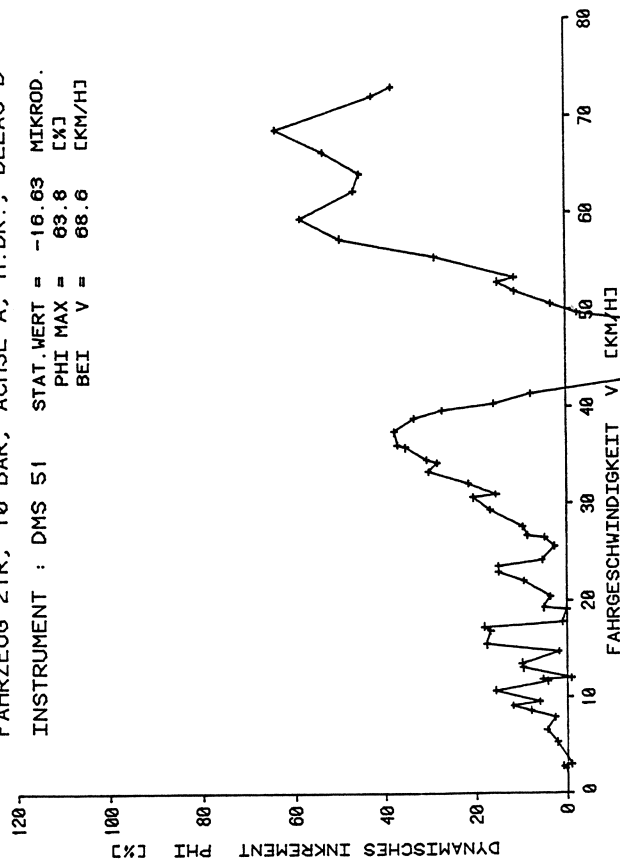
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 52 STAT.WERT = -23.16 MIKROD.
PHI MAX = 120.4 [%]
BEI V = 11.8 [KM/H]



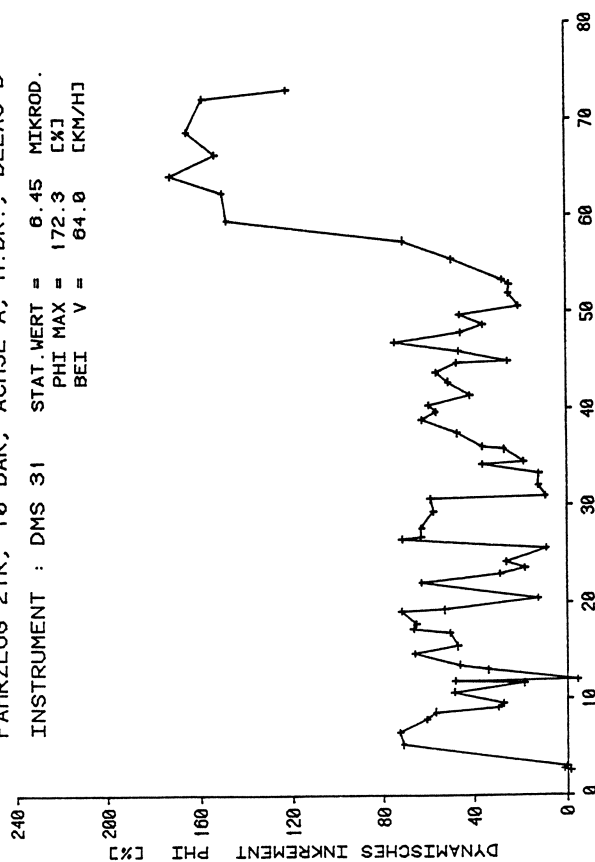
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 51 STAT.WERT = 10.71 MIKROD.
PHI MAX = 230.1 C%
BEI V = 62.3 CKM/HJ



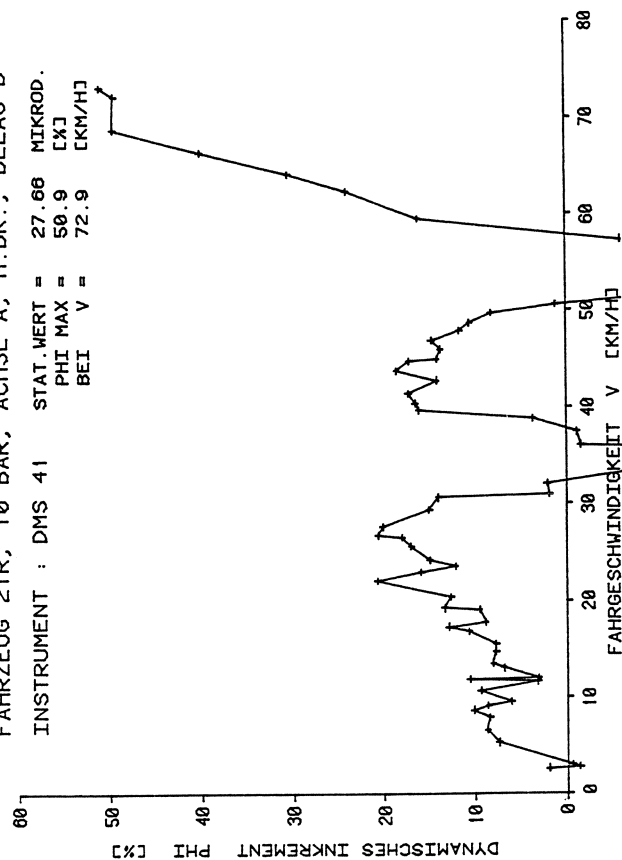
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 51 STAT.WERT = -16.63 MIKROD.
PHI MAX = 69.8 C%
BEI V = 68.6 CKM/HJ

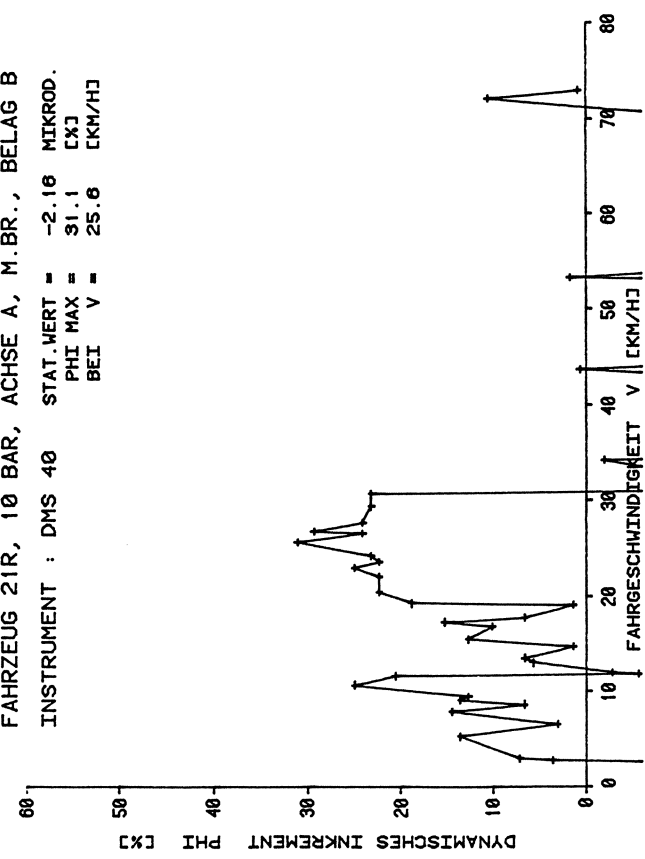
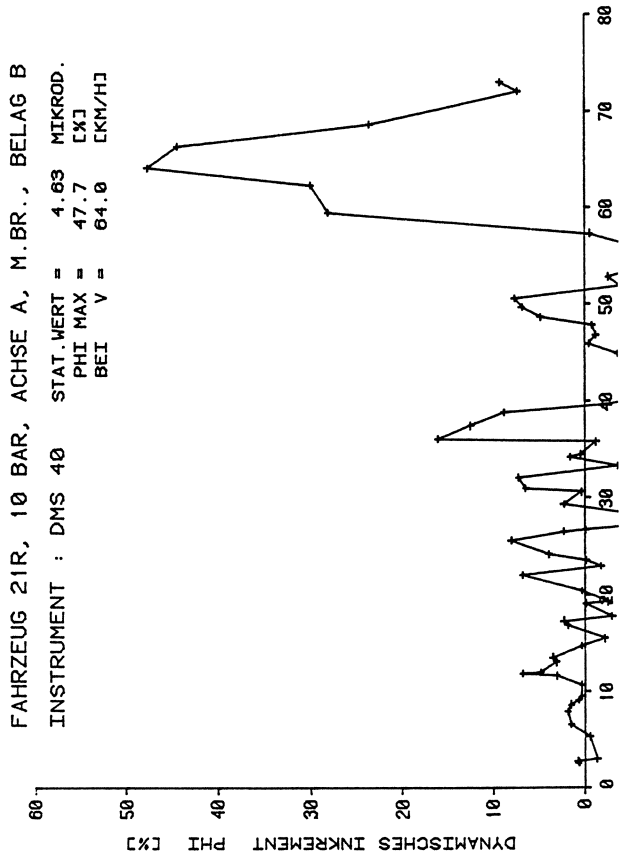
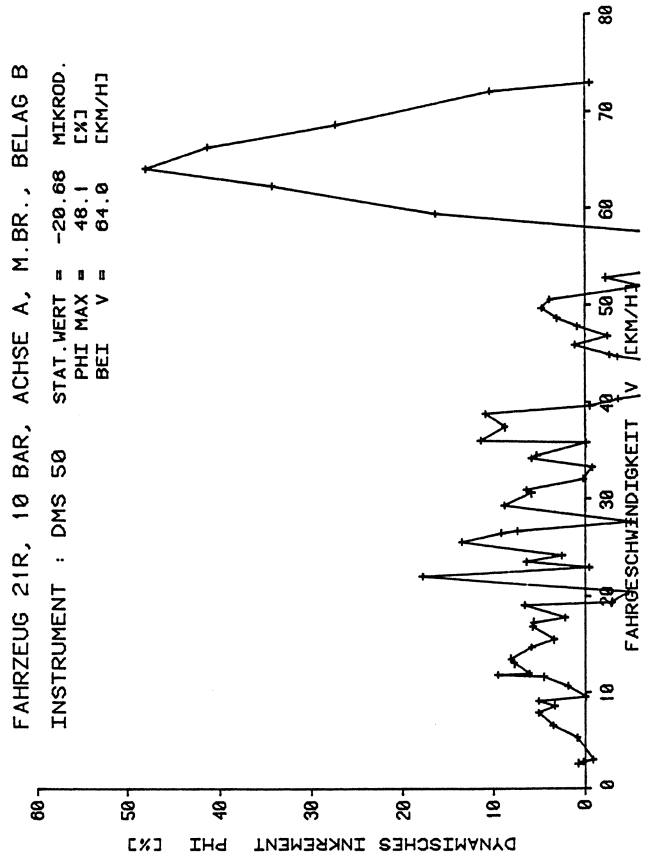
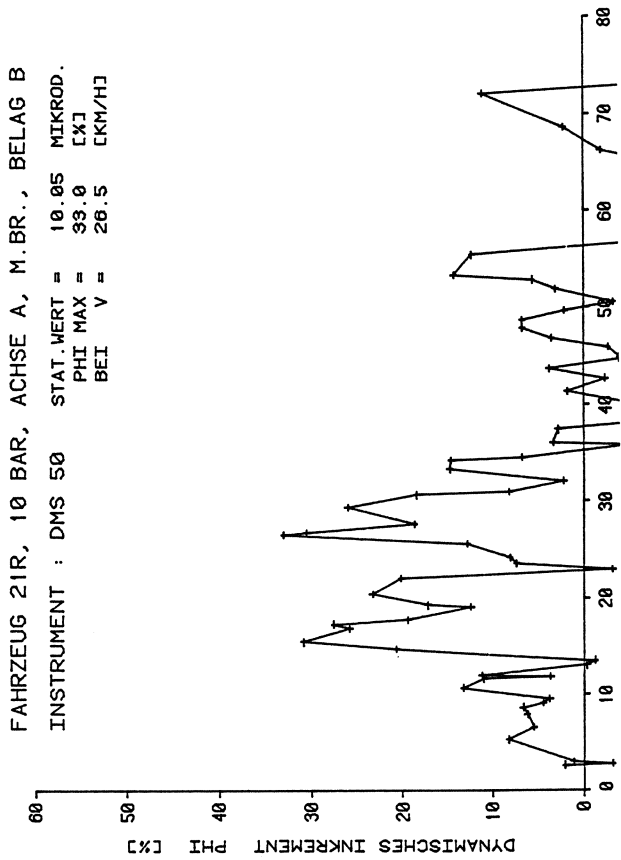


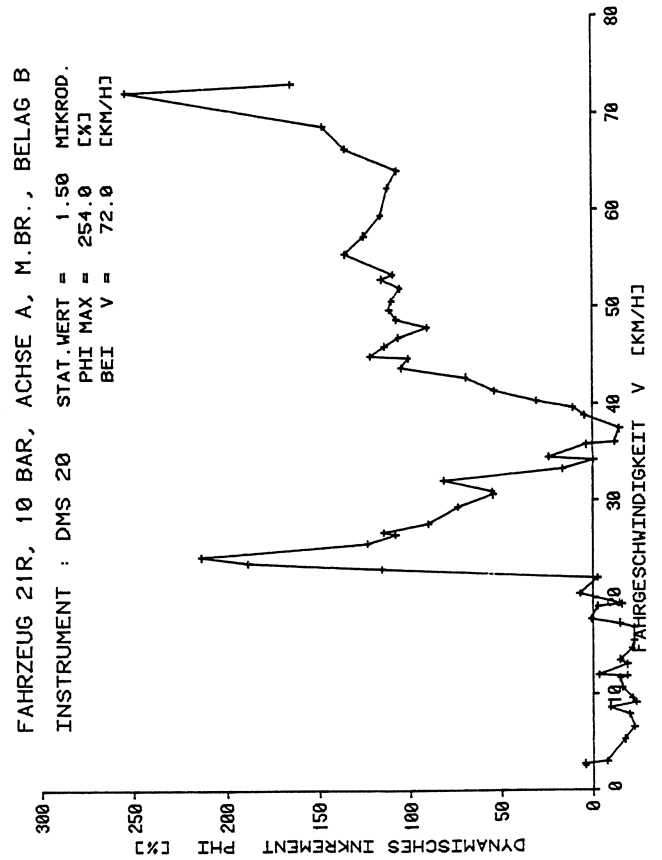
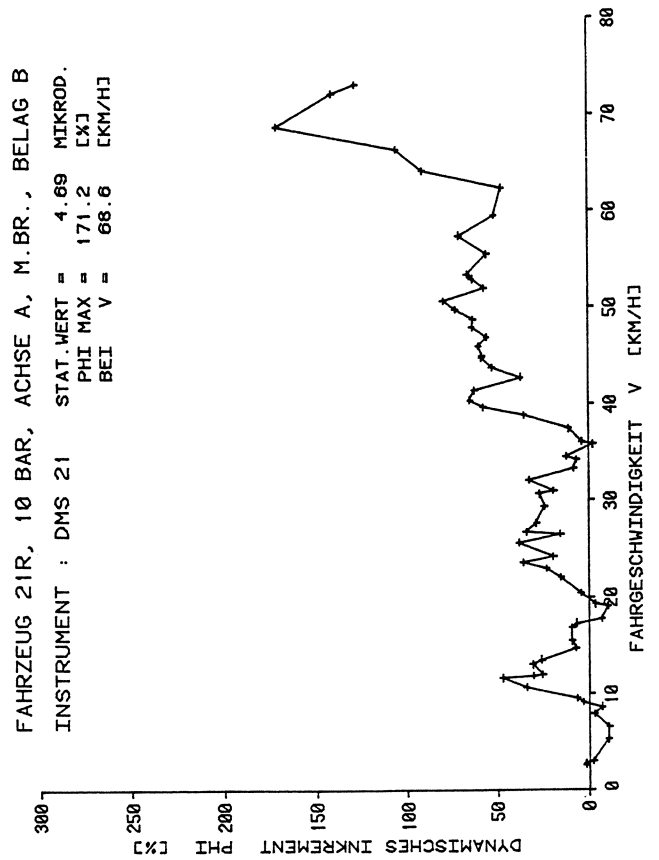
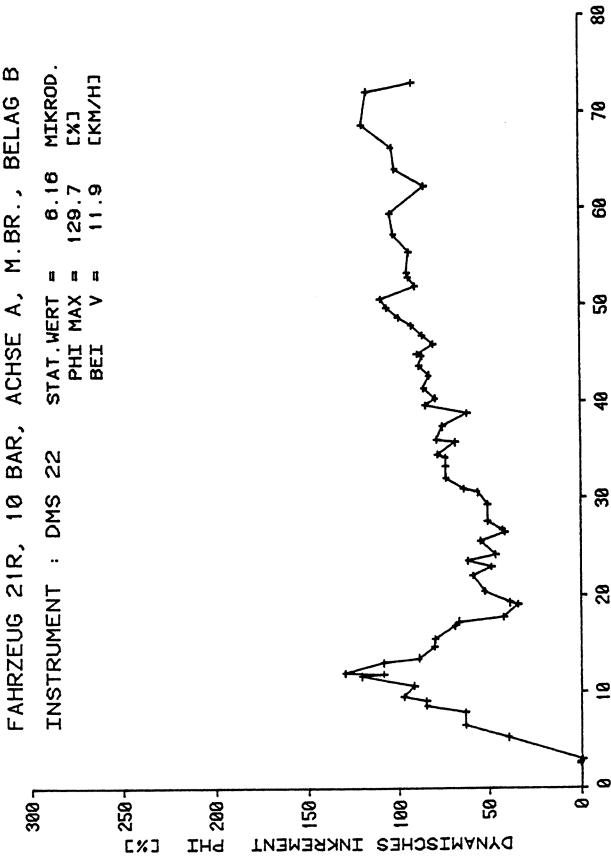
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 31 STAT.WERT = 6.45 MIKROD.
PHI MAX = 172.3 C%
BEI V = 64.8 CKM/HJ



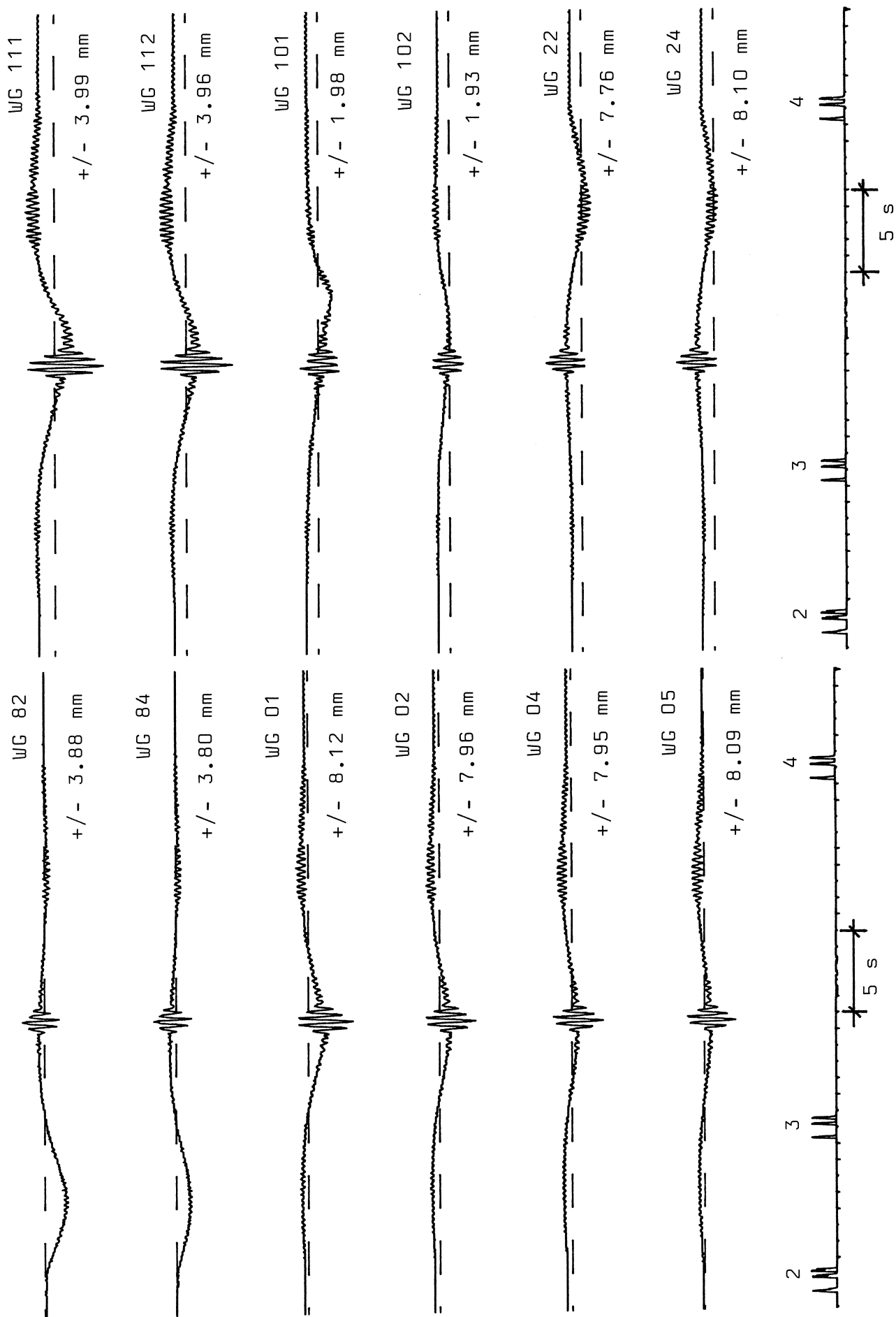
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE A, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : DMS 41 STAT.WERT = 27.66 MIKROD.
PHI MAX = 50.9 C%
BEI V = 72.9 CKM/HJ



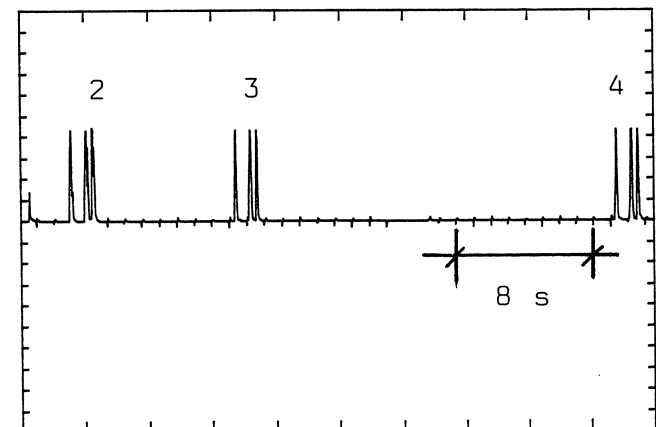
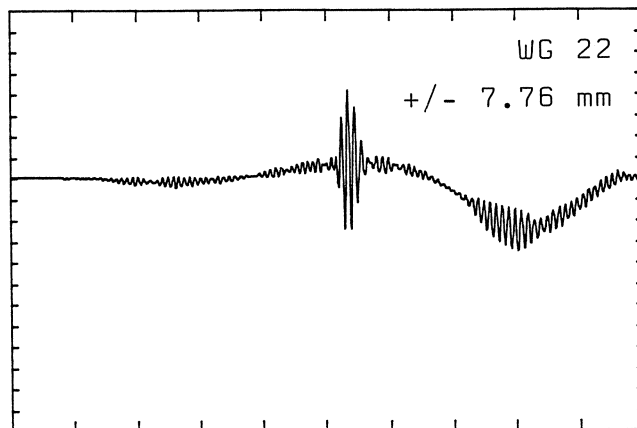
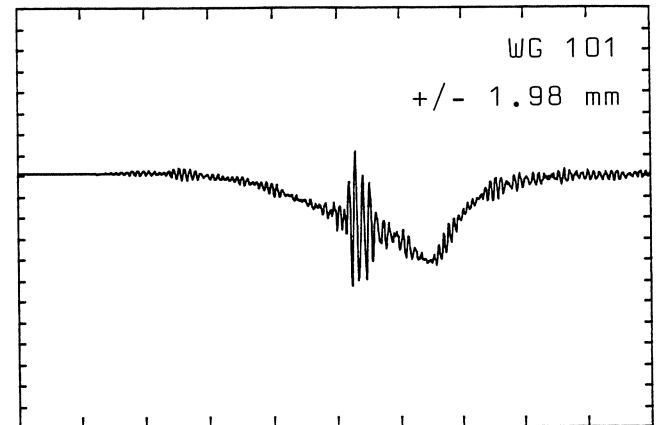
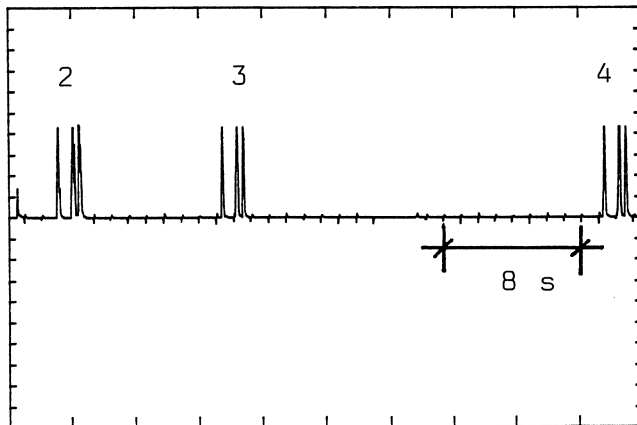
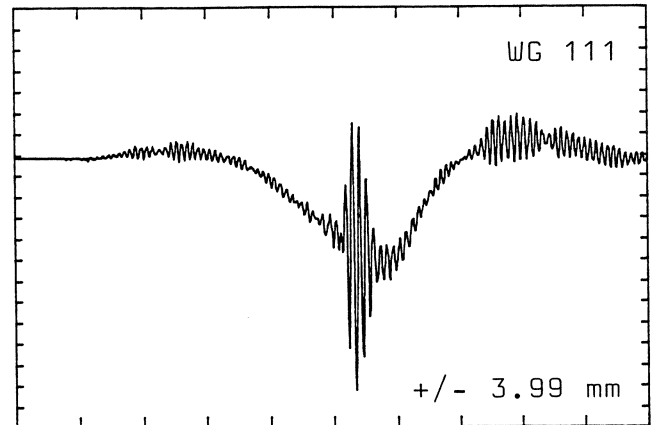
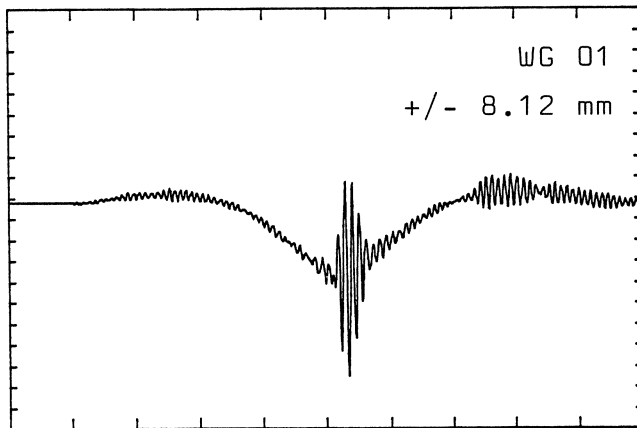
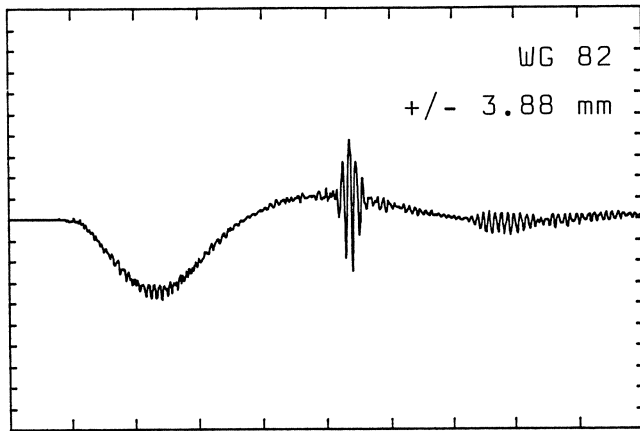




Versuch Nr. 5252, 21R10Kmb, $v = 12.73 \text{ km/h}$, Durchbiegungen

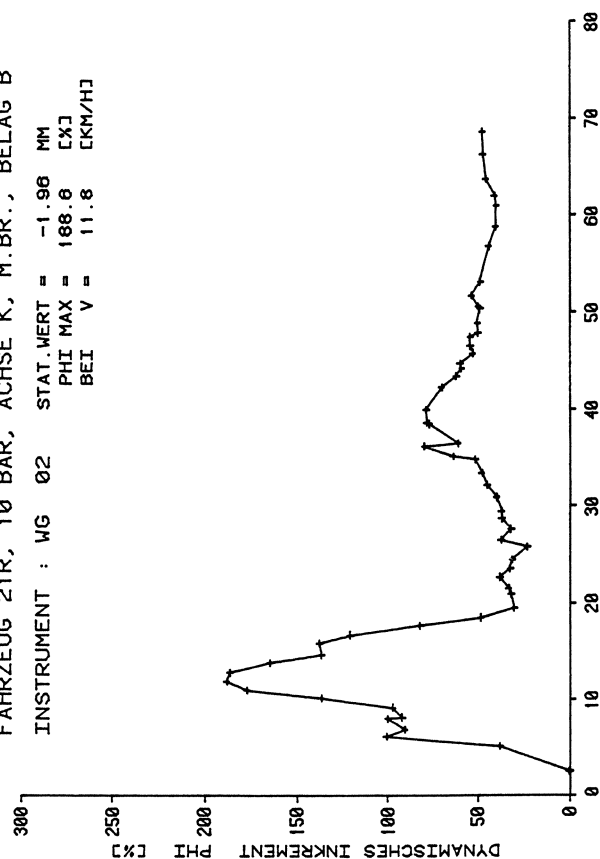


Versuch Nr. 5252, 21R10KMB, $v = 12.73 \text{ km/h}$, Durchbiegungen

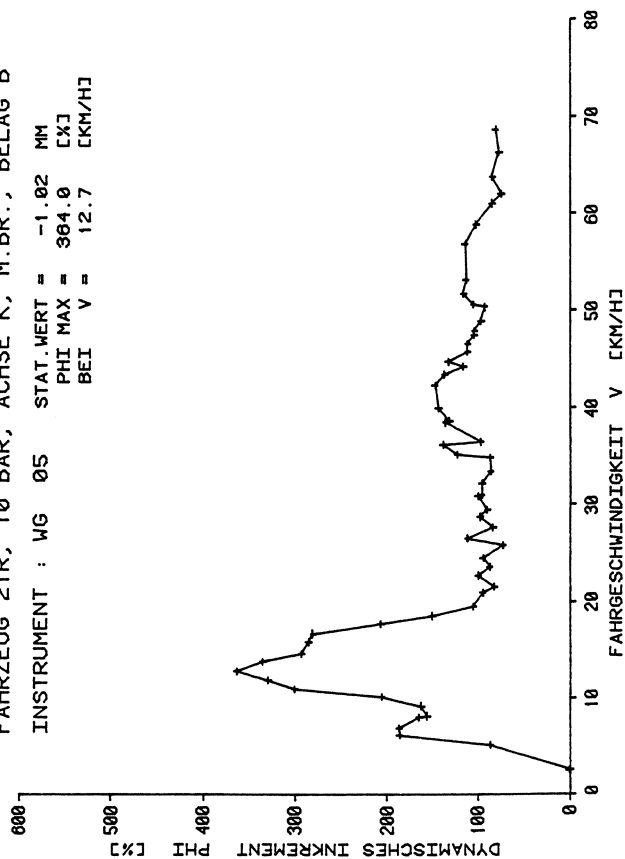


Versuchsserie 21R10KmB, Durchbiegungen

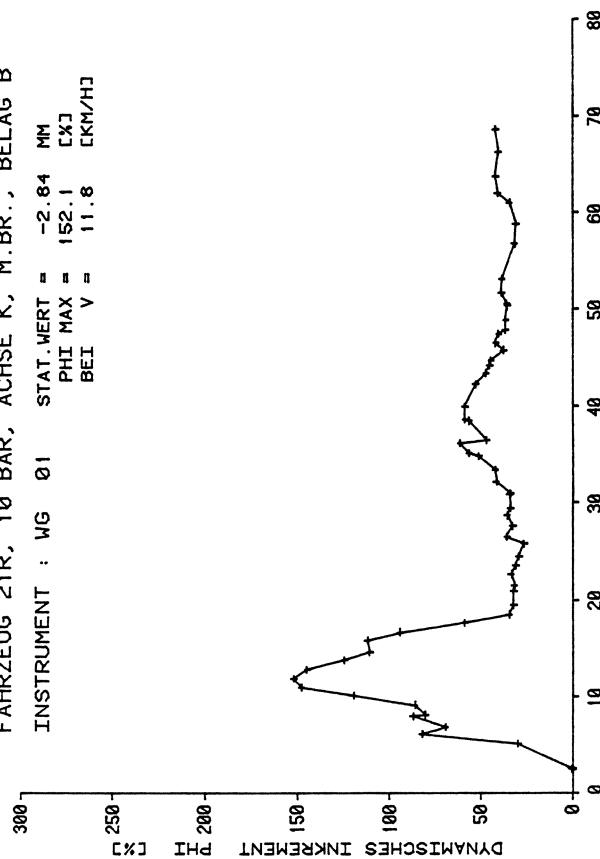
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 02 STAT.WERT = -1.96 MM
PHI MAX = 188.6 [X]
BEI V = 11.8 [KM/H]



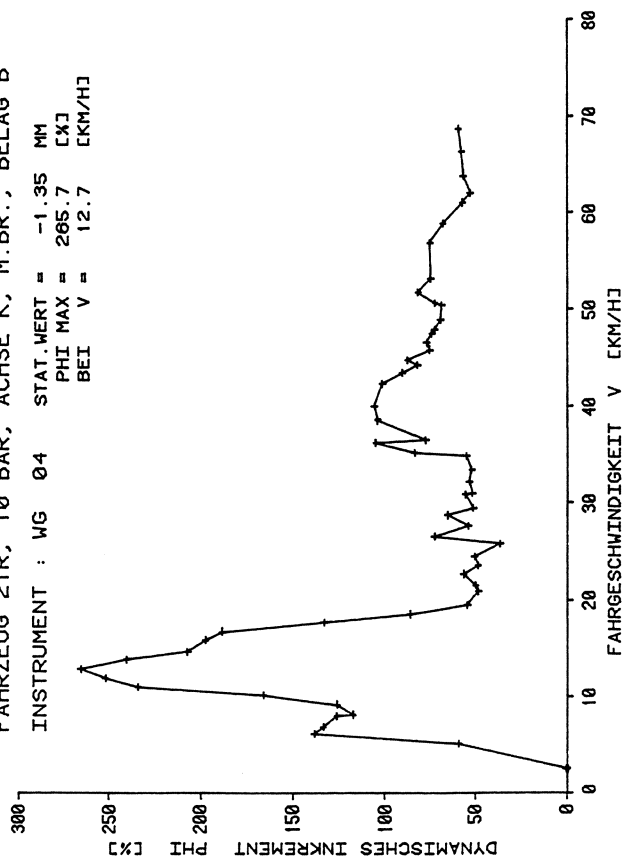
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 05 STAT.WERT = -1.02 MM
PHI MAX = 364.0 [X]
BEI V = 12.7 [KM/H]



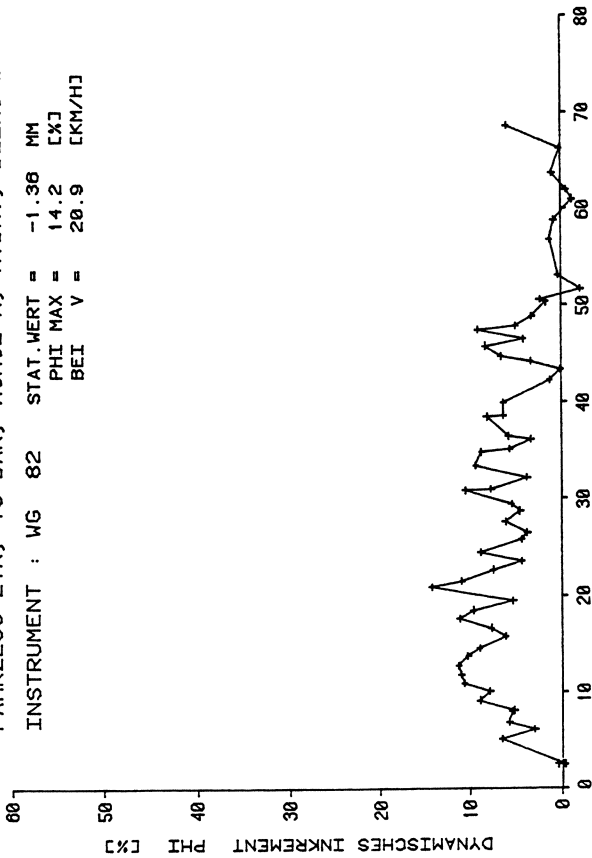
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 01 STAT.WERT = -2.84 MM
PHI MAX = 152.1 [X]
BEI V = 11.8 [KM/H]



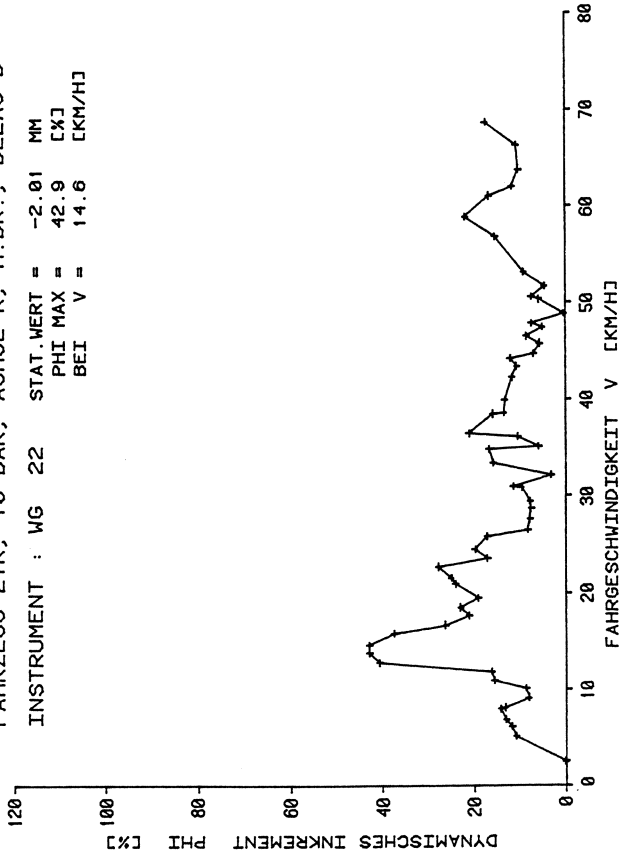
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 04 STAT.WERT = -1.35 MM
PHI MAX = 265.7 [X]
BEI V = 12.7 [KM/H]



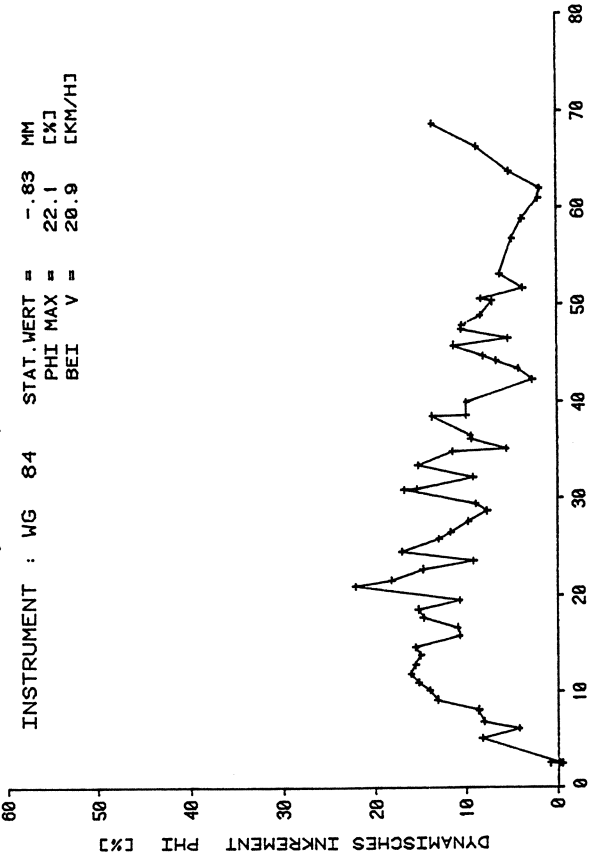
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 82 STAT.WERT = -1.36 MM
PHI MAX = 14.2 [%]
BEI V = 20.9 [KM/H]



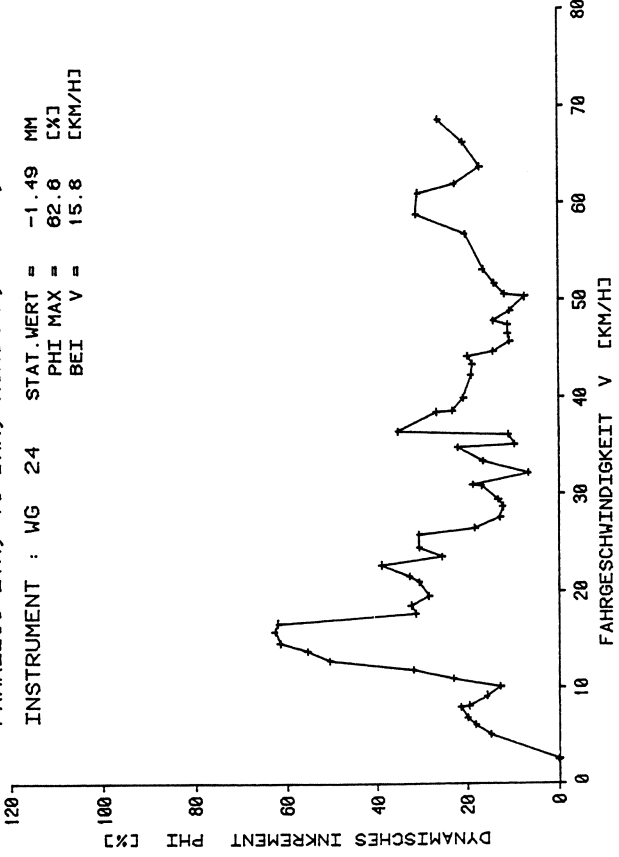
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 22 STAT.WERT = -2.01 MM
PHI MAX = 42.9 [%]
BEI V = 14.6 [KM/H]



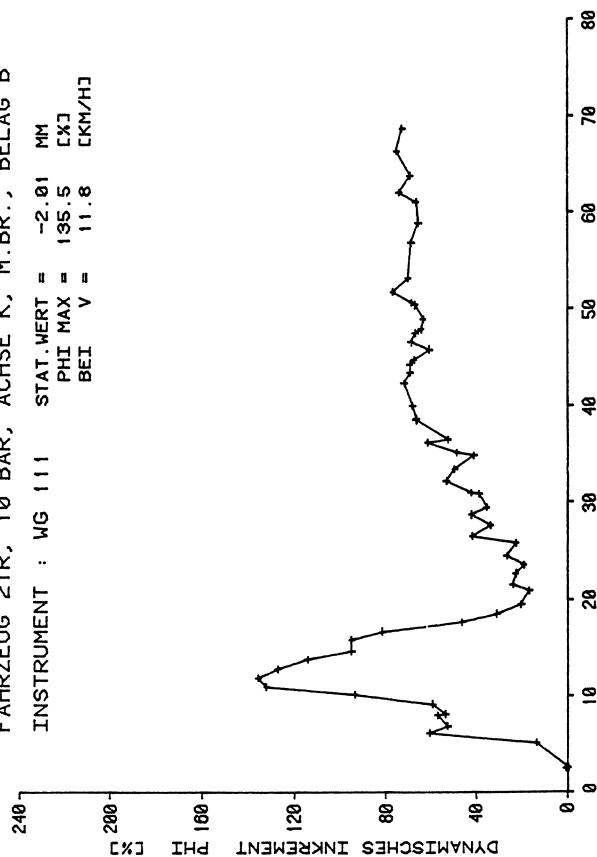
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 84 STAT.WERT = -0.83 MM
PHI MAX = 22.1 [%]
BEI V = 20.9 [KM/H]



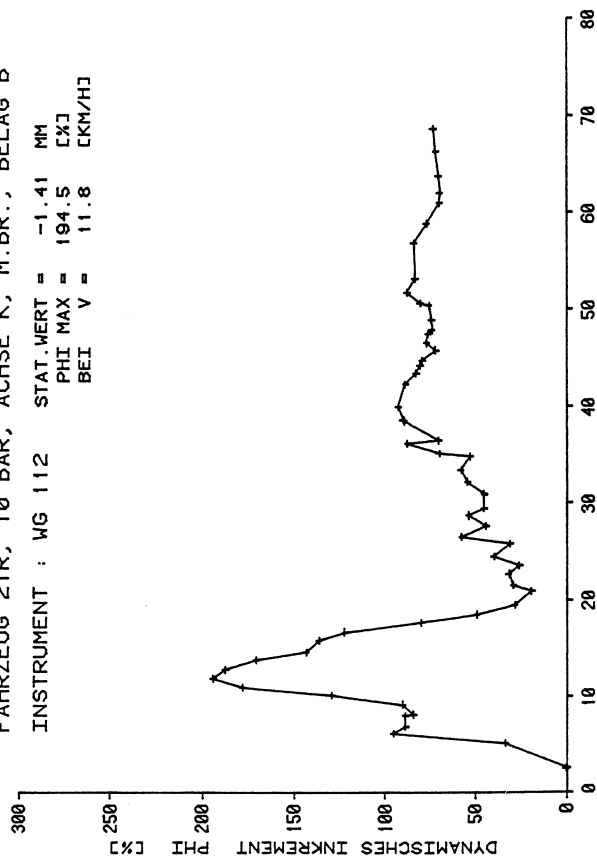
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 24 STAT.WERT = -1.49 MM
PHI MAX = 62.6 [%]
BEI V = 15.8 [KM/H]



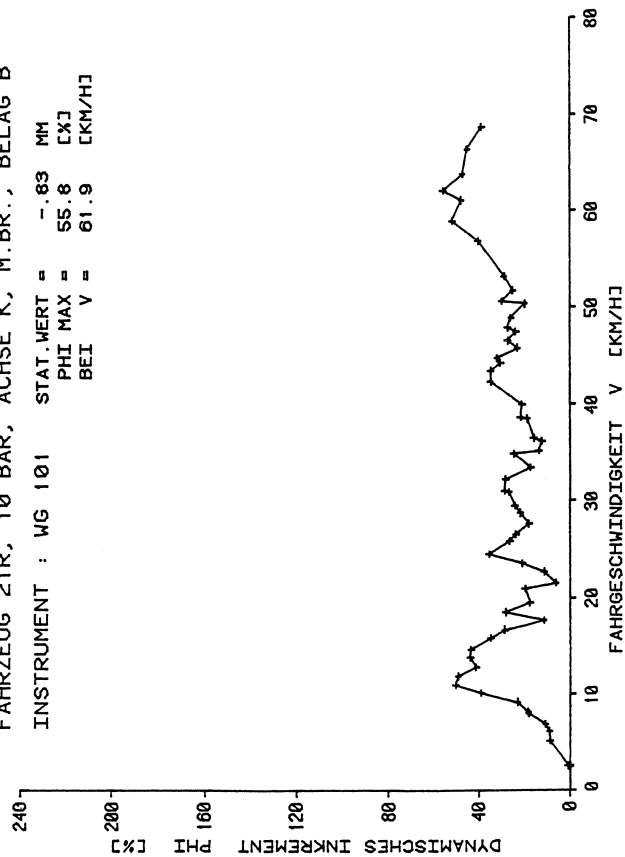
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 111 STAT.WERT = -2.01 MM
PHI MAX = 135.5 [X]
BEI V = 11.8 [KM/H]



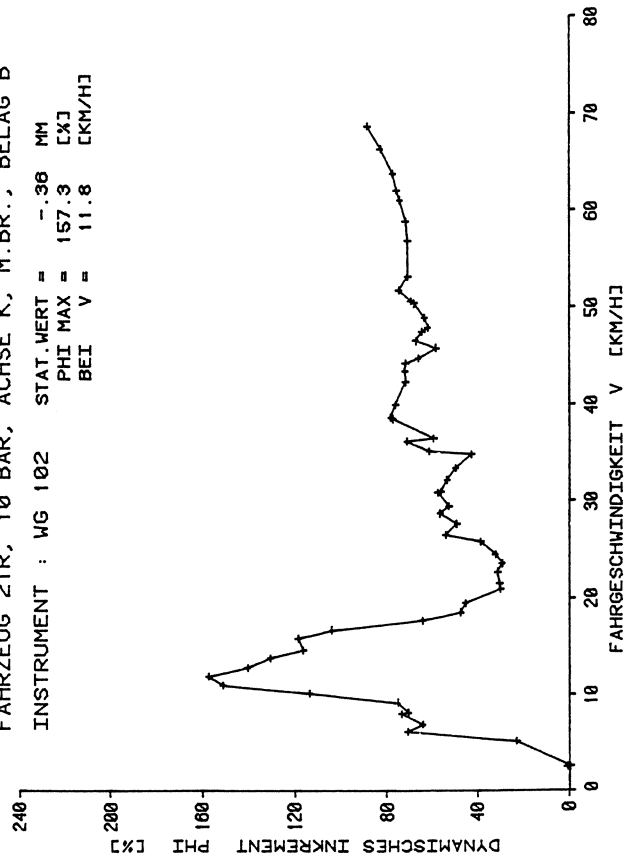
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 112 STAT.WERT = -1.41 MM
PHI MAX = 194.5 [X]
BEI V = 11.8 [KM/H]



FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 101 STAT.WERT = -1.83 MM
PHI MAX = 55.8 [X]
BEI V = 61.9 [KM/H]

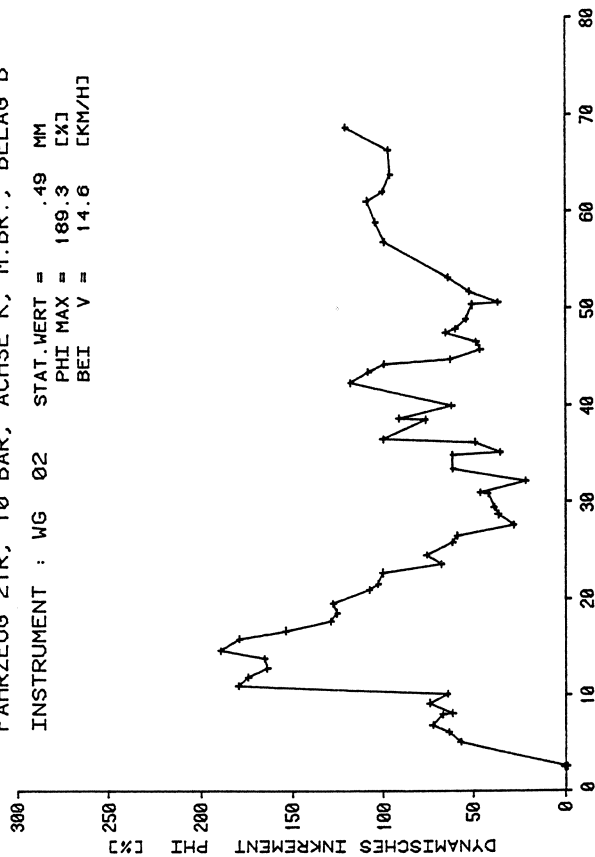


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 102 STAT.WERT = -1.36 MM
PHI MAX = 157.3 [X]
BEI V = 11.8 [KM/H]



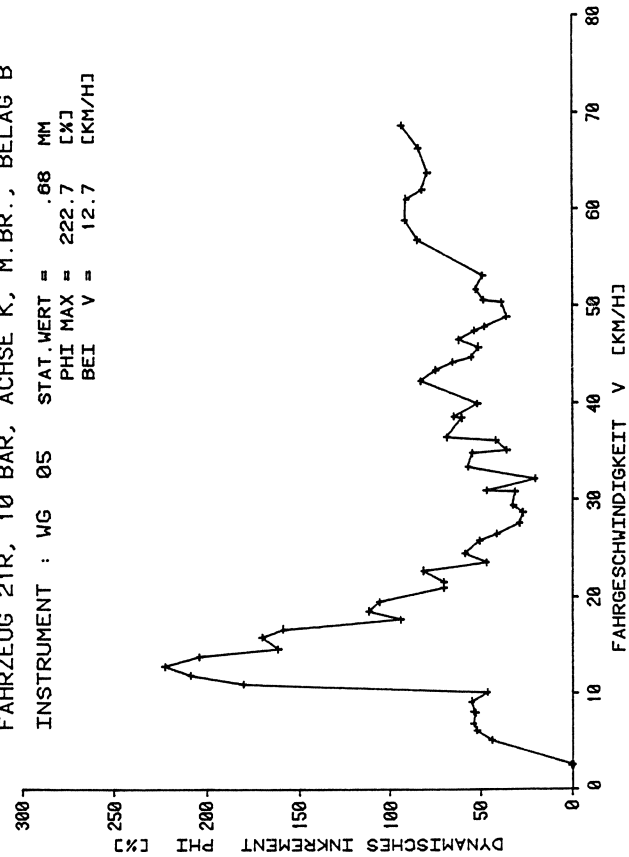
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 02 STAT.WERT = .49 MM
PHI MAX = 169.3 [X]
BEI V = 14.6 [KM/H]



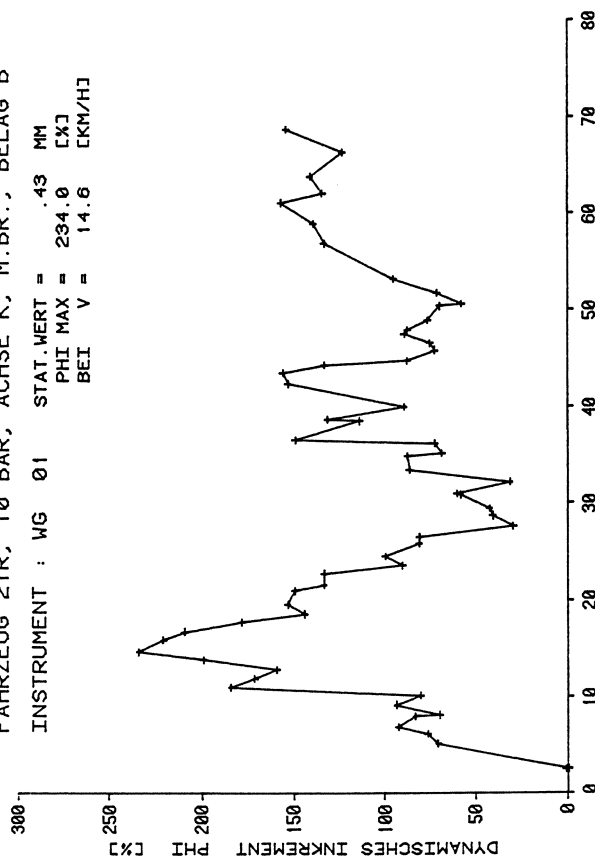
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 05 STAT.WERT = .68 MM
PHI MAX = 222.7 [X]
BEI V = 12.7 [KM/H]



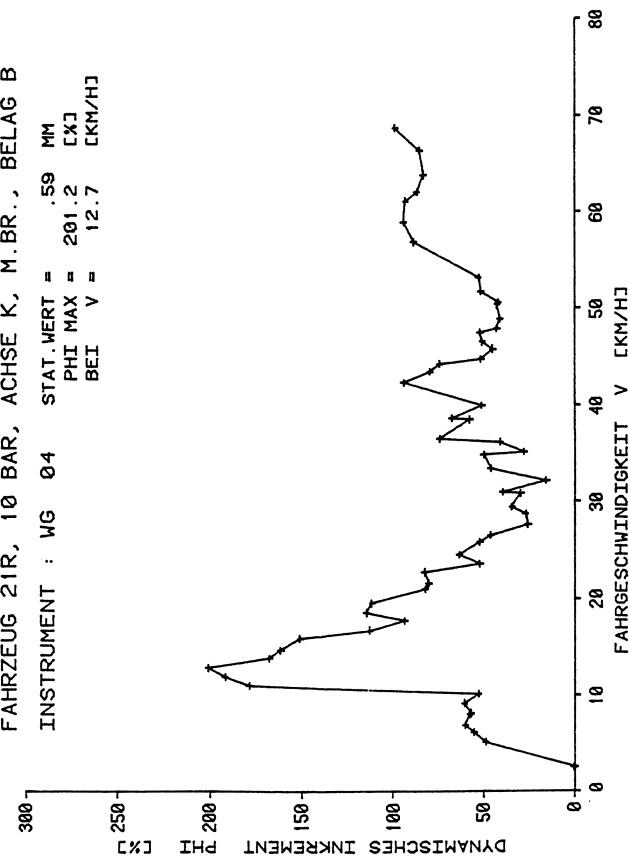
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 01 STAT.WERT = .43 MM
PHI MAX = 234.0 [X]
BEI V = 14.6 [KM/H]

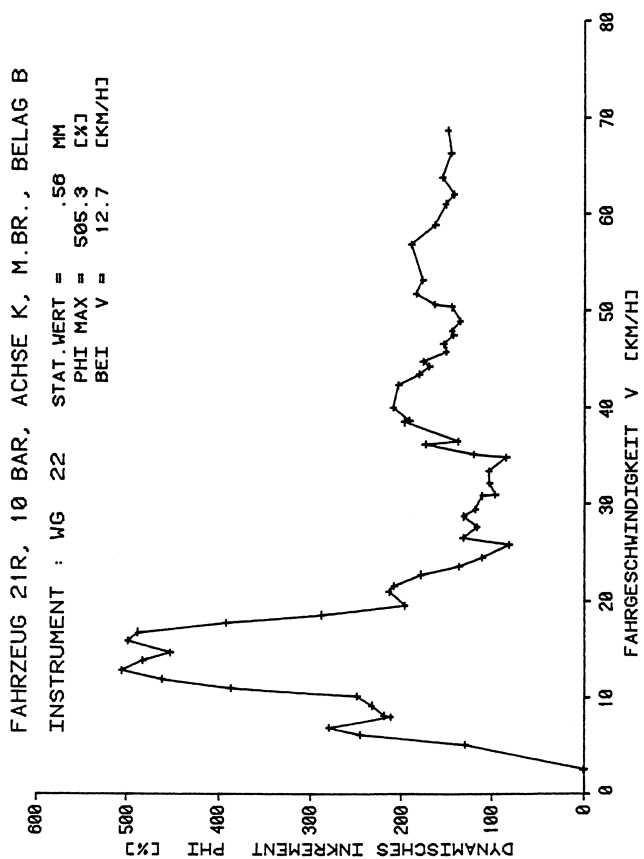
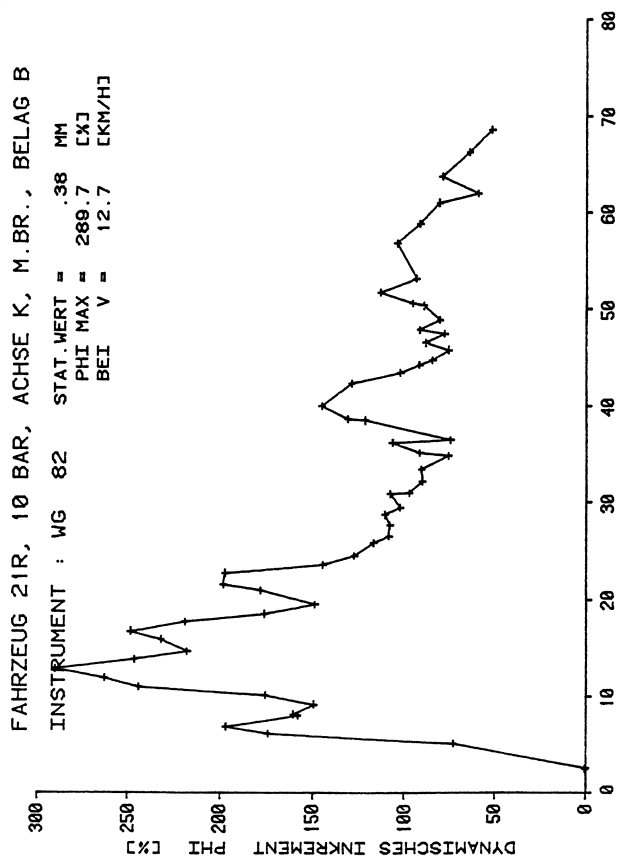
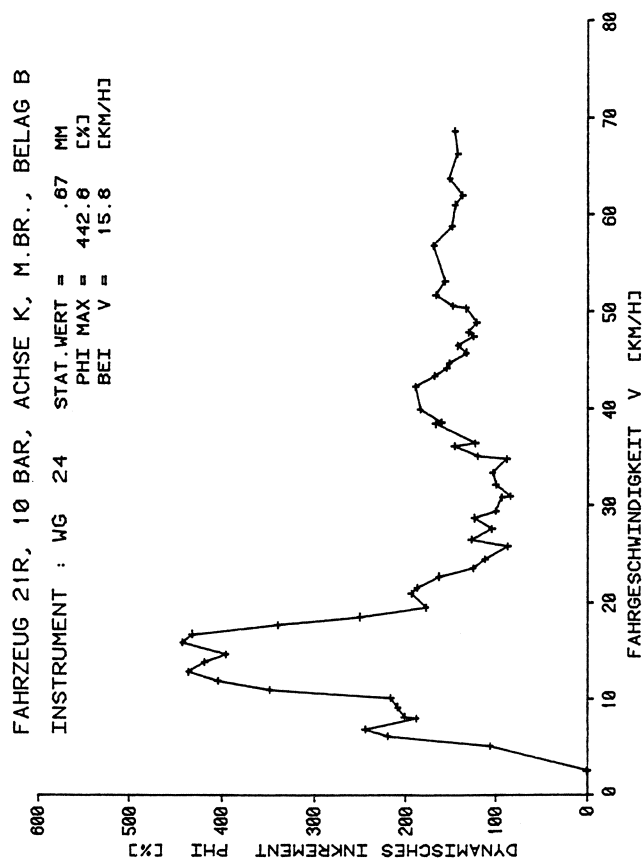
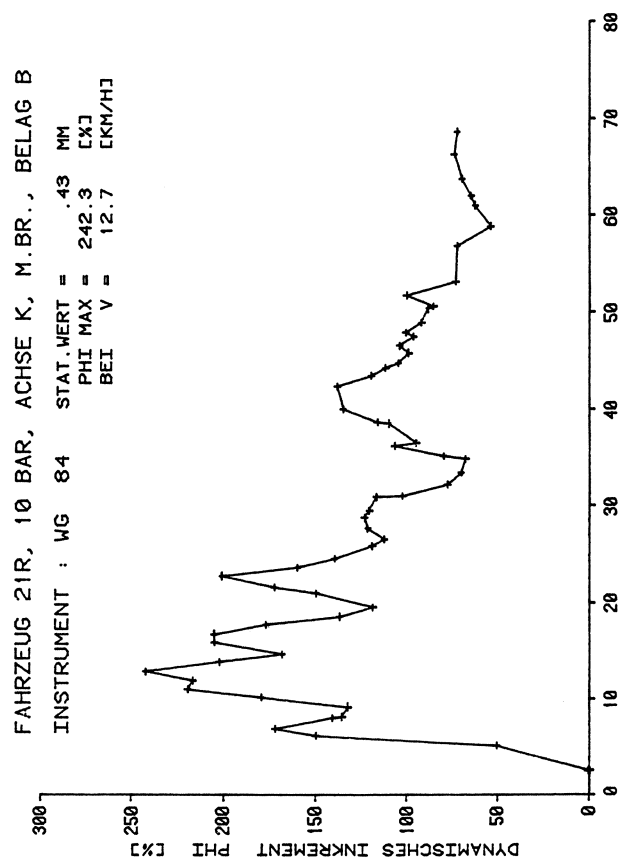


FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B

INSTRUMENT : WG 04 STAT.WERT = .59 MM
PHI MAX = 201.2 [X]
BEI V = 12.7 [KM/H]

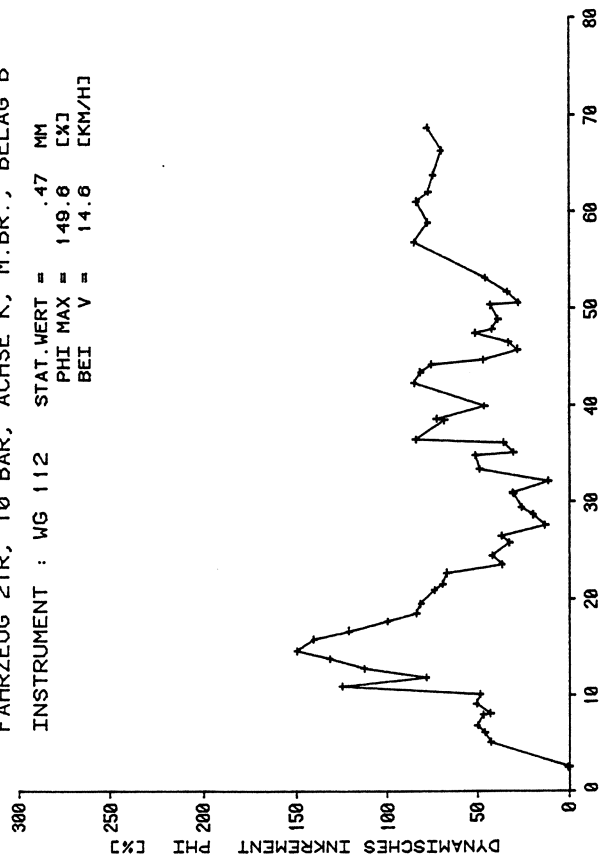


Versuchsserie 21R10KmB, Durchbiegungen

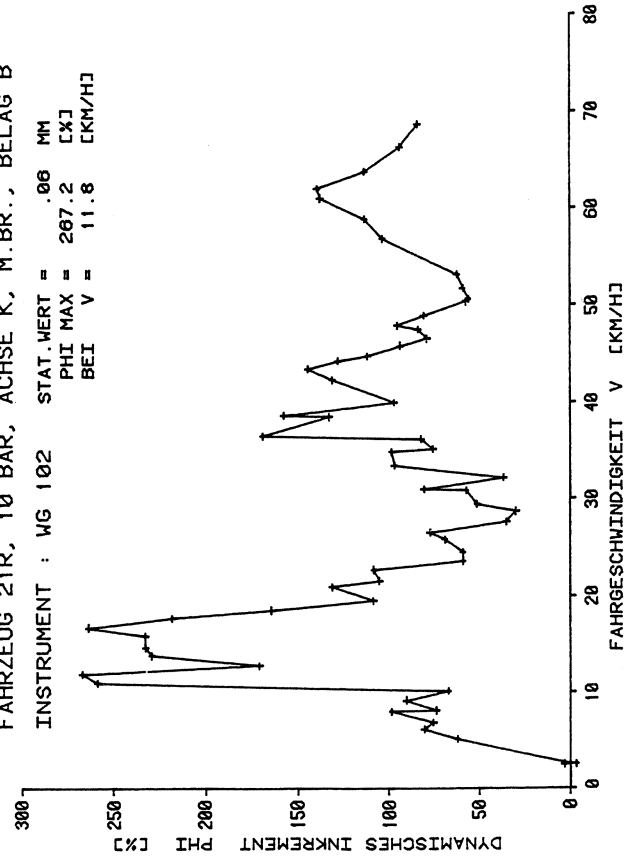


Versuchsserie 21R10KmB, Durchbiegungen

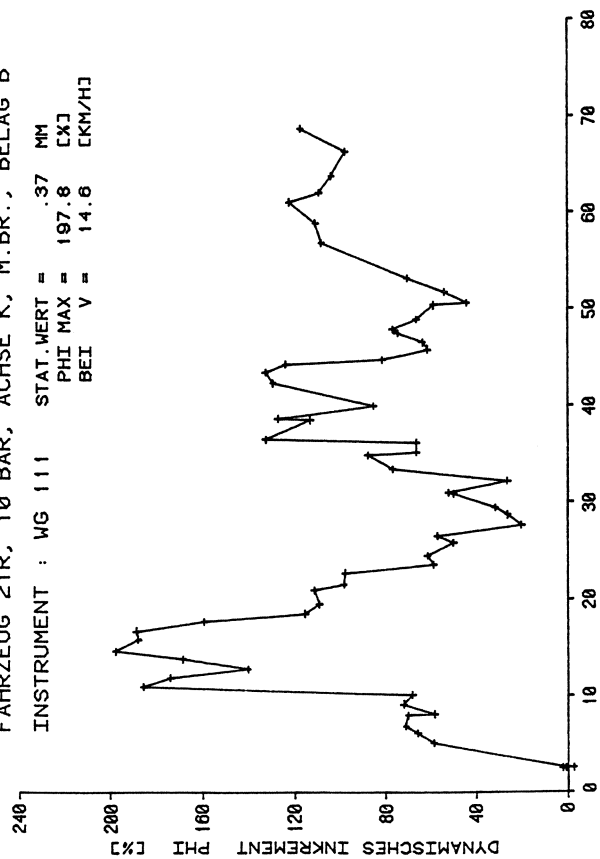
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 112 STAT.WERT = .47 MM
PHI MAX = 149.6 [X]
BEI V = 14.6 [KM/H]



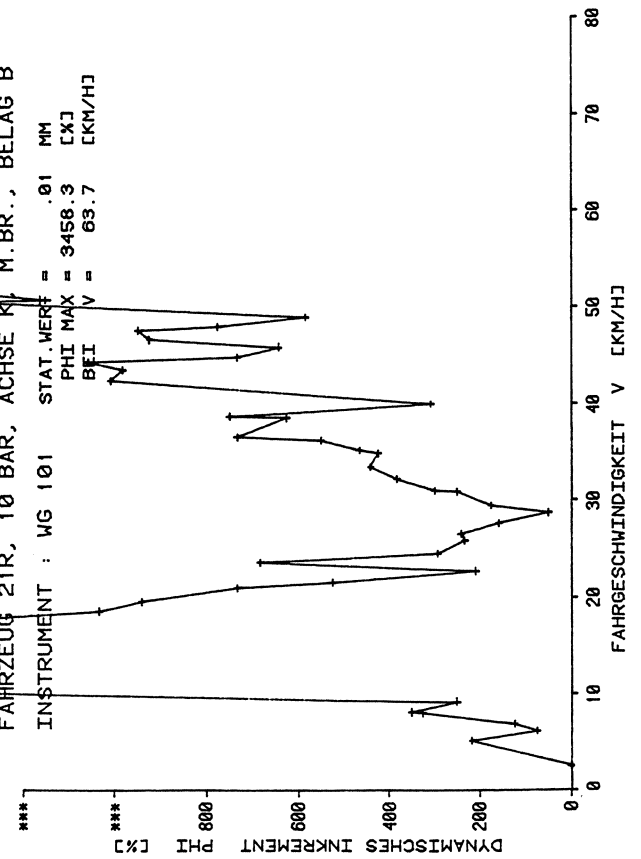
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 102 STAT.WERT = .06 MM
PHI MAX = 267.2 [X]
BEI V = 11.8 [KM/H]



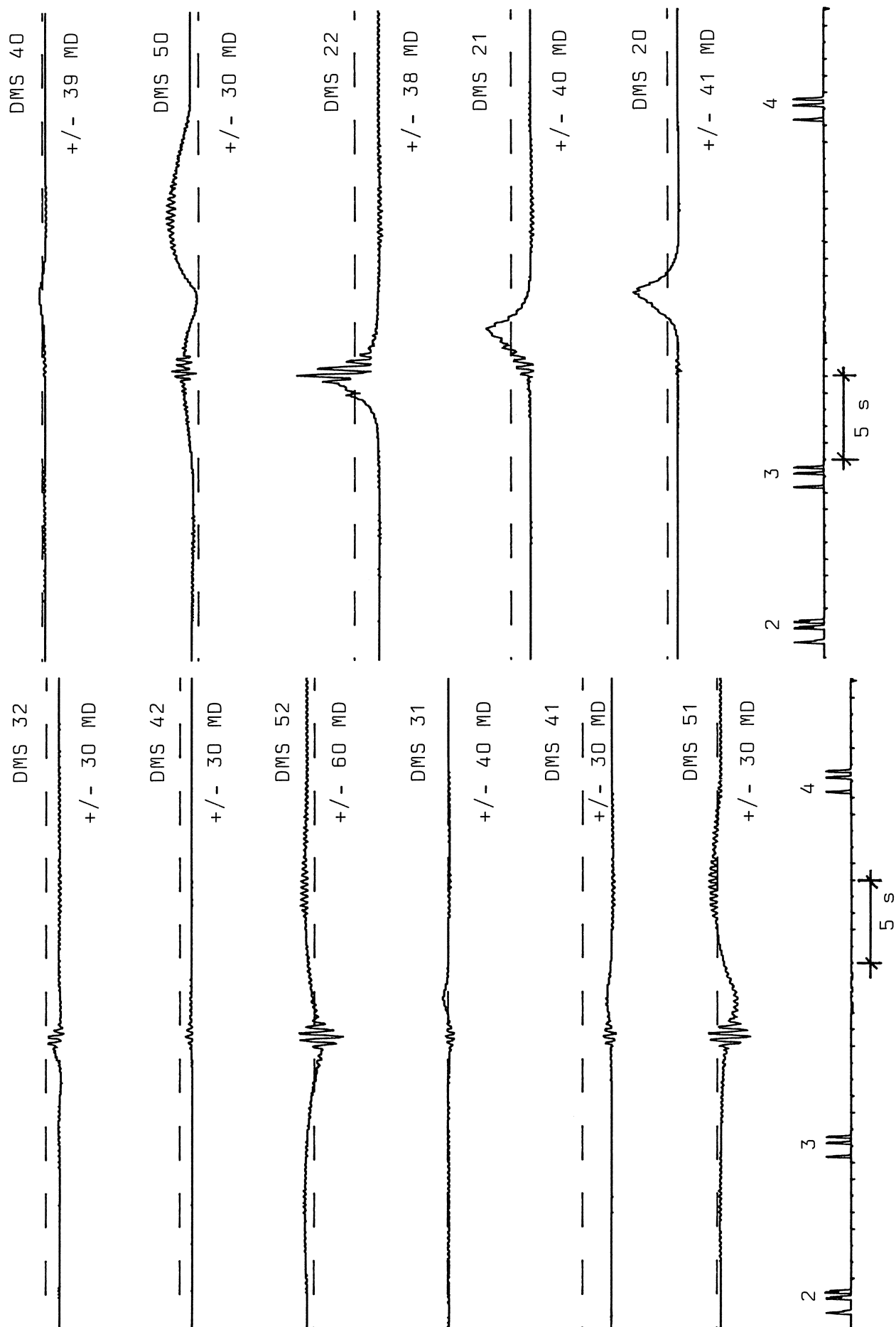
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 111 STAT.WERT = .37 MM
PHI MAX = 197.6 [X]
BEI V = 14.6 [KM/H]



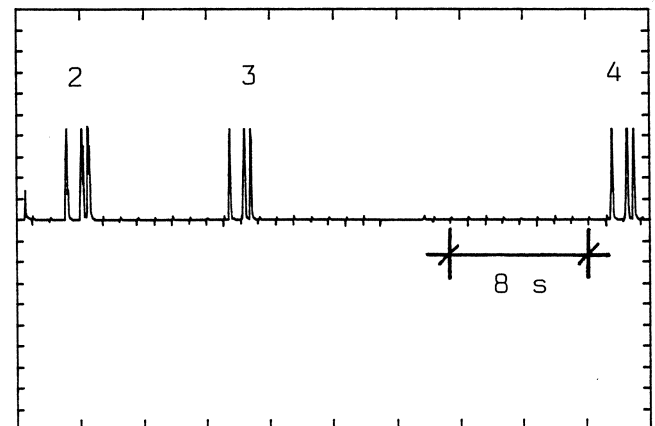
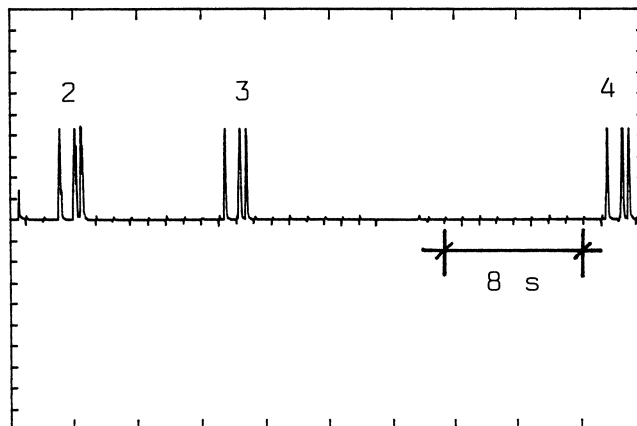
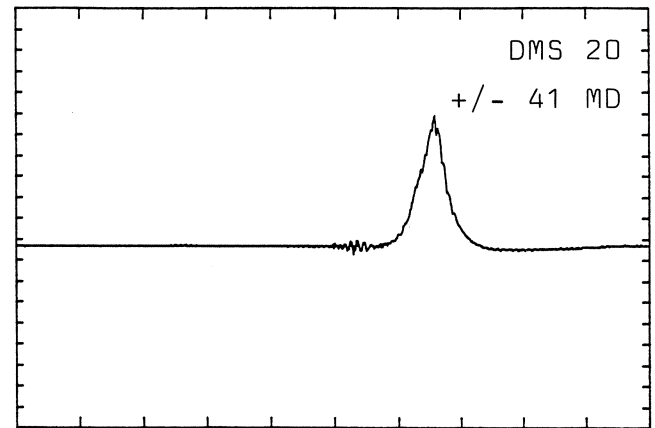
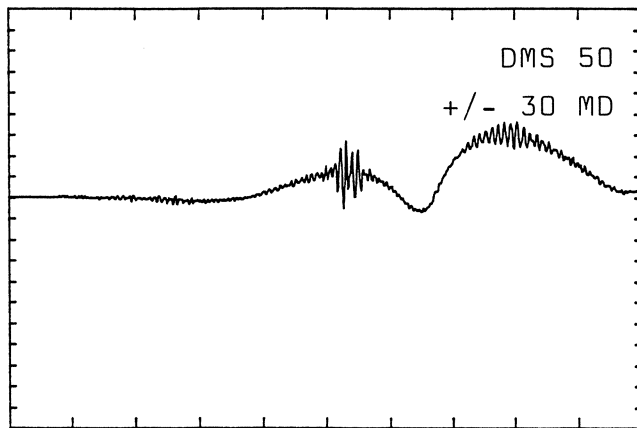
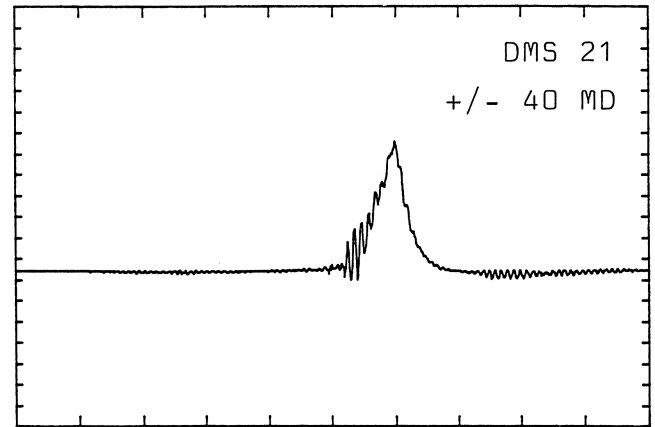
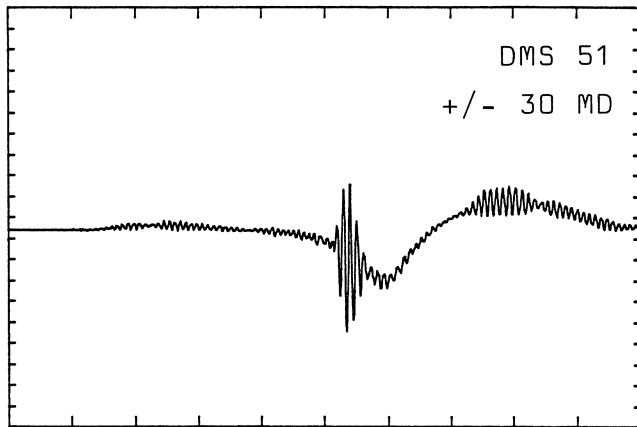
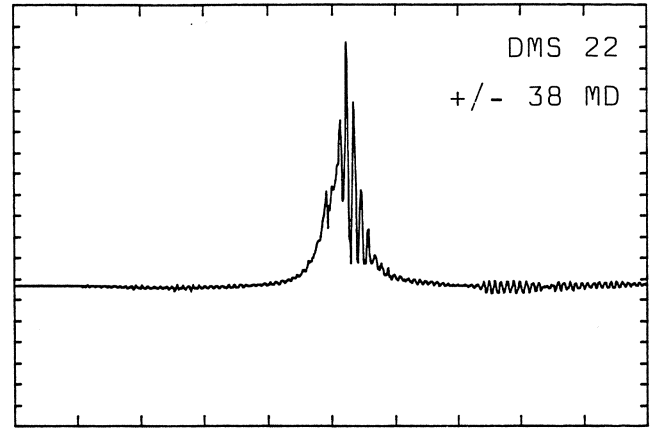
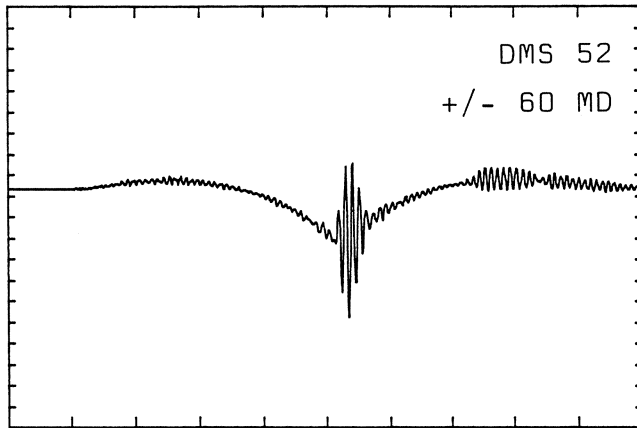
FAHRZEUG 21R, 10 BAR, ACHSE K, M.BR., BELAG B
INSTRUMENT : WG 101 STAT.WERT = .01 MM
PHI MAX = 3458.3 [X]
BEI V = 63.7 [KM/H]

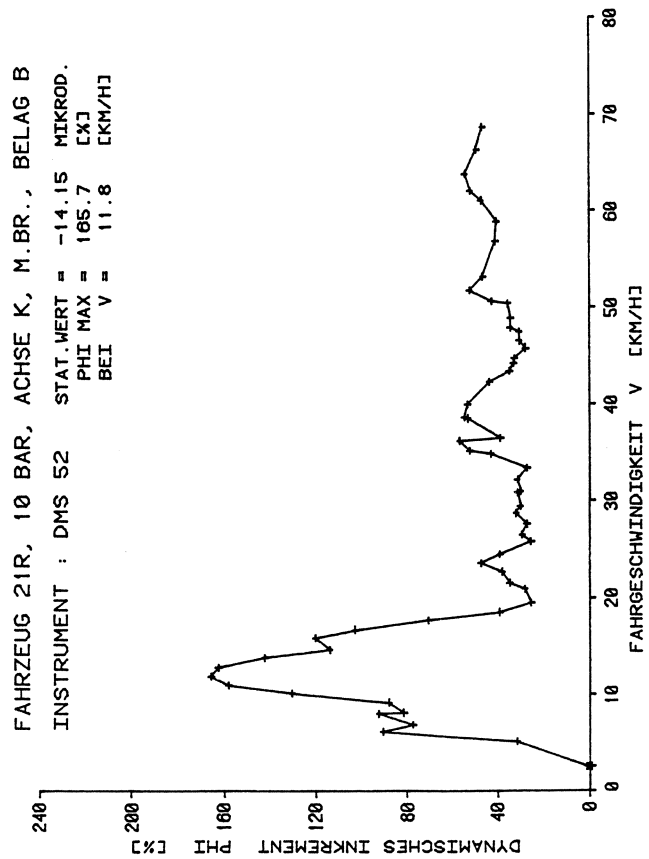
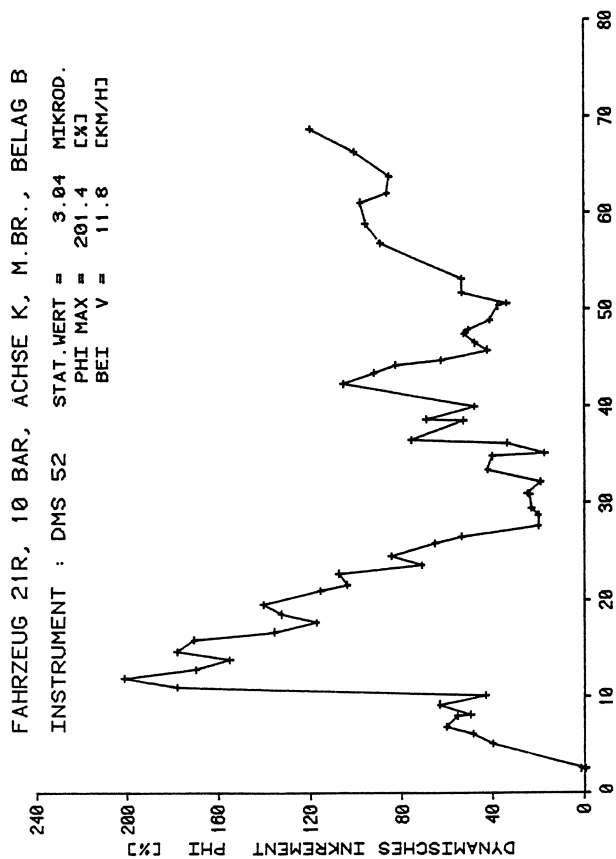
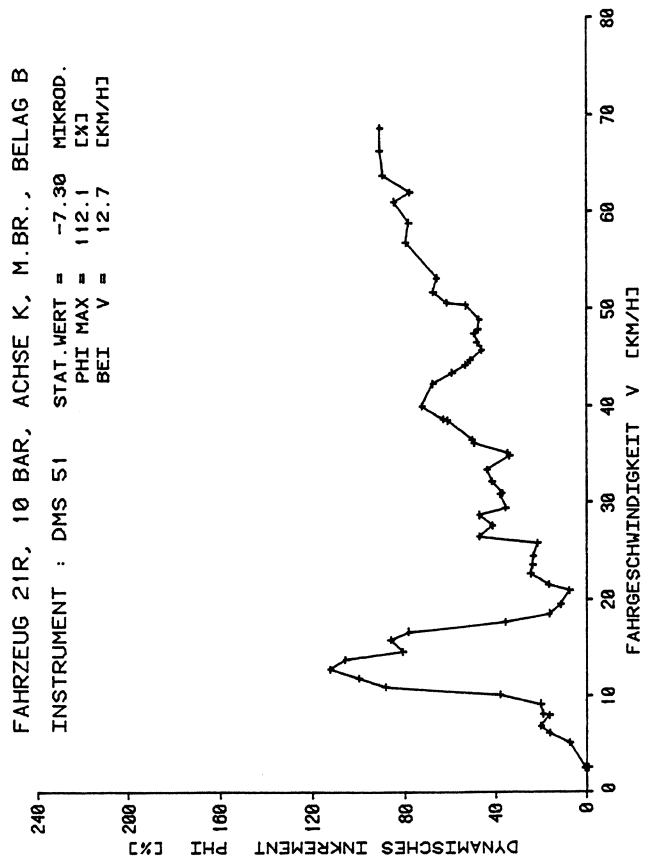
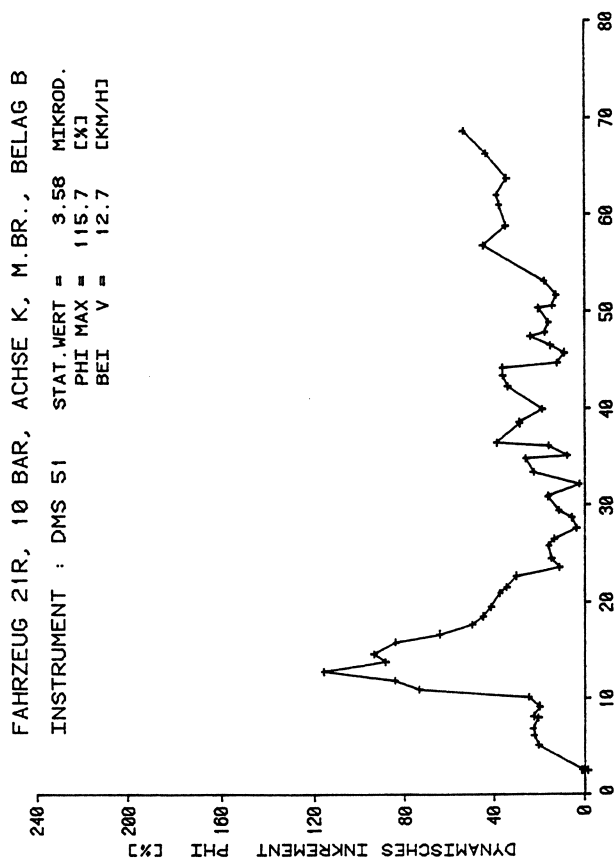


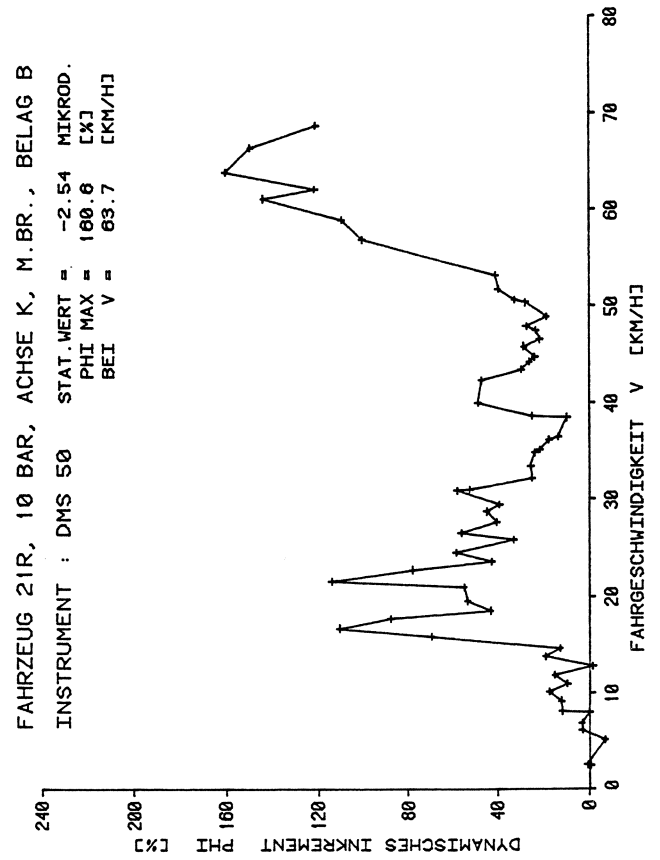
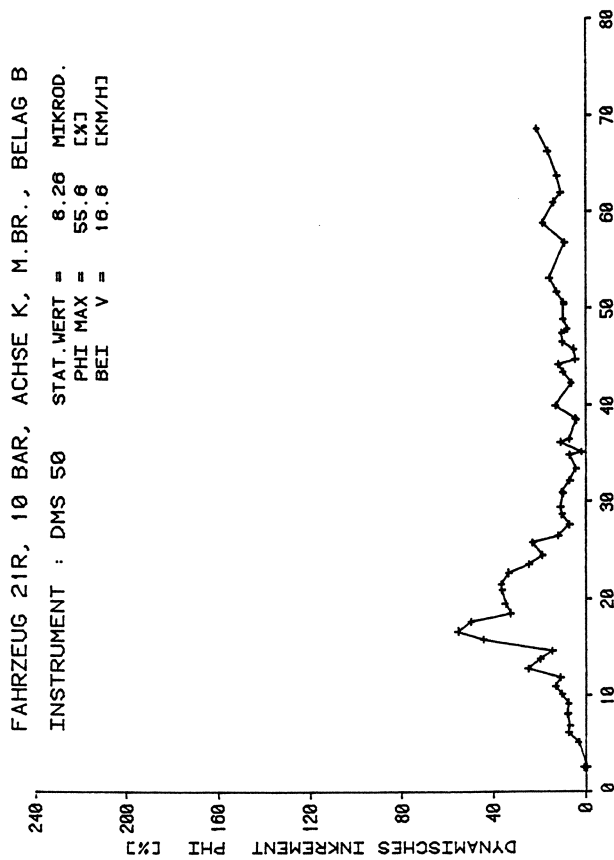
Versuch Nr. 5252, 21R10KMB, $v = 12.73 \text{ km/h}$, Dehnungen

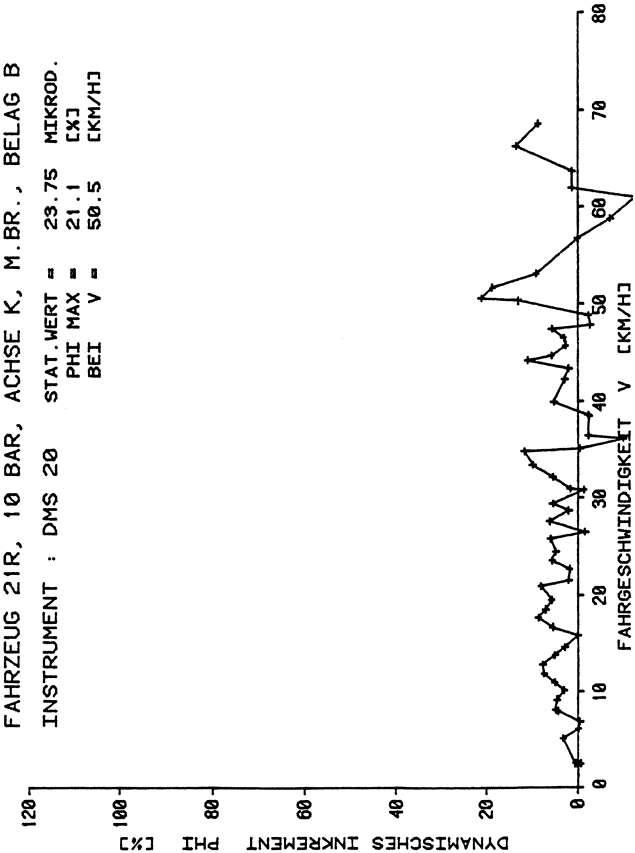
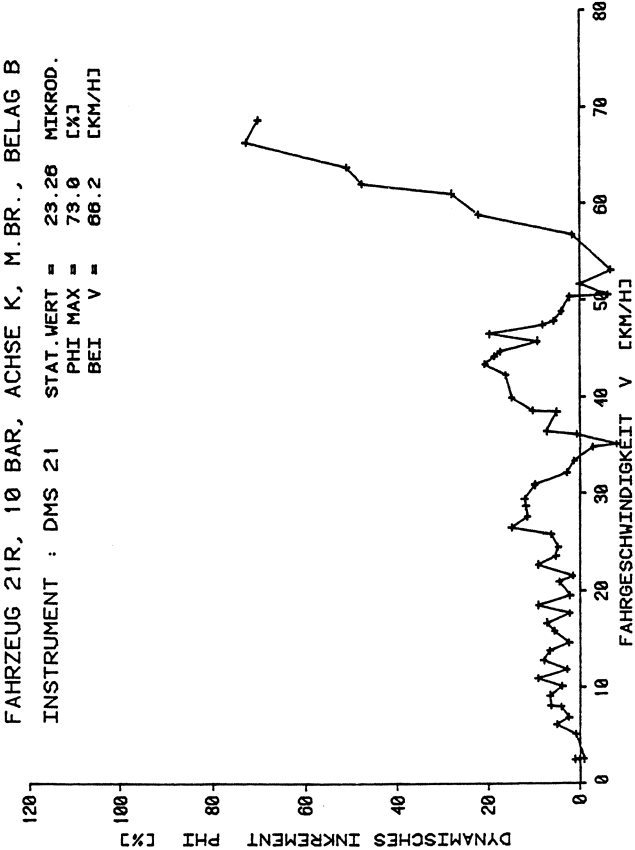
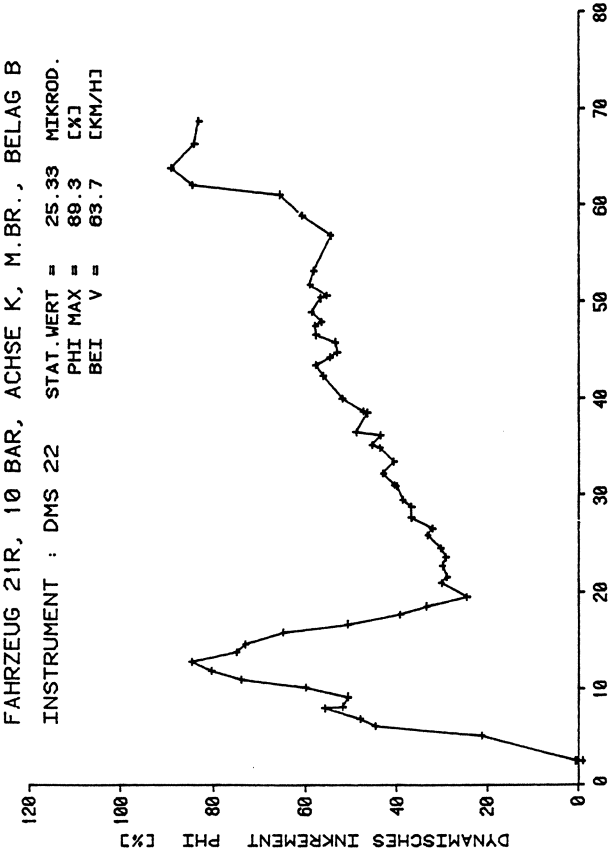


Versuch Nr. 5252, 21R10KMB, $v = 12.73 \text{ km/h}$, Dehnungen









Anhang 4

Die Reaktion der Brücke: Zusammenstellung der maximalen dynamischen Inkremente für alle Versuchsserien und Instrumente

Anhang zum Berichtteil A, Seite 123 ff,
Abschnitt 3.72,

"Die Maximalwerte der dynamischen Inkremente in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp".

Die Tabellen enthalten für alle Versuchsserien und alle Instrumente das maximale gemessene dynamische Inkrement und die zugehörige Fahrgeschwindigkeit. Pro Instrument und Fahrachse sind auch die absolut maximalen dynamischen Inkremente für Fahrten mit und ohne Brett sowie die zugehörige Versuchsserie und Fahrgeschwindigkeit angegeben.

Die Seiten A4.1 bis A4.28 enthalten die Ergebnisse für die Durchbiegungen, die Seiten A4.29 bis A4.47 jene für die Dehnungen.

Instrument : WG 82 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.71	27 23 22	64 62 67	30 24 24	66 64 65					
12R10 6	-0.72	24 18	16 17	24 15	16 30	-0.69	21	23	23	24
13R10 8 6	-0.68	32 28 26	16 17 24	28 21	17 23	-0.69	25	16	24	16
14R10	-0.67	31	23	34	33	-0.68	27	16	22	16
20R10 6	-1.18	40 36	70 70	41 37	66 69					
21R10	-1.12	54	78	41	71	-1.13	17	29	22	29
24R10	-1.29	32	17	30	25					
25R10 6	-1.20	39 38	78 70	35 44	76 72					
42R10 6	-1.15	15 14	17 40	15 14	16 39					
52R10 6	-1.69	25 35	65 70	32 27	71 66					
71R10 6	-1.01	18 13	54 50	17 18	66 51					
74R10 6	-1.20	25 32	25 74	23 25	25 30					
76R10 6	-1.50	26 25	70 66	27 28	70 66					
2LH A	-1.17	0								
2MH A K	-2.08 -2.40	13	70	20	70					
2MN	-2.87	17	59							
4MH A K	-1.78 -2.19	13	17							
4MN	-3.80	10	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 54 \%$, 21R10AoA , v = 78 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 44 \%$, 25R 6AmA , v = 72 km/h										

Instrument : WG 82 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.87	27 21 19	64 35 53	27 24 17	35 65 64					
12R10 6	-0.86	27 27	51 53	26 27	52 50	-0.85	19	22	20	22
13R10 8 6	-0.86	21 24 20	25 51 51	20 19	18 48	-0.84	22	42	20	43
14R10	-0.84	30	53	33	55	-0.82	17	66	18	43
20R10 6	-1.46	34 36	70 55	34 34	55 69					
21R10	-1.40	45	79	42	69	-1.36	19	22	14	21
24R10	-1.58	35	63	34	64					
25R10 6	-1.46	45 44	60 64	46 48	66 59					
42R10 6	-1.39	13 12	25 32	13 14	14 30					
52R10 6	-2.06	22 24	66 60	25 22	65 69					
71R10 6	-1.22	21 23	44 37	23 21	45 35					
74R10 6	-1.47	27 33	64 61	25 32	71 59					
76R10 6	-1.85	24 24	66 66	26 26	69 66					
2LH A	-1.17									
2MH A K	-2.08 -2.40	27	70							
2MN	-2.87	17	59							
4MH A K	-1.78 -2.19	10	35							
4MN	-3.80	10	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 45 \%$, 21R/25R10KoA , v = 79 / 60 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 48 \%$, 25R6KmA , v = 59 km/h										

Instrument : WG 82 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	0.26	56 50 38	19 20 79	178 153 128	12 12 11					
12R10 6	0.24	71 56	15 66	128 100	11 24	0.25	74	17	145	13
13R10 8 6	0.25	71 67 65	54 53 53	120 108	20 19	0.25	90	18	117	14
14R10	0.25	73	17	181	19	0.25	84	17	218	18
20R10 6	0.42	49 57	72 75	184 156	15 15					
21R10	0.44	128	78	276	13	0.42	53	16	246	12
24R10	0.52	74	53	185	15					
25R10 6	0.46	108 83	54 50	261 208	11 13					
42R10 6	0.43	53 51	50 50	102 69	13 13					
52R10 6	0.70	44 38	52 60	109 96	17 15					
71R10 6	0.36	33 31	54 56	128 97	12 12					
74R10 6	0.47	54 70	30 30	208 168	19 11					
76R10 6	0.56	30 32	13 66	121 97	15 14					
2LH A	0.51	34	16							
2MH A K	0.91 0.85	38	70	132	16					
2MN	1.01	35	21							
4MH A K	0.94 0.82	36	51							
4MN	1.40	32	21							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 128 \%$, 21R10AoA , v = 78 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 276 \%$, 21R10AmA , v = 13 km/h										

Instrument : WG 84 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.68	29 28 25	64 62 67	30 28 29	66 64 65					
12R10 6	-0.68	25 21	16 53	26 19	16 53	-0.67	21	23	22	31
13R10 8 6	-0.66	32 28 25	16 16 24	29 20	16 23	-0.67	25	16	25	16
14R10	-0.66	31	33	31	33	-0.66	26	16	23	16
20R10 6	-1.13	38 36	70 61	42 38	66 69					
21R10	-1.06	54	75	44	71	-1.08	17	22	22	29
24R10	-1.24	35	17	28	25					
25R10 6	-1.16	43 39	75 70	36 40	76 72					
42R10 6	-1.10	15 15	42 38	17 13	35 40					
52R10 6	-1.61	25 28	65 70	27 25	71 66					
71R10 6	-0.95	16 13	37 50	19 16	55 51					
74R10 6	-1.14	26 30	25 22	24 25	25 30					
76R10 6	-1.44	25 21	69 66	21 21	65 66					
2LH A	-1.13	0								
2MH A K	-2.01 -1.52	14	70	20	70					
2MN	-2.20	21	70							
4MH A K	-1.71 -1.38	12	17							
4MN	-2.94	15	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 54 \%$, 21R10AoA , v =75 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 44 \%$, 21R10AmA , v = 71 km/h										

Instrument : WG 84 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.52	40 34 30	64 66 63	34 36 26	65 65 64					
12R10 6	-0.52	38 32	54 52	39 33	35 50	-0.51	30	22	32	22
13R10 8 6	-0.52	33 32 28	25 51 24	33 22	18 51	-0.50	33	44	26	43
14R10	-0.51	37	35	38	55	-0.49	28	15	26	22
20R10 6	-0.88	42 44	70 70	39 44	55 69					
21R10	-0.84	62	65	55	65	-0.83	31	21	22	21
24R10	-0.96	46	58	43	64					
25R10 6	-0.89	56 59	61 60	58 58	66 59					
42R10 6	-0.86	20 15	25 30	19 18	14 30					
52R10 6	-1.26	33 31	65 60	33 31	65 69					
71R10 6	-0.73	31 26	44 37	34 28	45 66					
74R10 6	-0.90	39 44	64 61	33 41	71 59					
76R10 6	-1.14	29 25	65 66	27 28	69 66					
2LH A	-1.13									
2MH A K	-2.01 -1.52	26	61							
2MN	-2.20	21	70							
4MH A K	-1.71 -1.38	13	35							
4MN	-2.94	15	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 62 %, 21R10KoA , v = 65 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 58 %, 25R10/6KmA , v = 66/59 km/h										

Instrument : WG 01 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.05	48 43 32	18 20 19	106 101 94	12 11 11					
12R10 6	-1.05	54 46	15 54	88 83	12 21	-1.06	44	17	88	12
13R10 8 6	-1.03	56 57 56	54 53 55	87 67	48 27	-1.04	66	18	80	65
14R10	-1.02	63	53	114	19	-1.00	48	19	135	18
20R10 6	-1.73	48 47	54 55	157 118	13 15					
21R10	-1.69	82	78	226	12	-1.68	28	33	224	12
24R10	-1.88	62	53	180	13					
25R10 6	-1.76	80 79	52 50	209 173	12 12					
42R10 6	-1.77	42 40	50 50	75 59	16 13					
52R10 6	-2.54	39 37	50 50	90 88	16 12					
71R10 6	-1.52	27 26	35 16	106 83	12 12					
74R10 6	-1.84	43 53	74 74	154 139	19 10					
76R10 6	-2.26	24 26	64 61	86 71	15 14					
2LH A	-1.89	20	16							
2MH A K	-3.32 -4.94	27	15	107	14					
2MN	-5.05	14	7							
4MH A K	-3.39 -5.15	13	18							
4MN	-6.89	10	20							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 82 %, 21R10AoA , v = 78 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 226 %, 21R10AmA , v = 12 km/h										

Instrument : WG 01 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.80	27 29 29	10 24 23	84 76 66	10 11 14					
12R10 6	-1.74	42 37	22 22	84 70	44 44	-1.76	41	15	67	50
13R10 8 6	-1.79	36 30 29	51 51 45	82 53	50 48	-1.77	44	18	74	51
14R10	-1.68	40	23	102	10	-1.66	40	15	96	18
20R10 6	-2.94	26 26	45 40	96 84	15 15					
21R10	-2.84	44	46	150	12	-2.84	28	16	152	12
24R10	-3.20	39	47	130	13					
25R10 6	-2.89	48 50	50 45	142 120	12 12					
42R10 6	-2.75	30 28	48 49	56 48	14 13					
52R10 6	-4.07	29 26	45 39	64 58	15 10					
71R10 6	-2.46	22 26	33 32	76 73	12 8					
74R10 6	-2.98	28 36	22 74	106 95	11 10					
76R10 6	-3.68	23 16	70 33	60 55	13 12					
2LH A	-1.89									
2MH A K	-3.32 -4.94	28	49							
2MN	-5.05	14	7							
4MH A K	-3.39 -5.15	15	17							
4MN	-6.89	10	20							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 50 %, 25R6KoA , v = 45 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 152 %, 21R10KmB , v = 12 km/h										

Instrument : WG 01 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	0.24	307 277 268	54 22 51	328 276 253	51 50 44					
12R10 6	0.27	266 248	51 55	241 212	21 52	0.27	235	14	232	14
13R10 8 6	0.27	306 262 250	52 51 51	270 204	52 52	0.27	257	19	242	17
14R10	0.28	296	53	281	60	0.27	275	19	273	19
20R10 6	0.46	254 214	54 54	256 235	45 45					
21R10	0.43	386	56	367	48	0.43	221	16	234	15
24R10	0.50	285	57	317	58					
25R10 6	0.46	312 288	60 60	363 333	75 51					
42R10 6	0.45	210 190	51 51	218 201	50 52					
52R10 6	0.66	200 169	45 45	247 177	51 50					
71R10 6	0.41	132 128	36 34	138 130	50 54					
74R10 6	0.48	232 271	64 61	255 258	23 65					
76R10 6	0.58	117 106	45 46	116 111	15 45					
2LH A	0.66									
2MH A K	1.13 0.84	195	65							
2MN	1.13	135	52							
4MH A K	1.03 0.77	120	16							
4MN	1.66	110	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 386 %, 21R10KoA , v = 56 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 367 %, 21R10KmA , v = 48 km/h										

Instrument : WG 02 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.05	41 37 27	18 20 19	101 95 88	12 11 11					
12R10 6	-1.03	46 41	15 53	82 73	13 12	-1.07	39	17	79	12
13R10 8 6	-1.03	52 53 50	54 54 54	66 55	18 27	-1.05	61	18	66	14
14R10	-1.01	57	53	102	19	-1.01	42	19	127	18
20R10 6	-1.75	42 43	54 55	150 112	13 15					
21R10	-1.68	75	78	212	12	-1.68	26	7	208	12
24R10	-1.88	57	53	166	13					
25R10 6	-1.76	74 73	52 50	197 163	12 12					
42R10 6	-1.72	41 40	50 50	74 56	16 13					
52R10 6	-2.52	36 35	50 50	84 86	16 12					
71R10 6	-1.51	24 23	35 36	101 78	12 9					
74R10 6	-1.83	39 48	74 74	141 130	19 10					
76R10 6	-2.22	26 26	69 61	82 67	14 14					
2LH A	-1.83	16	16							
2MH A K	-3.21 -3.71	24	15	104	14					
2MN	-4.11	17	21							
4MH A K	-3.24 -3.79	12	46							
4MN	-5.72	11	20							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 75 %, 21R10AoA , v = 78 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 212 %, 21R10AmA , v = 12 km/h										

Instrument : WG 02 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.25	36 38 40	10 23 23	95 94 82	10 15 15					
12R10 6	-1.22	51 46	22 22	79 71	21 22	-1.23	52	17	76	17
13R10 8 6	-1.25	40 37 35	51 51 51	78 49	48 15	-1.25	57	18	68	51
14R10	-1.21	51	23	110	10	-1.20	52	18	113	18
20R10 6	-2.10	34 30	44 15	120 100	13 14					
21R10	-1.96	56	46	190	12	-1.96	36	16	189	12
24R10	-2.23	48	51	159	13					
25R10 6	-2.10	60 54	50 47	165 141	12 14					
42R10 6	-2.01	33 30	48 49	62 53	14 13					
52R10 6	-3.00	33 29	45 45	72 65	15 15					
71R10 6	-1.80	24 26	33 32	82 73	12 8					
74R10 6	-2.17	31 43	22 74	125 110	10 10					
76R10 6	-2.68	20 15	35 33	71 60	14 12					
2LH A	-1.83									
2MH A K	-3.21 -3.71	34	51							
2MN	-4.11	17	21							
4MH A K	-3.24 -3.79	18	17							
4MN	-5.72	11	20							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 60 %, 25R10KoA , v = 50 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 190 %, 21R10KmA , v = 12 km/h										

Instrument : WG 02 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	0.34	168 154 146	45 45 45	176 148 151	52 52 52					
12R10 6	0.33	163 173	24 44	167 169	22 54	0.35	140	15	135	17
13R10 8 6	0.33	198 196 167	52 52 51	198 147	52 52	0.34	155	15	163	18
14R10	0.33	203	53	229	52	0.32	170	18	177	15
20R10 6	0.57	174 125	44 55	192 148	45 50					
21R10	0.53	288	49	302	49	0.60	112	16	154	12
24R10	0.59	218	49	206	48					
25R10 6	0.56	229 240	70 50	282 276	50 50					
42R10 6	0.58	140 125	51 50	148 124	52 51					
52R10 6	0.79	168 140	50 50	198 176	50 50					
71R10 6	0.49	88 70	37 19	89 84	50 36					
74R10 6	0.59	152 178	59 60	164 160	64 67					
76R10 6	0.73	76 78	45 72	70 62	61 71					
2LH A	0.63	111	42							
2MH A K	1.07 0.95	137	58	152	48					
2MN	1.14	116	65							
4MH A K	0.96 0.89	155	46							
4MN	1.68	101	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 288 \text{ \%}$, 21R10AoA , v = 49 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 302 \text{ \%}$, 21R10AmA , v = 49 km/h										

Instrument : WG 04 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.08	40 36 28	19 20 19	100 95 90	12 11 11					
12R10 6	-1.06	46 40	15 55	84 75	12 21	-1.09	38	17	80	12
13R10 8 6	-1.05	56 56 51	54 53 54	69 57	18 27	-1.08	62	18	67	14
14R10	-1.06	57	53	104	19	-1.04	42	19	128	18
20R10 6	-1.81	39 41	72 55	146 112	13 15					
21R10	-1.69	78	48	221	12	-1.70	27	7	219	12
24R10	-1.93	59	53	166	13					
25R10 6	-1.81	73 74	49 50	199 163	11 12					
42R10 6	-1.76	42 40	50 50	74 56	16 13					
52R10 6	-2.58	37 35	50 50	88 85	16 12					
71R10 6	-1.55	23 23	35 16	102 76	12 12					
74R10 6	-1.87	41 45	74 74	143 132	19 10					
76R10 6	-2.31	25 25	69 61	82 64	15 15					
2LH A	-1.90	16	16							
2MH A K	-3.35 -2.69	22	15	102	14					
2MN	-3.50	21	21							
4MH A K	-3.35 -2.63	12	46							
4MN	-4.94	16	21							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 78 %, 21R10AoA , v = 48 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 221 %, 21R10AmA , v = 12 km/h										

Instrument : WG 04 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.91	48 49 48	10 23 23	122 117 104	14 15 15					
12R10 6	-0.85	76 64	24 23	122 106	21 23	-0.84	78	17	113	16
13R10 8 6	-0.86	56 51 52	51 51 53	100 73	52 19	-0.86	85	18	81	53
14R10	-0.85	79	24	132	10	-0.83	79	18	157	18
20R10 6	-1.44	50 44	45 17	171 149	15 15					
21R10	-1.36	84	52	264	12	-1.35	50	16	266	13
24R10	-1.55	79	51	221	15					
25R10 6	-1.48	91 72	50 47	223 207	15 14					
42R10 6	-1.41	46 49	51 51	78 66	14 13					
52R10 6	-2.12	44 37	45 45	102 89	15 15					
71R10 6	-1.27	36 37	35 18	109 89	12 10					
74R10 6	-1.54	48 60	22 74	177 147	10 10					
76R10 6	-1.89	28 21	35 35	100 76	14 14					
2LH A	-1.90									
2MH A K	-3.35 -2.69	49	51							
2MN	-3.50	21	21							
4MH A K	-3.35 -2.63	30	17							
4MN	-4.94	16	21							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 91 \%$, 25R10KoA , v = 50 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 266 \%$, 21R10KmB , v = 13 km/h										

Instrument : WG 05 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.05	45 41 32	19 20 19	105 99 94	12 11 11					
12R10 6	-1.04	51 43	15 55	94 83	49 21	-1.05	43	35	86	12
13R10 8 6	-1.02	60 60 59	54 53 54	96 68	48 27	-1.03	67	18	81	65
14R10	-1.01	66	54	110	19	-1.00	49	19	135	18
20R10 6	-1.76	49 49	54 55	161 124	13 15					
21R10	-1.63	83	48	240	12	-1.64	30	7	230	12
24R10	-1.87	65	53	184	14					
25R10 6	-1.78	81 80	52 50	212 174	11 14					
42R10 6	-1.74	46 42	50 48	78 61	16 13					
52R10 6	-2.56	37 36	50 50	92 88	16 12					
71R10 6	-1.53	24 26	35 16	107 81	12 12					
74R10 6	-1.87	44 47	74 74	152 139	20 10					
76R10 6	-2.28	25 27	69 61	93 72	15 15					
2LH A	-1.87	20	16							
2MH A K	-3.31 -2.02	25	15	107	14					
2MN	-3.03	30	59							
4MH A K	-3.30 -1.85	14	46							
4MN	-4.36	21	21							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 83 %, 21R10AoA , v = 48 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 240 %, 21R10AoA , v = 12 km/h										

Instrument : WG 05 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.67	72 74 71	10 23 23	172 172 148	49 15 15					
12R10 6	-0.66	104 82	24 23	189 167	21 23	-0.64	104	17	162	16
13R10 8 6	-0.66	77 71 78	17 49 53	180 120	52 51	-0.66	116	18	143	55
14R10	-0.66	108	24	199	51	-0.63	108	18	215	17
20R10 6	-1.12	73 63	54 54	235 210	15 15					
21R10	-1.06	124	52	364	15	-1.02	72	16	364	13
24R10	-1.21	114	51	306	15					
25R10 6	-1.18	122 186	50 54	306 276	15 14					
42R10 6	-1.09	68 70	53 51	124 104	49 49					
52R10 6	-1.67	61 47	51 45	141 123	15 15					
71R10 6	-0.99	53 54	35 18	136 115	12 54					
74R10 6	-1.21	72 78	75 74	234 194	10 22					
76R10 6	-1.48	37 28	35 35	134 105	14 15					
2LH A	-1.87									
2MH A K	-3.31 -2.02	69	53							
2MN	-3.03	30	59							
4MH A K	-3.30 -1.85	52	17							
4MN	-4.36	21	21							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 186 %, 25R6KoA , v = 54 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 364 %, 21R10KmA/B , v = 15/13 km/h										

Instrument : WG 111 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	-1.20	* 57	55	164 125	13 13					
21R10	-1.16	79	53	237	13	-1.16	27	7	228	12
24R10	-1.29	*		186	13					
25R10 6	-1.22	84 81	52 50	220 185	12 14					
42R10 6										
52R10 6	-1.75	36 36	50 50	90 91	15 12					
71R10 6	-1.06	23 31	45 16	118 92	12 12					
74R10 6	-1.25	46 56	56 65	175 156	20 10					
76R10 6	-1.55	28 25	69 61	96 80	15 14					
2LH A	-1.28	24	16							
2MH A K	-2.25 -3.82	31	15	106	14					
2MN	-3.51	21	57							
4MH A K	-2.30 -4.02	22	46							
4MN	-5.00	12	14							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 84 %, 25R10AoA , v = 52 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 237 %, 21R10AmA , v = 13 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : WG 111 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.31	34 30 34	35 22 35	87 74 111	51 50 14					
12R10 6	-1.24	41 37	34 34	101 66	53 46	-1.26	41	22	85	62
13R10 8 6	-1.26	36 31 37	25 17 27	83 51	53 51	-1.24	39	18	95	64
14R10	-1.20	46	23	95	51	-1.19	44	18	90	64
20R10 6	-2.12	31 32	15 15	88 70	66 15					
21R10	-2.02	47	47	135	12	-2.01	23	19	135	12
24R10	-2.29	44	48	116	13					
25R10 6	-2.05	47 41	49 47	116 116	12 12					
42R10 6	-2.02	26 29	35 34	64 50	17 16					
52R10 6	-3.01	41 24	12 39	57 47	45 46					
71R10 6	-1.82	19 23	17 32	84 71	12 28					
74R10 6	-2.14	43 45	22 21	108 102	21 9					
76R10 6	-2.62	18 18	18 18	63 58	14 12					
2LH A	-1.28									
2MH A K	-2.25 -3.82	34	49							
2MN	-3.51	21	57							
4MH A K	-2.30 -4.02	16	17							
4MN	-5.00	12	14							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 47 \%$, 21R/25R10KoA , v = 47/49 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 135 \%$, 21R10KmA/B , v = 12/12 km/h										

Instrument : WG 112-						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.74	51 51 40	19 20 36	98 96 89	16 11 11					
12R10 6	-0.74	59 44	15 55	85 75	12 12	-0.74	45	18	84	12
13R10 8 6	-0.73	56 58 59	18 55 54	74 62	18 18	-0.73	59	18	71	13
14R10	-0.71	70	17	113	19	-0.71	55	19	137	18
20R10 6	-1.23	52 48	16 55	156 117	13 13					
21R10	-1.17	76	49	224	12	-1.19	24	20	216	12
24R10	-1.33	62	49	176	14					
25R10 6	-1.25	76 77	52 50	206 174	12 14					
42R10 6	-1.24	39 41	51 51	78 64	16 13					
52R10 6	-1.80	35 41	52 50	82 83	15 12					
71R10 6	-1.08	20 30	37 16	114 89	12 12					
74R10 6	-1.29	42 53	70 65	162 148	20 10					
76R10 6	-1.57	24 21	69 72	91 76	15 14					
2LH A	-1.31	22	16							
2MH A K	-2.33 -2.80	28	15	97	14					
2MN	-2.93	18	21							
4MH A K	-2.38 -2.96	16	46							
4MN	-4.22	11	25							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 77 %, 25R6AoA , v = 50 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 224 %, 21R10AmA , v = 12 km/h										

Instrument : WG 112 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.90	40 42 42	20 22 23	94 93 84	51 15 14					
12R10 6	-0.91	54 40	22 23	74 69	53 15	-0.90	56	18	80	17
13R10 8 6	-0.91	43 41 38	25 17 27	82 54	50 15	-0.90	56	18	67	64
14R10	-0.88	59	23	101	9	-0.87	59	18	118	18
20R10 6	-1.52	36 39	15 17	121 102	13 54					
21R10	-1.43	63	49	188	12	-1.41	36	20	194	12
24R10	-1.64	46	51	156	13					
25R10 6	-1.53	60 49	50 47	167 147	12 14					
42R10 6	-1.51	30 32	53 51	65 59	17 13					
52R10 6	-2.20	26 24	45 39	65 57	13 15					
71R10 6	-1.33	27 29	33 32	97 78	12 8					
74R10 6	-1.59	48 52	22 21	135 122	10 10					
76R10 6	-1.97	18 16	15 17	75 63	14 12					
2LH A	-1.31									
2MH A K	-2.33 -2.80	39	49							
2MN	-2.93	18	21							
4MH A K	-2.38 -2.96	18	17							
4MN	-4.22	11	25							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 63 %, 21R10KoA , v = 49 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 194 %, 21R10KmB , v = 12 km/h										

Instrument : WG 101 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	-0.24	* 54	17	157 132	13 15					
21R10	-0.23	78	52	220	13	-0.24	27	32	208	12
24R10	-0.25	*		167	13					
25R10 6	-0.24	81 84	52 65	214 190	12 14					
42R10 6										
52R10 6	-0.35	38 29	52 50	93 84	45 12					
71R10 6	-0.22	27 30	81 16	112 92	12 12					
74R10 6	-0.25	55 52	69 70	189 154	20 10					
76R10 6	-0.31	34 33	64 41	110 83	70 14					
2LH A	-0.25	37	16							
2MH A K	-0.44 -1.51	39	15	105	14					
2MN	-1.06	46	50							
4MH A K	-0.47 -1.80	32	46							
4MN	-1.58	29	57							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 84 %, 25R6AoA , v = 65 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 220 %, 21R10AmA , v = 13 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : WG 101 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.53	30 25 19	49 22 22	88 64 *	49 47					
12R10 6	-0.51	41 30	60 51	101 56	53 52	-0.51	30	52	96	57
13R10 8 6	-0.51	36 33 34	60 60 60	100 39	64 42	-0.50	29	47	98	64
14R10	-0.47	51	64	92	65	-0.46	34	21	111	62
20R10 6	-0.89	39 32	65 59	62 46	71 59					
21R10	-0.82	46	46	65	63	-0.83	24	19	56	62
24R10	-0.88	62	58	87	73					
25R10 6	-0.78	55 48	48 43	86 68	47 44					
42R10 6	-0.80	23 24	61 49	60 46	61 61					
52R10 6	-1.18	26 28	61 60	51 43	59 61					
71R10 6	-0.71	25 26	60 59	69 52	56 55					
74R10 6	-0.82	33 32	20 20	81 58	54 9					
76R10 6	-1.01	29 18	70 61	54 33	69 69					
2LH A	-0.25									
2MH A K	-0.44 -1.51	27	58							
2MN	-1.06	42	50							
4MH A K	-0.47 -1.80	9	21							
4MN	-1.58	29	57							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 62 %, 24R10KoA , v = 58 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 111 %, 14R10KmA , v = 62 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : WG 102 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	-0.24	* 55	17	159 124	13 15					
21R10	-0.23	77	49	221	13	-0.23	28	33	214	12
24R10	-0.26	*		171	13					
25R10 6	-0.25	79 77	52 65	206 182	12 14					
42R10 6										
52R10 6	-0.35	41 32	40 50	81 83	15 12					
71R10 6	-0.22	21 34	46 16	116 90	12 12					
74R10 6	-0.26	50 55	69 65	173 156	20 10					
76R10 6	-0.31	26 30	64 41	95 80	15 14					
2LH A	-0.26	28	44							
2MH A K	-0.46 -0.74	32	43	106	14					
2MN	-0.67	35	16							
4MH A K	-0.51 -0.87	22	46							
4MN	-0.98	20	15							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 79 %, 25R10AoA , v = 52 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 221 %, 21R10AmA , v = 13 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : WG 102 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		ϕ_{max} [%]	v [km / h]	ϕ_{max} [%]	v [km / h]		ϕ_{max} [%]	v [km / h]	ϕ_{max} [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.23	45 46 42	51 35 35	90 80 *	51 15					
12R10 6	-0.23	47 43	34 34	104 75	53 23	-0.23	46	22	86	57
13R10 8 6	-0.24	49 42 37	18 17 18	85 50	50 50	-0.23	43	18	94	64
14R10	-0.22	61	17	98	48	-0.22	51	22	96	62
20R10 6	-0.39	39 36	17 15	101 82	15 15					
21R10	-0.36	61	44	155	12	-0.36	32	19	157	12
24R10	-0.41	51	47	126	13					
25R10 6	-0.39	50 41	48 47	137 119	12 12					
42R10 6	-0.40	30 31	23 20	67 57	17 16					
52R10 6	-0.56	27 29	16 35	62 51	45 46					
71R10 6	-0.35	21 20	17 34	92 79	31 30					
74R10 6	-0.41	53 56	22 21	120 108	11 10					
76R10 6	-0.51	22 21	18 18	57 51	14 12					
2LH A	-0.26									
2MH A K	-0.46 -0.74	36	46							
2MN	-0.67	35	16							
4MH A K	-0.51 -0.87	16	17							
4MN	-0.98	20	15							
ohne Brett : $\phi_{max max}$ = 61 %, 14R/21R10KoA , v =17/44 km/h mit Brett : $\phi_{max max}$ = 157 %, 21R10KmB , v = 12 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : WG 22 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.12	48 40 38	45 45 45	41 36 36	52 52 45					
12R10 6	-1.11	52 49	44 44	48 41	22 43	-1.12	46	15	42	17
13R10 8 6	-1.10	74 62 55	43 43 44	60 42	44 45	-1.08	46	15	54	14
14R10	-1.08	69	43	69	41	-1.07	55	15	53	15
20R10 6	-1.83	56 46	44 61	56 44	45 50					
21R10	-1.77	84	48	91	49	-1.78	36	16	36	15
24R10	-2.00	73	49	68	51					
25R10 6	-1.87	73 75	50 59	87 91	50 50					
42R10 6	-1.82	29 32	60 61	36 30	49 48					
52R10 6	-2.65	48 36	45 45	50 44	50 50					
71R10 6	-1.61	37 24	37 36	35 29	35 33					
74R10 6	-1.91	60 66	59 60	52 69	59 60					
76R10 6	-2.37	31 30	45 43	29 28	45 45					
2LH A	-1.96	7	65							
2MH A K	-3.36 -3.85	29	43	50	70					
2MN	-4.30	43	65							
4MH A K	-3.11 -3.71	41	46							
4MN	-5.84	29	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max} = 84 \%$, 21R10AoA , v = 48 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max} = 91 \%$, 21R10/25R6AmA , v = 49/50 km/h										

Instrument : WG 22 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.28	44 40 35	45 22 43	49 42 40	12 21 22					
12R10 6	-1.28	55 45	21 21	52 42	21 23	-1.29	57	14	55	14
13R10 8 6	-1.29	48 47 44	45 44 43	47 37	43 11	-1.27	50	14	47	17
14R10	-1.25	53	43	53	43	-1.25	62	14	49	14
20R10 6	-2.16	46 40	44 59	46 45	51 51					
21R10	-2.06	64	63	64	48	-2.01	42	14	43	14
24R10	-2.32	53	63	55	58					
25R10 6	-2.19	80 69	61 60	74 63	50 51					
42R10 6	-2.09	29 34	19 18	32 29	50 50					
52R10 6	-3.08	40 41	39 39	42 41	40 41					
71R10 6	-1.83	31 28	34 34	35 30	36 30					
74R10 6	-2.24	43 59	59 61	51 59	61 59					
76R10 6	-2.78	22 25	14 46	23 25	13 45					
2LH A	-1.96									
2MH A K	-3.36 -3.85	36	61							
2MN	-4.30	43	65							
4MH A K	-3.11 -3.71	15	21							
4MN	-5.84	29	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 80 %, 25R10KoA , v = 61 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 74 %, 25R10KmA , v = 50 km/h										

Instrument : WG 22 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	0.43	132 117 87	19 20 20	198 176 165	22 22 23					
12R10 6	0.41	110 104	15 54	157 153	12 22	0.43	95	20	152	17
13R10 8 6	0.42	134 119 118	18 54 53	159 124	17 18	0.41	138	18	170	13
14R10	0.42	170	17	207	19	0.39	142	19	268	18
20R10 6	0.67	120 117	18 17	347 290	15 15					
21R10	0.65	208	53	510	17	0.67	68	20	387	13
24R10	0.72	159	53	407	15					
25R10 6	0.71	207 183	54 52	467 402	15 15					
42R10 6	0.70	87 87	51 52	161 129	16 15					
52R10 6	1.00	86 77	52 50	221 190	15 15					
71R10 6	0.64	44 70	20 16	201 159	12 12					
74R10 6	0.71	120 115	74 65	396 360	11 10					
76R10 6	0.84	57 52	69 66	233 176	15 14					
2LH A	0.77	87	16							
2MH A K	1.24 1.14	97	49	231	14					
2MN	1.35	86	16							
4MH A K	1.32 1.21	78	46							
4MN	1.94	44	20							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 208 %, 21R10AoA , v = 53 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 510 %, 21R10AmA , v = 17 km/h										

Instrument : WG 24 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-1.14	49 41 39	45 45 45	44 36 36	45 44 45					
12R10 6	-1.14	52 50	44 44	47 42	22 45	-1.15	46	15	42	17
13R10 8 6	-1.12	72 62 56	43 43 61	60 42	44 45	-1.10	48	15	55	14
14R10	-1.12	70	43	69	43	-1.11	55	15	54	15
20R10 6	-1.86	57 43	44 61	54 44	45 50					
21R10	-1.78	88	48	95	49	-1.81	37	13	38	15
24R10	-2.06	71	49	66	51					
25R10 6	-1.91	74 75	49 59	86 90	50 50					
42R10 6	-1.87	29 30	17 61	36 29	52 50					
52R10 6	-2.69	48 37	40 50	49 40	50 40					
71R10 6	-1.64	36 22	37 36	37 28	35 33					
74R10 6	-1.95	61 65	59 60	53 68	59 60					
76R10 6	-2.43	30 30	45 43	30 28	45 45					
2LH A	-2.00	17	48							
2MH A K	-3.45 -2.92	28	43	50	70					
2MN	-3.72	56	65							
4MH A K	-3.17 -2.73	39	46							
4MN	-5.12	37	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 88 %, 21R10AoA , v = 48 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 95 %, 21R10AmA , v = 49 km/h										

Instrument : WG 24 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [mm]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-0.94	69 62 51	45 22 45	69 65 62	12 21 22					
12R10 6	-0.93	85 69	21 21	81 64	21 23	-0.94	77	14	75	14
13R10 8 6	-0.94	64 59 60	20 44 51	65 48	43 11	-0.92	66	18	66	17
14R10	-0.92	75	21	81	22	-0.91	84	14	66	14
20R10 6	-1.57	66 53	44 54	65 63	51 51					
21R10	-1.51	88	65	93	42	-1.49	56	15	63	16
24R10	-1.70	76	51	81	68					
25R10 6	-1.60	109 93	61 60	103 89	50 51					
42R10 6	-1.57	38 41	20 18	44 39	50 50					
52R10 6	-2.28	66 50	30 39	51 49	40 41					
71R10 6	-1.39	38 34	34 34	42 36	36 30					
74R10 6	-1.66	62 80	59 61	68 78	61 59					
76R10 6	-2.07	29 30	14 46	30 29	13 45					
2LH A	-2.00									
2MH A K	-3.45 -2.92	54	61							
2MN	-3.72	56	65							
4MH A K	-3.17 -2.73	28	21							
4MN	-5.12	37	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 109 %, 25R10KoA , v = 61 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 103 %, 25R10KmA , v = 50 km/h										

Instrument : DMS 32 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10°]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10°]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]
11R10 8 6	7.8	18 3 4	51 2 50	157 114 81	59 64 74					
12R10 6	6.5	45 33	60 44	157 137	61 57	8.3	4	2	127	67
13R10 8 6	5.9	57 51 59	49 43 72	191 80	70 48	7.7	22	60	180	66
14R10	6.6	41	54	180	52	7.2	12	10	185	64
20R10 6	13.3	35 1	45 3	64 14	70 40					
21R10	9.0	87	48	147	50	8.5	38	65	182	12
24R10	10.3	55	44	80	77					
25R10 6	11.0	50 19	63 40	124 61	15 12					
42R10 6	9.7	17 58	48 38	146 57	48 66					
52R10 6	13.4	12 38	13 45	82 46	35 72					
71R10 6	6.5	80 28	62 40	176 101	45 72					
74R10 6	6.1	68 43	54 50	144 63	47 35					
76R10 6	6.8	5 23	50 15	84 54	45 71					
2LH A	8.9	19	40							
2MH A K	13.2 1.7	25	47	108	54					
2MN	10.8	80	48							
4MH A K	13.4 0.5	31	39							
4MN	11.0	51	50							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 87 %, 21R10AoA , v = 48 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 191 %, 13R10AmA , v = 70 km/h										

Instrument : DMS 42 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	9.1	11 25 26	12 75 76	195 156 166	48 50 38					
12R10 6	5.6	(93) (105)	44 44	(277) (272)	42 40	8.0	13	56	191	34
13R10 8 6	8.9	35 39 22	66 45 39	212 140	44 38	9.7	32	30	135	61
14R10	9.2	39	48	201	34	6.1	25	33	237	47
20R10 6	16.7	10 8	74 75	88 58	45 70					
21R10	10.2	27	46	157	54	10.5	9	7	153	53
24R10	15.8	28	47	111	48					
25R10 6	14.6	32 41	45 46	76 64	15 76					
42R10 6	7.3	76 6	70 43	190 44	49 66					
52R10 6	15.1	13 12	13 45	108 75	45 55					
71R10 6	9.7	16 18	37 36	120 86	43 62					
74R10 6	11.6	5 7	20 60	102 64	35 45					
76R10 6	10.2	14 47	26 72	96 95	52 66					
2LH A	5.8	44	44							
2MH A K	18.5 1.2	17	48	88	47					
2MN	17.9	22	51							
4MH A K	17.2 1.0	36	47							
4MN	18.0	32	50							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 76 %, 42R10AoA , v = 70 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 237 %, 14R10AmB , v = 47 km/h										

Instrument : DMS 52 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]
11R10 8 6	13.2	17 14 8	52 42 60	242 202 162	79 79 79					
12R10 6	16.6	13 1	55 59	181 106	65 65	13.6	31	28	260	74
13R10 8 6	16.2	21 13 22	55 60 55	188 132	76 60	13.1	30	20	284	81
14R10	12.9	40	54	253	70	14.4	28	20	241	74
20R10 6	3.6	129 86	54 55	850 682	76 30					
21R10	3.3	341	47	917	73	3.3	139	16	1022	73
24R10	3.9	214	49	768	30					
25R10 6	2.7	329 296	70 50	1028 771	76 50					
42R10 6	11.0	38 27	64 54	292 191	71 70					
52R10 6	4.2	188 155	50 50	511 313	35 35					
71R10 6	10.8	30 22	35 77	290 218	72 67					
74R10 6	3.1	164 198	69 74	1165 912	71 67					
76R10 6	3.6	103 95	45 72	758 498	70 61					
2LH A	13.5	54	45							
2MH A K	5.2 5.8	193	58	570	70					
2MN	6.7	142	65							
4MH A K	11.5 6.0	83	47							
4MN	8.4	163	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 341 %, 21R10AoA , v = 47 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 1165 %, 74R10AmA , v = 71km/h										

Instrument : DMS 52 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁻⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁻⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	2.6	235 194	54 54	213 201	45 45					
21R10	3.3	309	49	286	48	3.0	183	20	201	12
24R10	3.3	256	51	330	13					
25R10 6	2.6	342 277	61 66	349 331	75 51					
42R10 6										
52R10 6	4.1	177 153	50 45	270 166	51 50					
71R10 6	2.4	94 88	17 34	89 85	36 17					
74R10 6	2.9	200 220	64 61	233 238	66 65					
76R10 6	3.7	92 89	15 46	85 126	15 45					
2LH A	13.5									
2MH A K	5.2 5.8	178	65							
2MN	6.7	142	65							
4MH A K	11.5 6.0	104	16							
4MN	8.4	163	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 342 %, 25R10KoA , v = 61km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 349 %, 25R10KmA , v = 75 km/h										

Instrument : DMS 52 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km/h]
11R10 8 6	-17.2	15 10 10	17 58 65	66 50 41	75 79 15					
12R10 6	-16.8	15 14	51 53	61 30	70 16	-17.9	15	17	48	76
13R10 8 6	-16.2	22 24 28	54 53 53	80 51	76 75	-16.0	22	17	66	76
14R10	-16.0	26	65	58	19	-16.1	13	17	68	18
20R10 6	-22.1	36 35	66 69	102 77	13 13					
21R10	-23.6	37	78	103	12	-23.2	14	33	120	12
24R10	-24.4	26	74	95	14					
25R10 6	-24.2	43 32	75 50	93 76	13 14					
42R10 6	-22.3	26 39	50 49	50 45	70 19					
52R10 6	-33.7	13 12	50 54	41 40	13 13					
71R10 6	-19.5	10 12	57 56	41 31	72 17					
74R10 6	-20.6	32 31	74 74	90 76	19 19					
76R10 6	-23.3	16 20	60 61	46 31	14 14					
2LH A	-21.4	2	59							
2MH A K	-32.8 -21.6	1	41	73	14					
2MN	-40.4	10	32							
4MH A K	-30.2 -21.2	8	14							
4MN	-47.3	7	14							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 43 %, 25R10AoA , v = 75 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 120 %, 21R10AmB , v = 12 km/h										

Instrument : DMS 52 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	-15.2	28 28	44 40	106 97	13 13					
21R10	-14.7	49	46	173	12	-14.2	32	16	166	12
24R10	-16.6	38	47	368	13					
25R10 6	-15.4	49 44	50 47	141 117	12 12					
42R10 6										
52R10 6	-21.5	27 25	45 45	67 60	13 10					
71R10 6	-11.6	25 27	35 32	82 74	12 8					
74R10 6	-14.8	26 33	22 74	114 94	10 10					
76R10 6	-17.6	20 15	71 35	68 67	14 12					
2LH A	-21.4									
2MH A K	-32.8 -21.6	34	49							
2MN	-40.4	10	32							
4MH A K	-30.2 -21.2	19	17							
4MN	-47.3	7	14							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 49 %, 21R/25R10KoA , v =46/50 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 368 %, 24R10KmA , v = 13 km/h										

Instrument : DMS 31 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	9.2	45 38	66 69	122 48	70 40					
21R10	6.0	(137)	59	(223)	71	6.4	49	58	172	64
24R10	*	*		*						
25R10 6	10.1	71 30	63 70	66 12	55 11					
42R10 6										
52R10 6	10.2	51 38	61 45	107 94	66 50					
71R10 6	5.9	34 15	35 62	56 43	72 72					
74R10 6	6.2	82 22	69 65	92 23	53 8					
76R10 6	5.9	5 26	64 15	80 44	65 71					
2LH A	8.6	28	72							
2MH A K	11.0 5.1	38	61	74	70					
2MN	13.0	49	65							
4MH A K	11.8 3.1	21	46							
4MN	12.1	49	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 82 %, 74R10AoA , v = 69 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 172 %, 21R10AmB , v = 64 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : DMS 41 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	18.5	5 * *	5	* 31 *	75					
12R10 6	19.9	3 3	2 2	4 3	71 2	21.1	12	17	3	74
13R10 8 6	17.1	11 9 *	76 76	20 1	76 2	19.0	3	57	12	76
14R10	17.7	3	2	15	64	17.0	7	21	14	74
20R10 6	28.8	14 11	74 55	53 43	70 70					
21R10	25.9	27	81	47	73	27.7	11	60	50	73
24R10	27.0	5	65	48	77					
25R10 6	29.7	29 10	63 59	20 2	25 45					
42R10 6	24.6	18 26	17 71	23 4	37 2					
52R10 6	32.5	22 11	61 60	52 26	71 72					
71R10 6	*	* *		* *						
74R10 6	7.6	* *		(193) *	21					
76R10 6		* *		* *						
2LH A	21.7	14	69							
2MH A K	29.2 3.0	13	61	31	67					
2MN	27.6	8	21							
4MH A K	27.6 3.0	14	48							
4MN	29.6	21	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 29 %, 25R10AoA , v = 63 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 53 %, 20R10AmB , v = 70 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : DMS 51 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	17.5	36 16 14	75 75 67	62 58 29	75 75 74					
12R10 6	21.5	12 11	70 14	43 11	63 64	21.3	14	18	27	76
13R10 8 6	20.8	16 13 14	14 14 14	29 16	66 65	19.4	7	16	29	80
14R10	19.5	30	74	42	70	17.8	22	19	18	19
20R10 6	14.2	46 28	74 55	214 122	76 60					
21R10	13.5	81	81	198	71	10.7	43	61	230	62
24R10	5.3	50	74	246	77					
25R10 6	14.8	69 35	54 52	80 21	55 61					
42R10 6	18.4	29 19	15 58	32 36	66 10					
52R10 6	11.5	70 50	61 54	211 99	66 65					
71R10 6	21.0	22 9	71 62	14 1	55 55					
74R10 6	9.6	84 29	64 19	252 67	71 18					
76R10 6	10.3	65 11	69 72	98 41	65 61					
2LH A	24.4	43	69							
2MH A K	13.6 7.8	88	61	136	64					
2MN	8.9	57	59							
4MH A K	26.7 7.8	13	15							
4MN	18.6	60	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 88 %, 2 MH AoA , v = 61 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 252 %, 74R10AmA , v = 71 km/h										

Instrument : DMS 51 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	3.1	106 191	54 54	179 191	51 49					
21R10	3.9	128	49	143	57	3.6	81	16	115	13
24R10	4.3	113	51	123	58					
25R10 6	5.1	97 97	60 54	85 85	50 50					
42R10 6										
52R10 6	7.5	61 47	45 45	70 61	51 50					
71R10 6	2.8	80 29	34 34	81 56	36 17					
74R10 6	5.2	59 47	64 61	42 44	66 65					
76R10 6	5.5	32 29	12 46	32 53	14 12					
2LH A	24.4									
2MH A K	13.6 7.8	67	61							
2MN	8.9	57	59							
4MH A K	26.7 7.8	40	16							
4MN	18.6	60	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 191 %, 20R6KoA , v = 54 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 191 %, 20R6KmA , v = 49 km/h										

Instrument : DMS 51 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-12.7	26 23 22	13 13 13	42 38 23	59 59 57					
12R10 6	-12.7	16 14	31 26	35 17	57 21	-13.3	11	15	21	55
13R10 8 6	-12.6	22 21 19	13 13 13	21 17	60 47	-12.3	10	14	24	54
14R10	-12.5	22	13	39	59	-12.2	12	15	36	69
20R10 6	-12.9	69 68	30 30	99 85	76 60					
21R10	-16.6	18	53	57	71	-16.6	12	33	64	68
24R10	-8.3	20	34	60	64					
25R10 6	-18.2	25 28	54 52	38 25	40 37					
42R10 6	-14.9	22 15	33 32	41 25	22 22					
52R10 6	-21.6	22 19	35 35	47 27	35 35					
71R10 6	-14.7	13 5	37 40	17 23	28 29					
74R10 6	-14.0	36 23	54 53	56 43	10 10					
76R10 6	-15.1	14 23	45 41	52 34	15 14					
2LH A	-14.8	6	63							
2MH A K	-20.2 -10.5	6	39	43	64					
2MN	-27.1	15	15							
4MH A K	-19.6 -10.3	10	39							
4MN	-30.5	12	15							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 69 %, 20R10AoA , v = 30 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 99 %, 20R10AmA , v = 76km/h										

Instrument : DMS 51 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	-7.7	31 58	17 35	95 85	67 69					
21R10	-7.3	50	47	115	15	-7.3	18	21	112	13
24R10	-8.5	41	48	107	73					
25R10 6	-8.1	48 22	48 47	109 87	15 14					
42R10 6										
52R10 6	-10.9	25 28	39 39	64 49	40 46					
71R10 6	-5.3	29 25	55 16	101 82	12 55					
74R10 6	-6.9	57 54	22 21	133 112	10 20					
76R10 6	-8.1	24 22	61 66	89 65	69 15					
2LH A	-14.8									
2MH A K	-20.2 -10.5	52	49							
2MN	-27.1	15	15							
4MH A K	-19.6 -10.3	28	17							
4MN	-30.5	12	15							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 58 %, 20R6KoA , v = 35 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 133 %, 74R10KmA , v = 10 km/h										

Instrument : DMS 50 +						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	12.4	5 1 3	9 2 10	16 9 1	66 64 10					
12R10 6	13.9	6 2	10 2	1 0	11	13.7	6	29	5	44
13R10 8 6	13.7	9 7 4	10 11 44	10 7	45 10	11.9	16	43	28	44
14R10	12.3	16	12	24	64	12.5	8	49	9	28
20R10 6	AC AC									
21R10	11.4	25	63	31	68	10.0	15	31	33	26
24R10	23.8	22	65	26	68					
25R10 6	AC AC									
42R10 6	14.8	8 14	12 27	17 14	51 40					
52R10 6	AC AC									
71R10 6	14.5	15 11	34 31	15 18	32 30					
74R10 6	10.3	21 12	69 60	19 15	71 11					
76R10 6	12.6	4 2	10 6	2 10	20 17					
2LH A	18.4	4	63							
2MH A K	20.5 17.4	28	52	36	70					
2MN	19.2	22	65							
4MH A K	27.8 17.1	10	46							
4MN	32.2	9	33							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 28 %, 2 MH AoA , v = 52 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 36 %, 2 MH AmA , v = 70 km/h										

AC = Versuche mit Beschleunigungsmessung

Instrument : DMS 50 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	AC AC									
21R10	8.7	66	56	65	16	8.3	37	21	56	17
24R10	9.5	53	57	66	68					
25R10 6	AC AC									
42R10 6										
52R10 6	AC AC									
71R10 6	7.3	20 18	30 30	28 24	31 35					
74R10 6	9.4	19 20	32 61	19 27	59 59					
76R10 6	11.8	11 7	14 46	11 4	13 62					
2LH A	18.4									
2MH A K	20.5 17.4	28	61							
2MN	19.2	22	65							
4MH A K	27.8 17.1	18	30							
4MN	32.2	9	33							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 66 %, 21R10KoA , v = 56 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 66 %, 24R10KmA , v = 68 km/h										

AC = Versuche mit Beschleunigungsmessung

Instrument : DMS 50 -						Fahrachse : A				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁻⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁻⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	-15.5	9 9 7	33 33 33	25 13 11	54 59 57					
12R10 6	-17.1	6 6	35 17	9 8	53 18	-16.9	7	9	7	33
13R10 8 6	-17.3	7 6 9	20 35 18	8 5	22 18	-16.7	8	12	10	39
14R10	-15.8	10	33	20	69	-15.1	11	12	22	69
20R10 6	AC AC									
21R10	-21.1	17	81	28	68	-20.7	8	36	48	64
24R10	-41.2	17	14	25	64					
25R10 6	AC AC									
42R10 6	-16.4	7 3	5 36	16 2	18 22					
52R10 6	AC AC									
71R10 6	-14.4	13 15	31 58	43 21	72 72					
74R10 6	-10.6	30 38	64 65	32 19	40 25					
76R10 6	-10.7	11 9	69 26	26 21	61 21					
2LH A	-13.6	19	63							
2MH A K	-15.8 -1.8	29	13	62	70					
2MN	-21.3	16	13							
4MH A K	-13.1 -2.3	46	39							
4MN	-17.5	22	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 46 %, 4 MH AoA , v = 39 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 62 %, 2 MH AmA , v = 70 km/h										

AC = Versuche mit Beschleunigungsmessung

Instrument : DMS 50 -						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6										
12R10 6										
13R10 8 6										
14R10										
20R10 6	AC AC									
21R10	-2.3	99	23	264	69	-2.5	55	54	161	64
24R10	-2.6	103	51	230	68					
25R10 6	AC AC									
42R10 6										
52R10 6	AC AC									
71R10 6	-1.5	90 71	49 50	148 139	71 54					
74R10 6	-1.1	186 96	32 33	309 234	23 25					
76R10 6	-1.4	57 44	18 18	66 78	69 61					
2LH A	-13.6									
2MH A K	-15.8 -1.8									
2MN	-21.3	16	13							
4MH A K	-13.1 -2.3									
4MN	-17.5	22	66							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 186 %, 74R10KoA , v = 32 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 309 %, 74R10KmA , v = 23 km/h										

AC = Versuche mit Beschleunigungsmessung

Instrument : DMS 22 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	16.4	14 10 9	70 48 22	109 98 70	54 71 70					
12R10 6	16.7	18 18	42 44	132 91	64 65	16.7	20	16	128	65
13R10 8 6	17.0	16 17 21	51 44 45	132 86	70 71	17.0	16	18	91	71
14R10	14.7	22	70	146	68	14.7	24	54	156	69
20R10 6	26.7	14 22	30 40	65 52	71 71					
21R10	25.9	20	46	79	15	25.3	16	49	89	64
24R10	26.0	32	47	80	56					
25R10 6	22.0	29 38	48 46	86 82	14 13					
42R10 6	18.5	22 22	48 46	134 86	68 70					
52R10 6	28.4	16 14	45 39	57 52	13 13					
71R10 6	16.8	14 16	35 34	116 95	67 72					
74R10 6	19.2	17 15	22 51	107 76	54 20					
76R10 6	24.6	30 21	70 70	80 63	69 66					
2LH A	6.6									
2MH A K	8.4 28.6									
2MN	29.7	23	49							
4MH A K	7.6 26.2	20	54							
4MN	31.1	11	35							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 38 %, 25R6KoA , v = 46 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 156 %, 14R10KmB , v = 69 km/h										

Instrument : DMS 21 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	*	*		*						
12R10 6	15.5	21 12	70 46	47 32	70 70	15.3	13	20	40	70
13R10 8 6	15.1	16 * *	18	* *		15.1	16	17	27	71
14R10	13.6	22	17	68	71	13.9	17	20	61	64
20R10 6	23.8	26 20	65 69	100 78	67 69	23.2	9	49	73	66
21R10	23.8	25	67	70	66					
24R10	23.7	32	47	100	73					
25R10 6	20.4	24 27	15 46	40 28	48 15					
42R10 6	16.9	20 18	75 16	85 47	76 75					
52R10 6	27.0	19 17	70 39	54 29	71 46					
71R10 6	15.2	37 26	65 62	45 32	32 35					
74R10 6	17.1	20 20	20 20	35 28	66 54					
76R10 6	21.6	31 19	70 70	50 28	69 66					
2LH A	4.5									
2MH A K	5.4 25.8	31	49							
2MN	26.7	22	58							
4MH A K	5.7 25.2	17	20							
4MN	28.3	14	14							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 37 %, 71R10KoA , v = 65 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 100 %, 20R/24R10 KmA , v = 67/73 km/h										

* = Technische Störung

Instrument : DMS 20 +						Fahrachse : K				
Serie	Belag A					Belag B				
	A _{stat} [10 ⁻⁶]	ohne Brett		mit Brett		A _{stat} [10 ⁻⁶]	ohne Brett		mit Brett	
		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]		$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]	$\phi_{\max}$ [%]	v [km / h]
11R10 8 6	14.5	7 4 7	35 70 34	16 9 6	59 35 35					
12R10 6	15.2	9 4	42 38	9 8	53 37	14.7	9	20	14	43
13R10 8 6	15.3	6 6 22	43 44 39	12 4	42 52	14.8	9	47	5	41
14R10	13.4	14	43	27	65	13.1	9	10	31	64
20R10 6	25.2	13 14	45 40	22 11	66 71					
21R10	23.8	20	33	16	44	23.8	10	17	21	50
24R10	24.0	24	47	31	55					
25R10 6	19.8	32 25	53 43	36 22	44 44					
42R10 6	15.8	12 14	48 55	18 18	56 33					
52R10 6	26.6	8 10	45 39	21 13	51 41					
71R10 6	14.6	27 18	36 30	34 29	32 30					
74R10 6	16.2	10 22	30 52	25 26	61 57					
76R10 6	21.6	14 17	51 35	21 15	69 66					
2LH A	1.2									
2MH A K	1.4 24.6	18	49							
2MN	24.4	32	50							
4MH A K	1.2 24.5	6	7							
4MN	25.0	15	50							
ohne Brett : $\phi_{\max \max}$ = 32 %, 25R10KoA, 2MN , v = 53 /50 km/h mit Brett : $\phi_{\max \max}$ = 36 %, 25R10KmA , v = 44 km/h										

Anhang 5

Die Reaktion der Brücke: Grafische Darstellung der wichtigsten maximalen dynamischen Inkremente in Funktion des Fahrzeugtyps

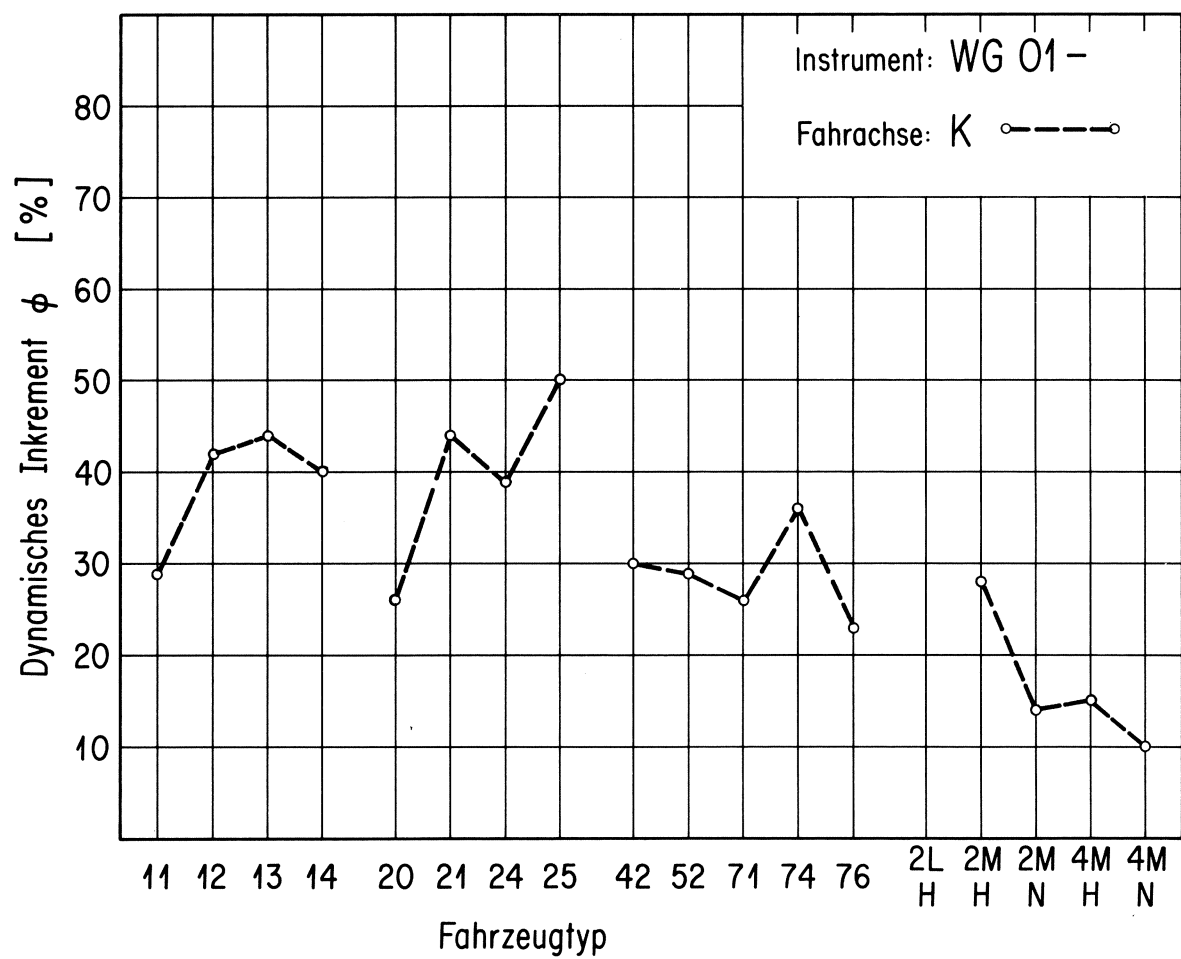
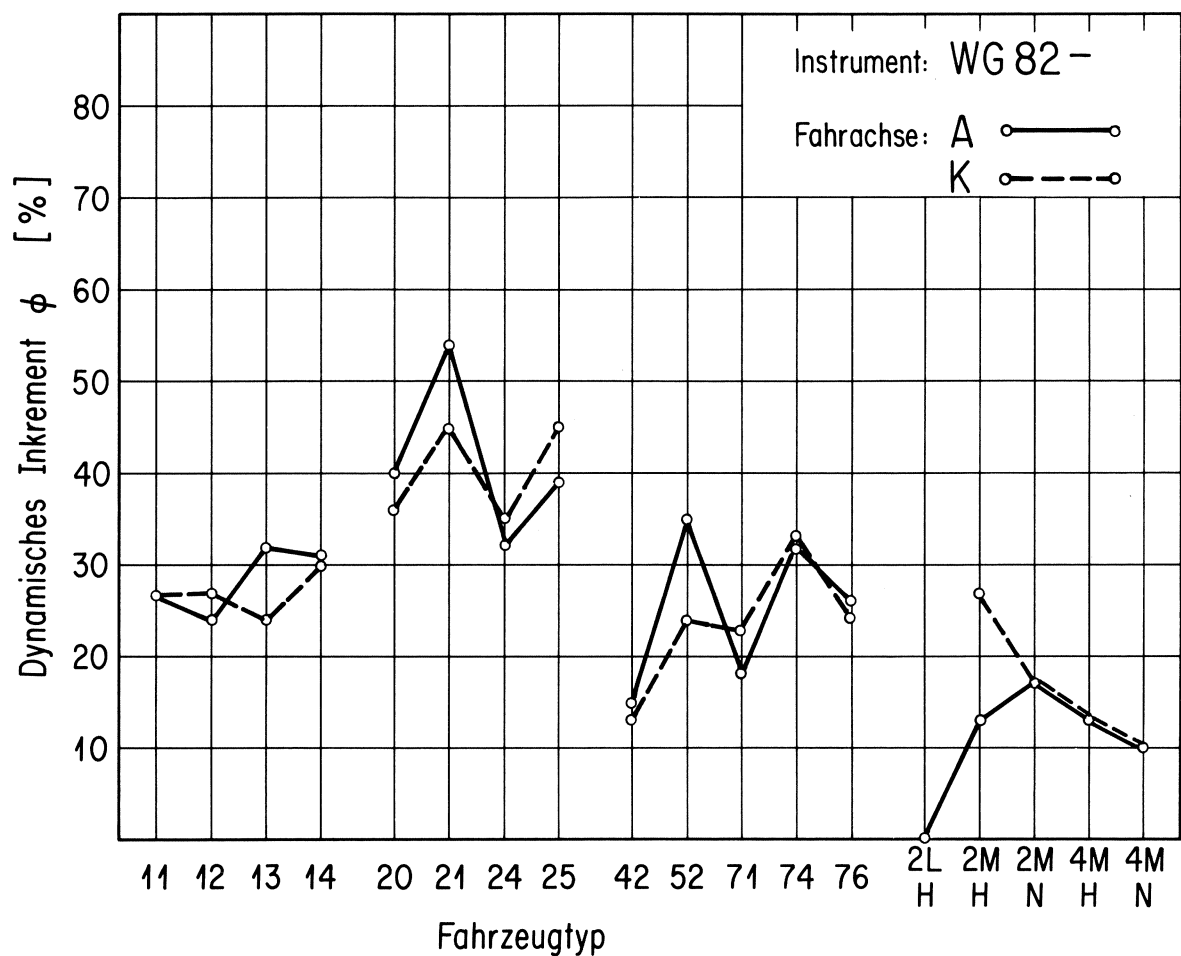
Anhang zum Berichtteil A, Seite 123 ff,

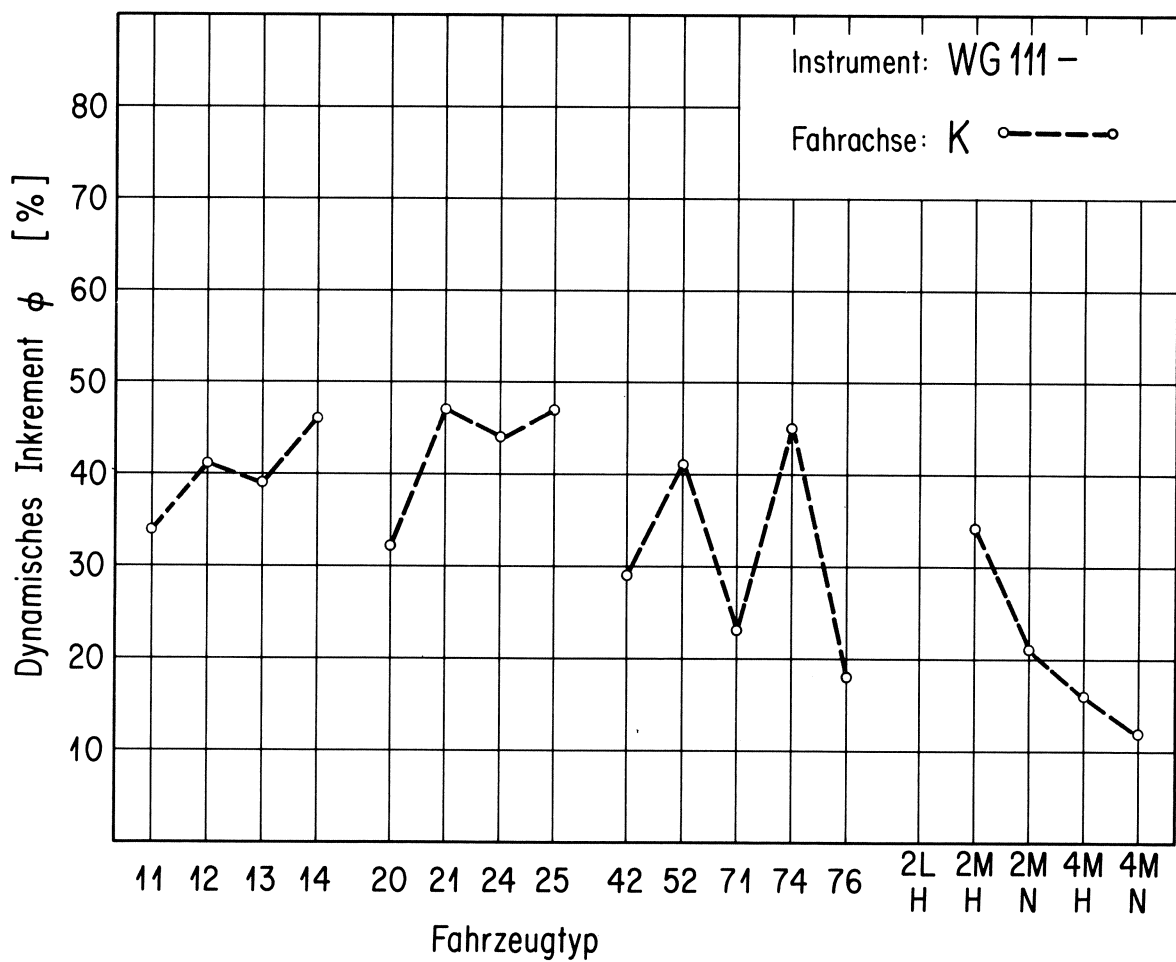
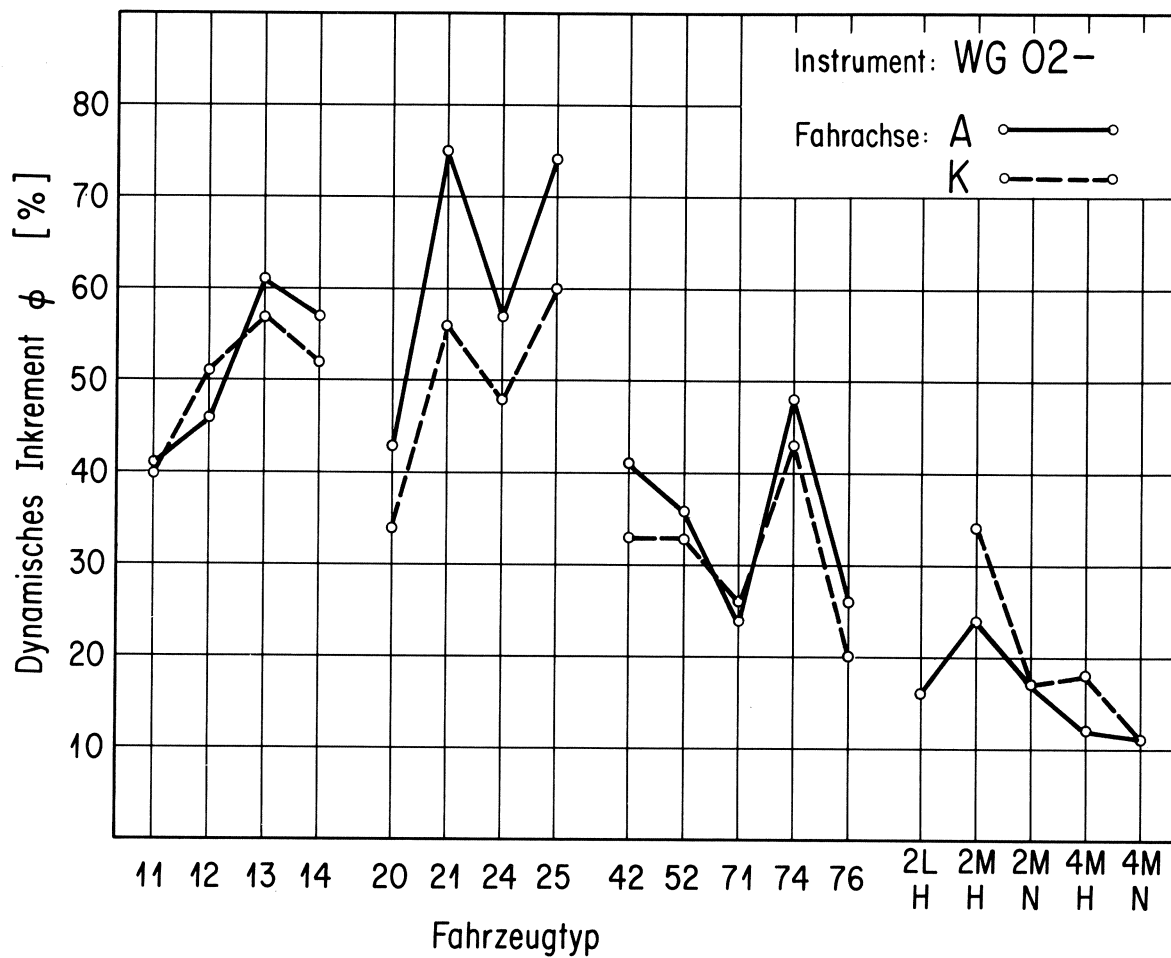
Abschnitt 3.72,

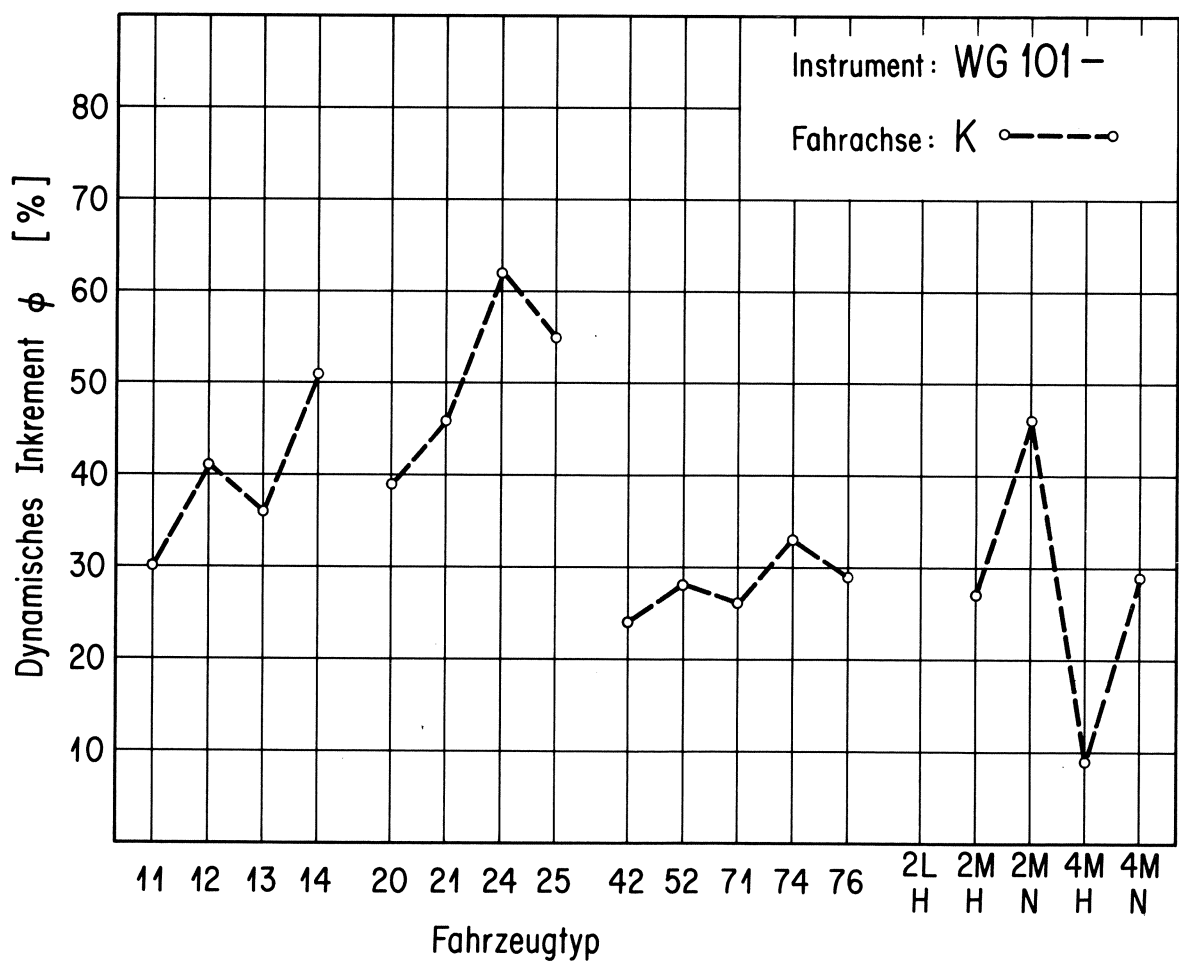
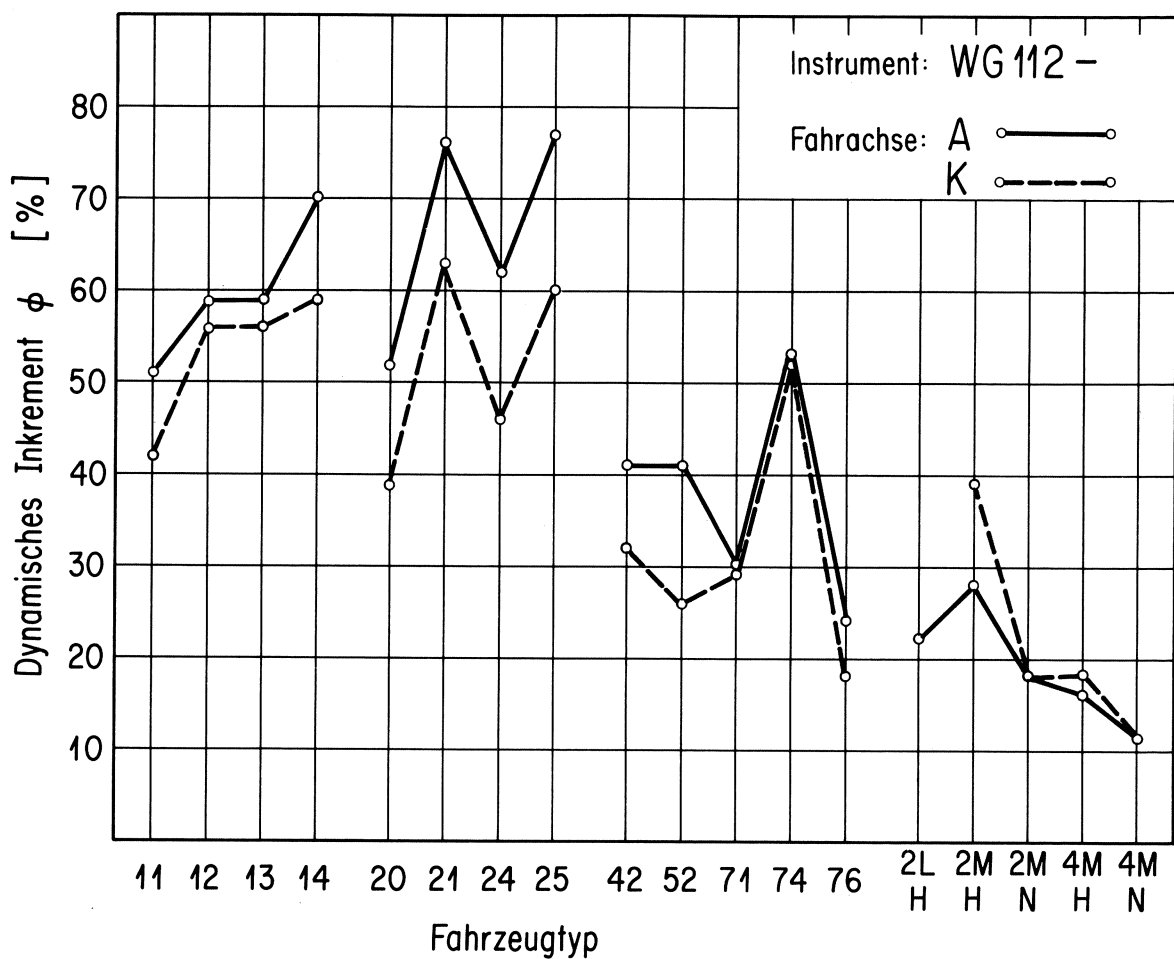
"Die Maximalwerte der dynamischen Inkremente in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp".

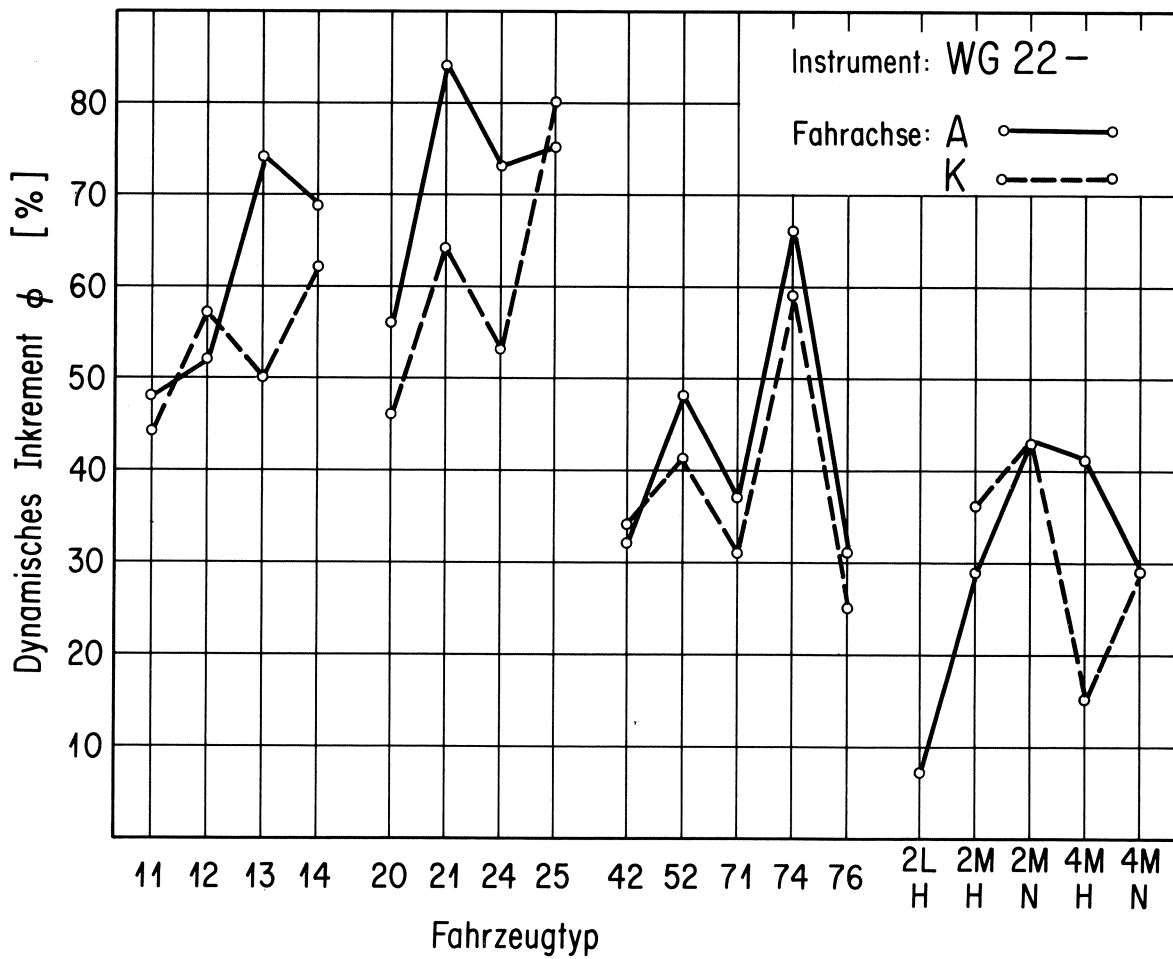
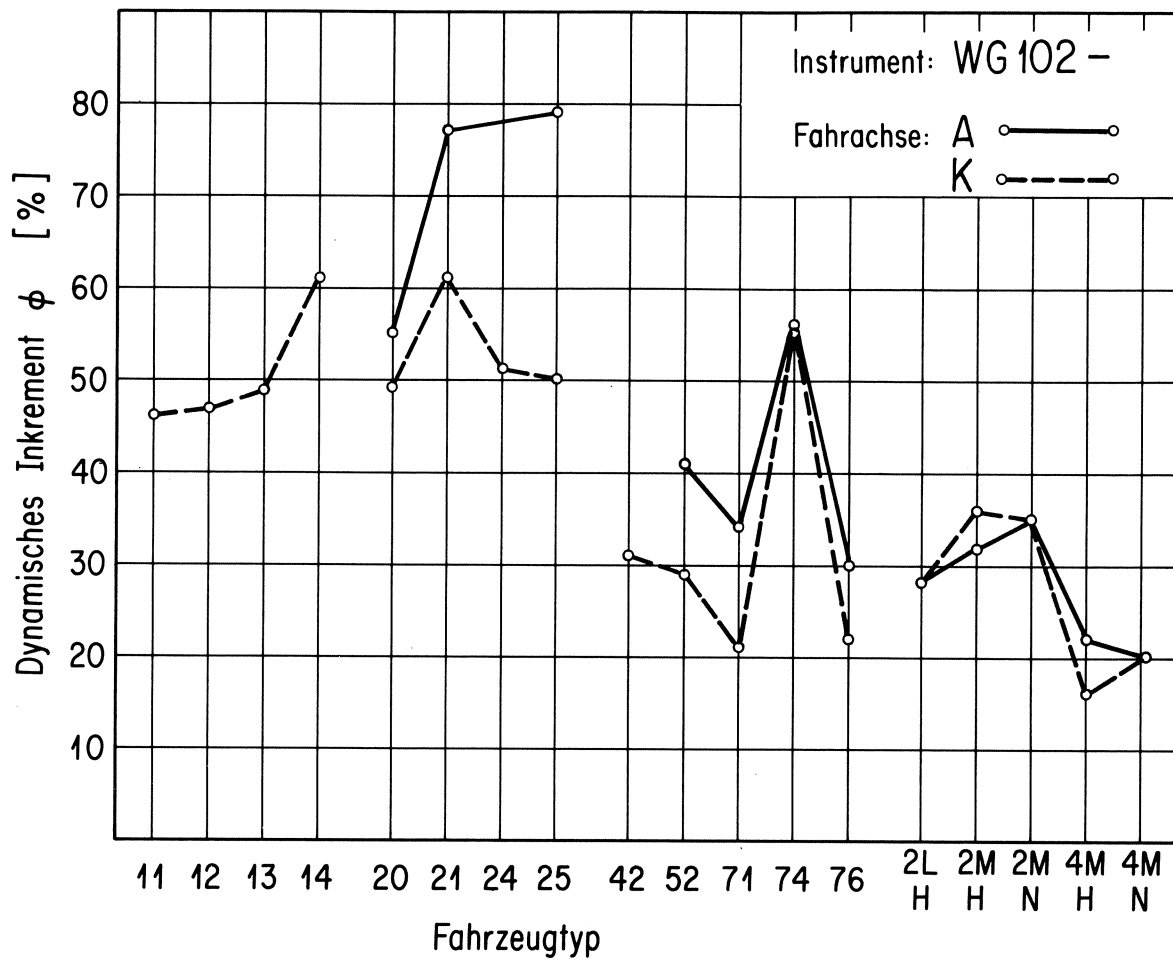
Die Darstellungen zeigen für jedes Fahrzeug und Instrument die parameterunabhängig grössten gemessenen dynamischen Inkremente. Die Fahrzeuge sind dabei gruppenweise - 2D, MD, LS und MF - zusammengestellt.

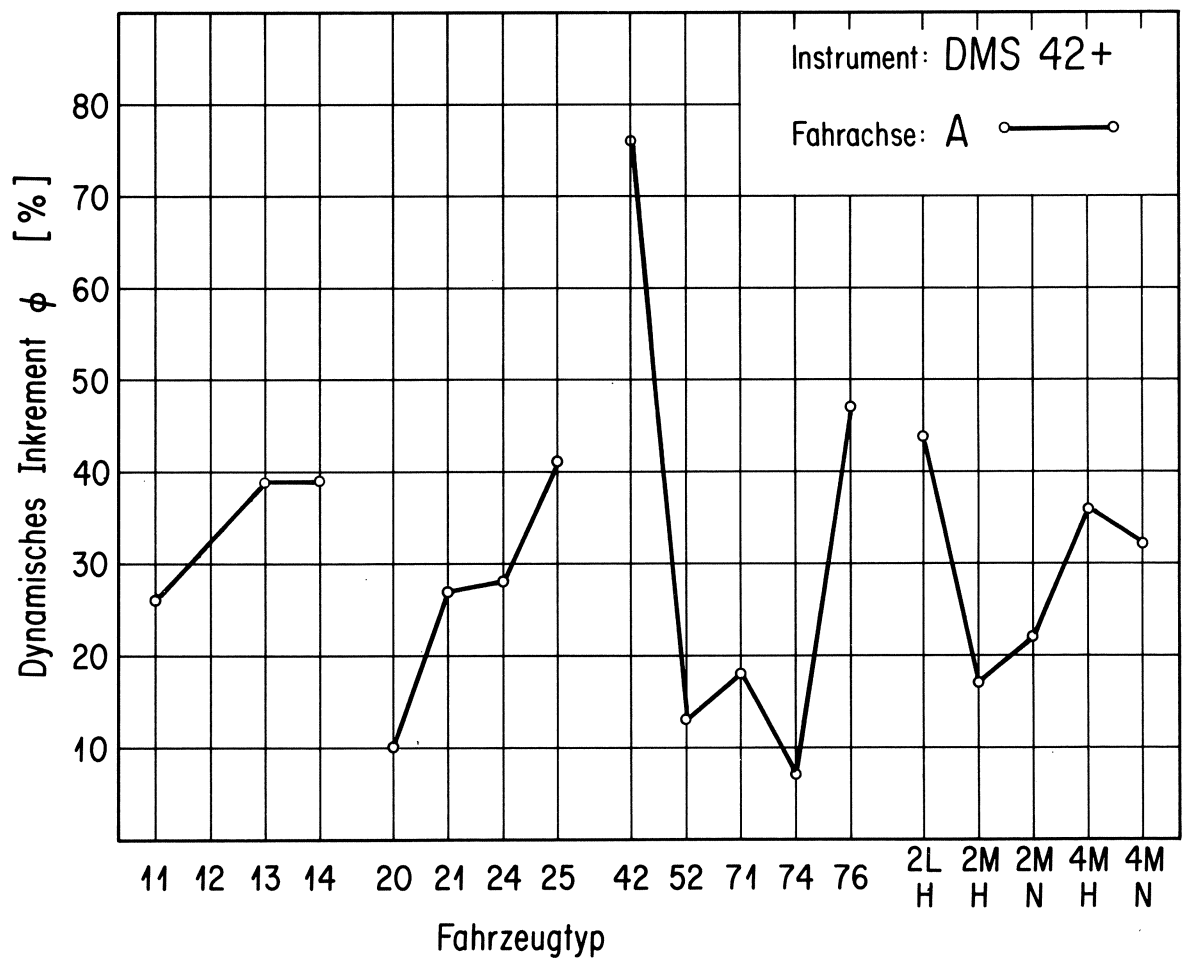
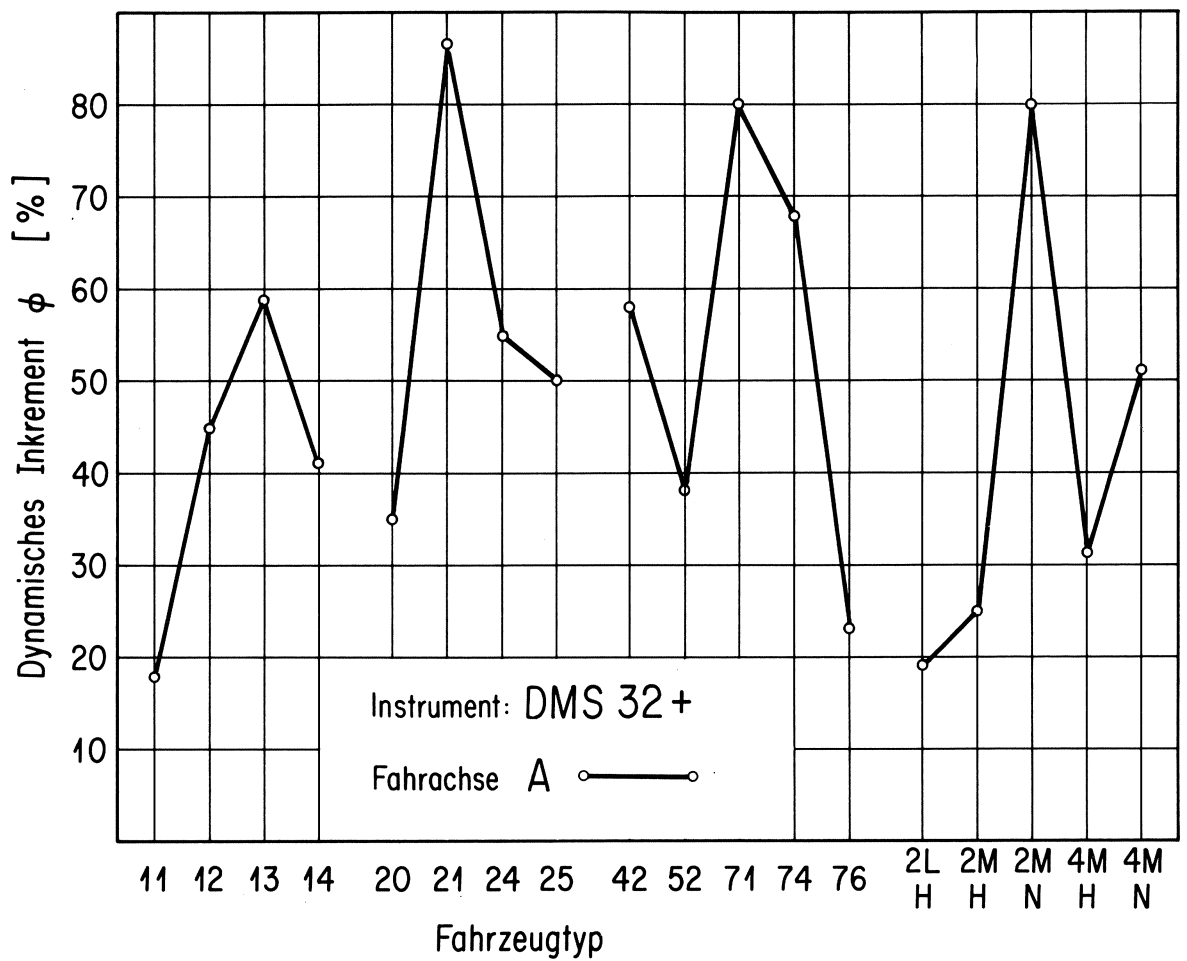
Die Seiten A5.1 bis A5.18 geben die Resultate für Fahrten ohne, die Seiten A5.19 bis A5.27 jene für Fahrten mit Brett.

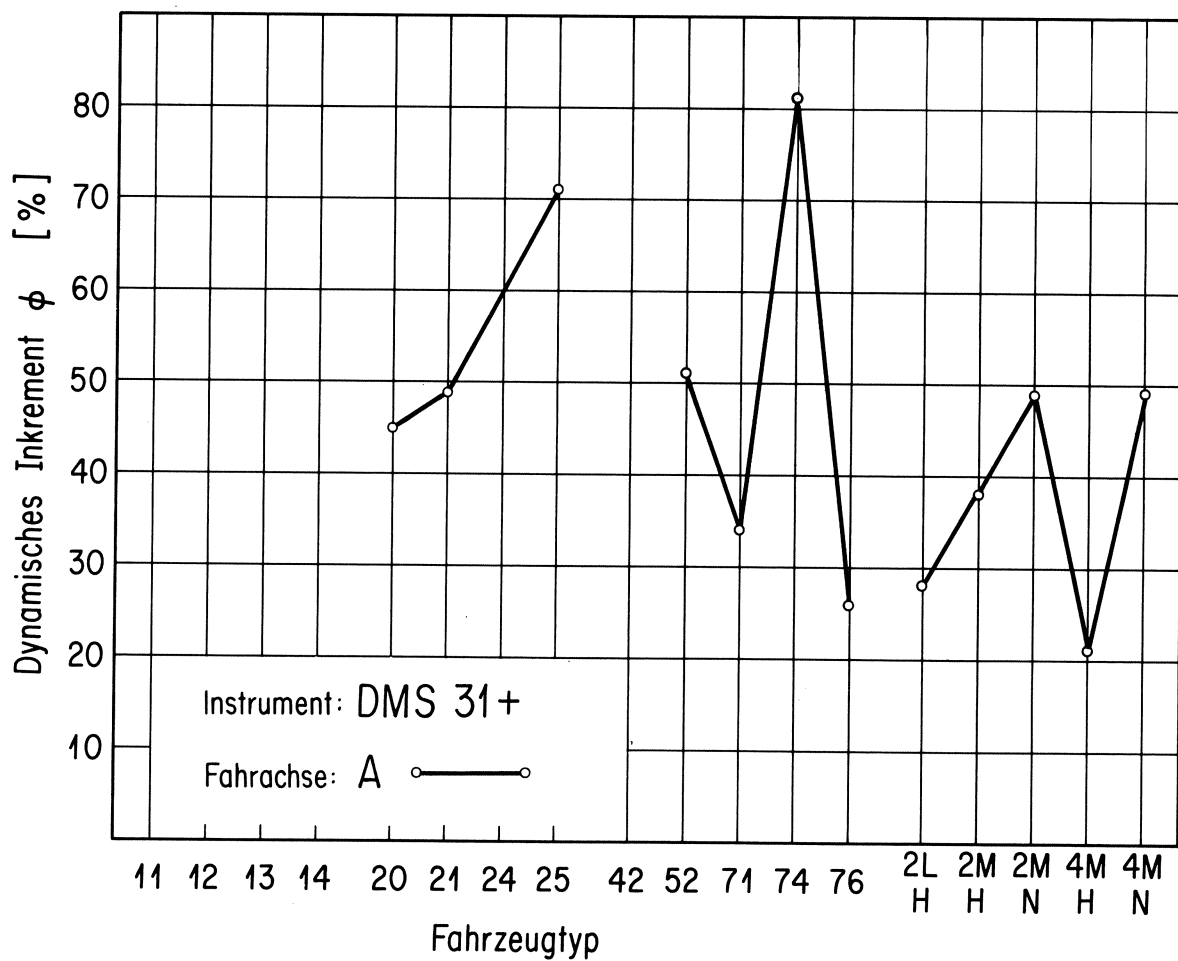
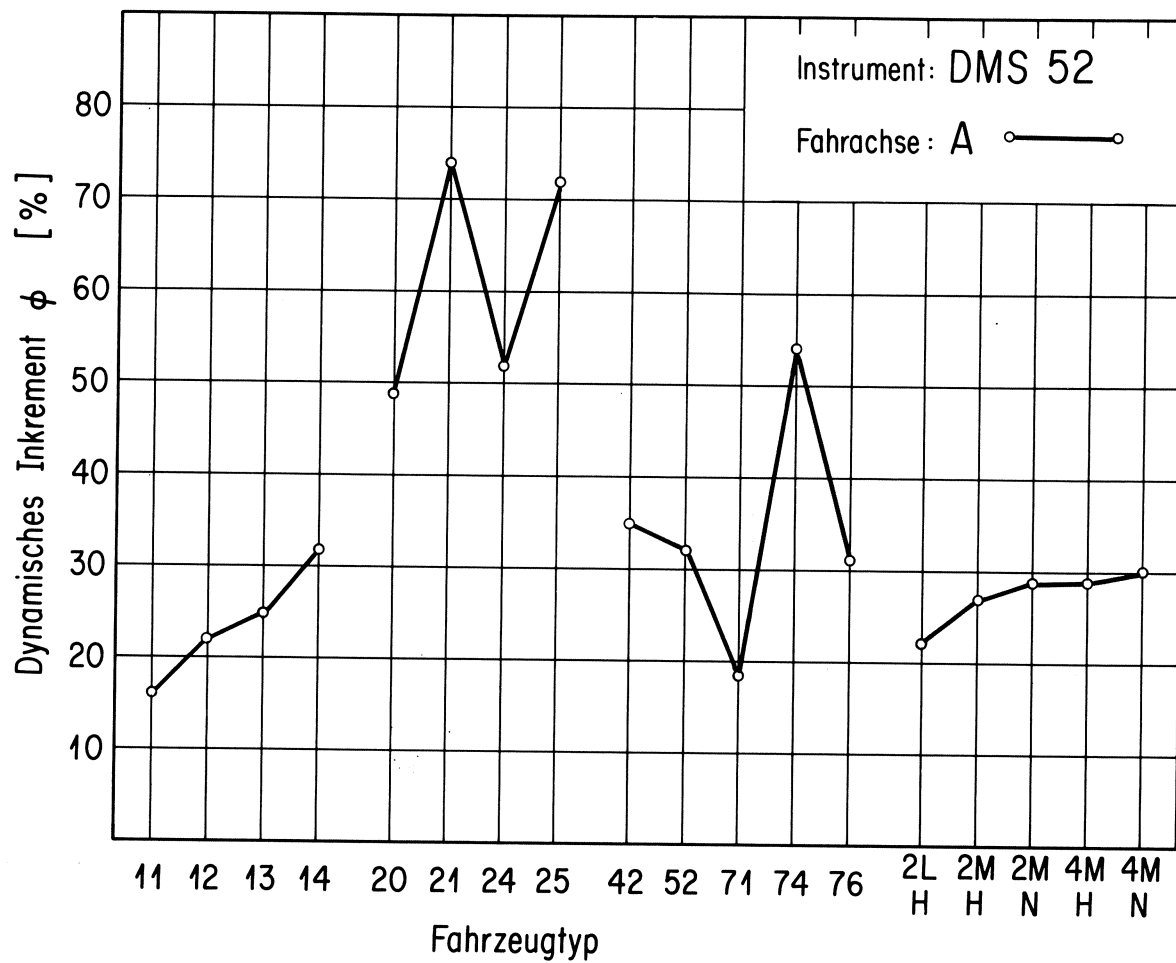


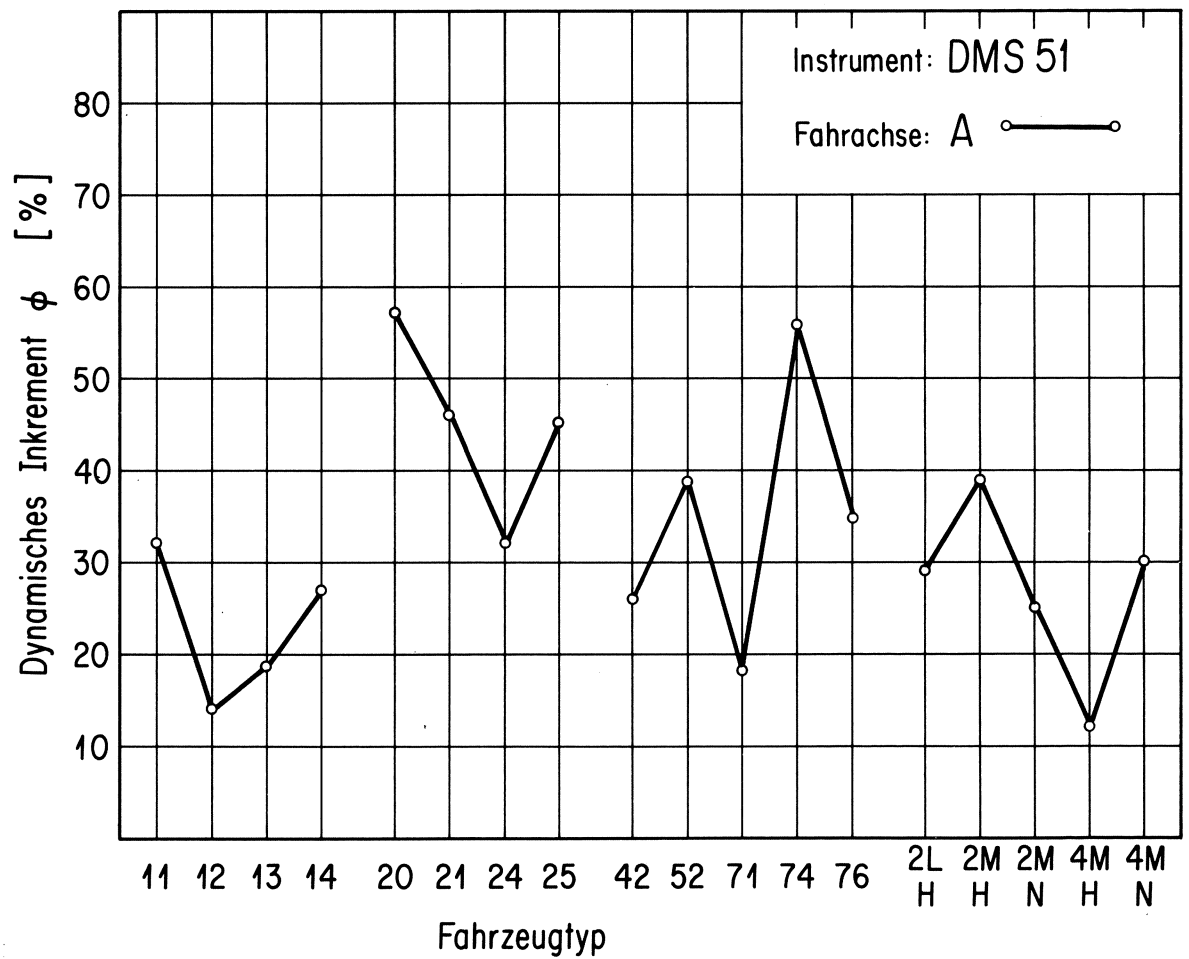
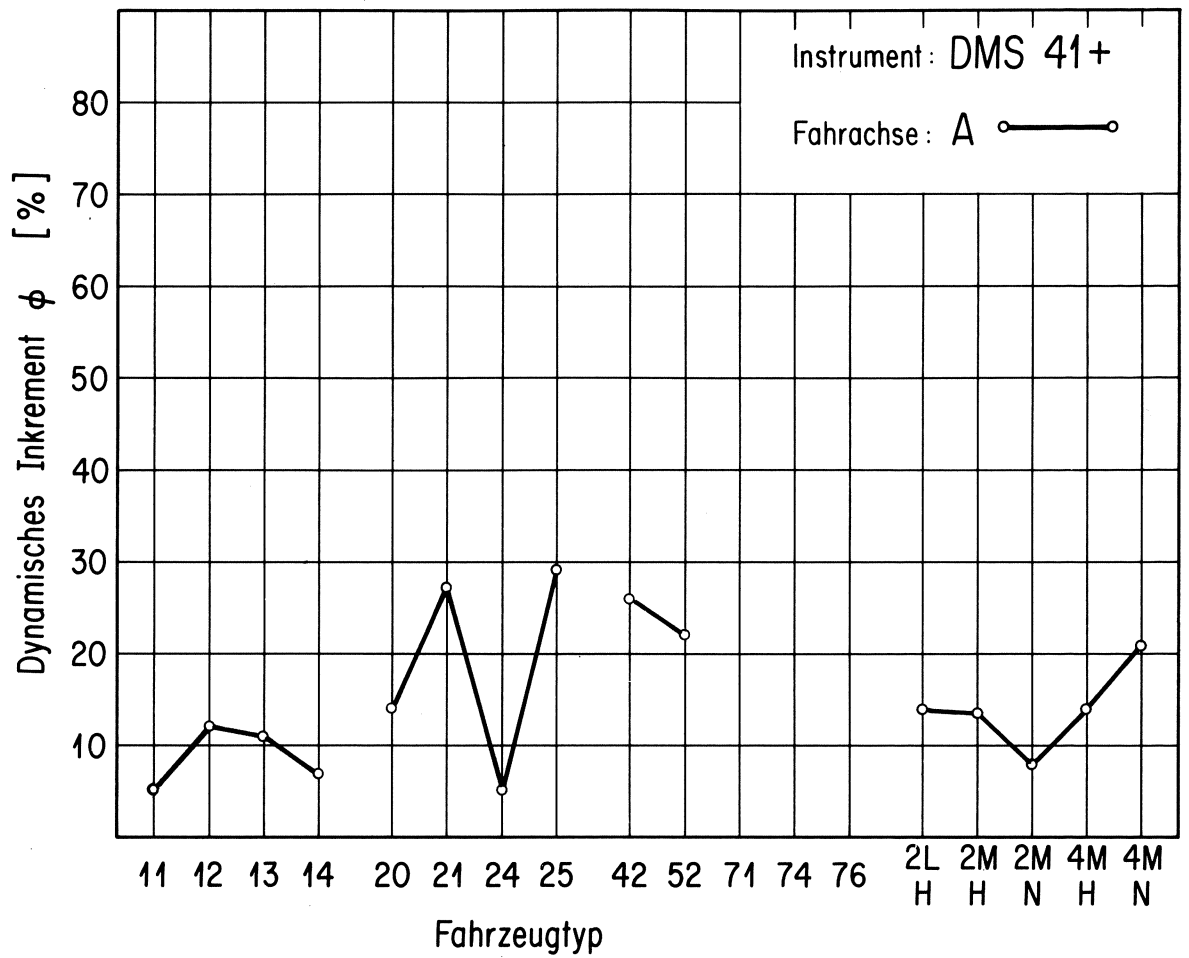


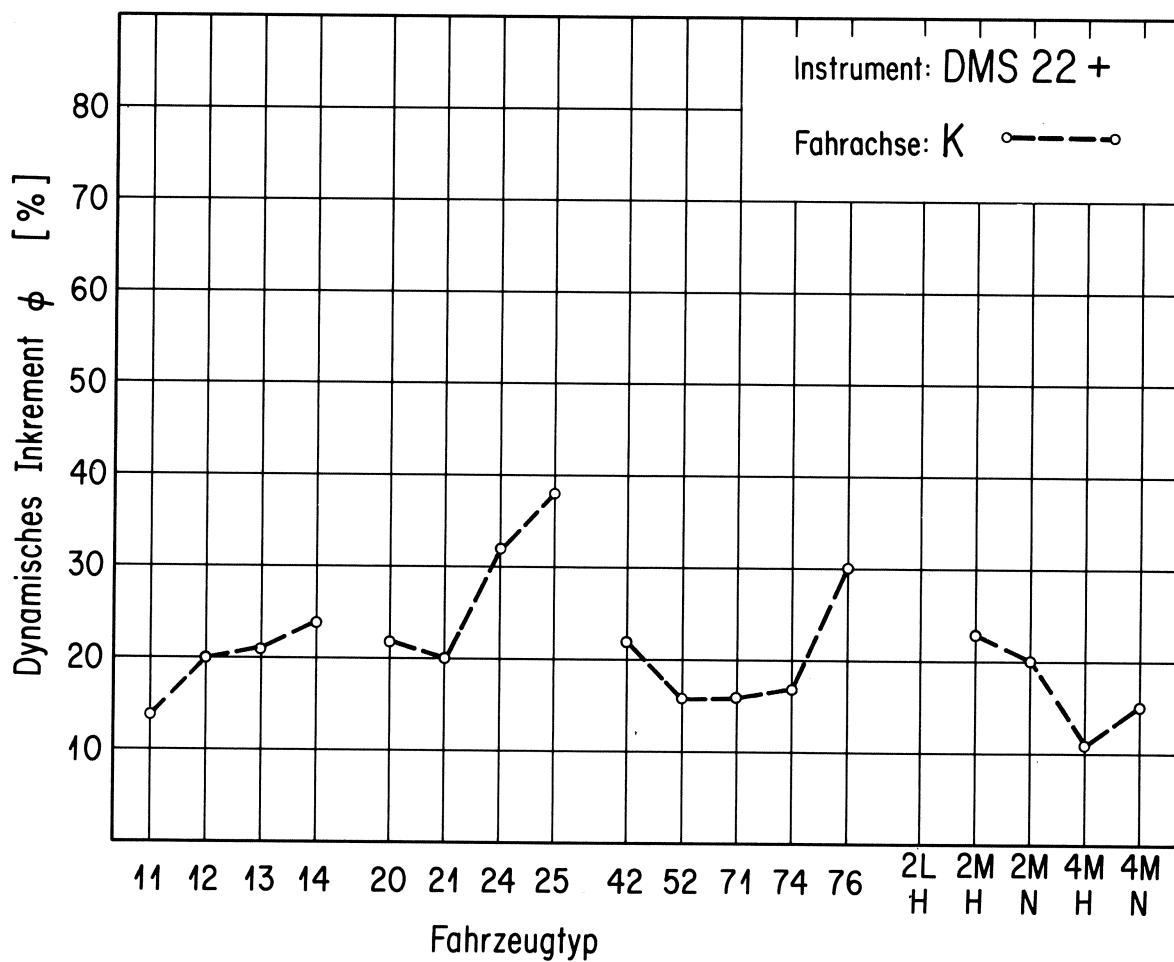
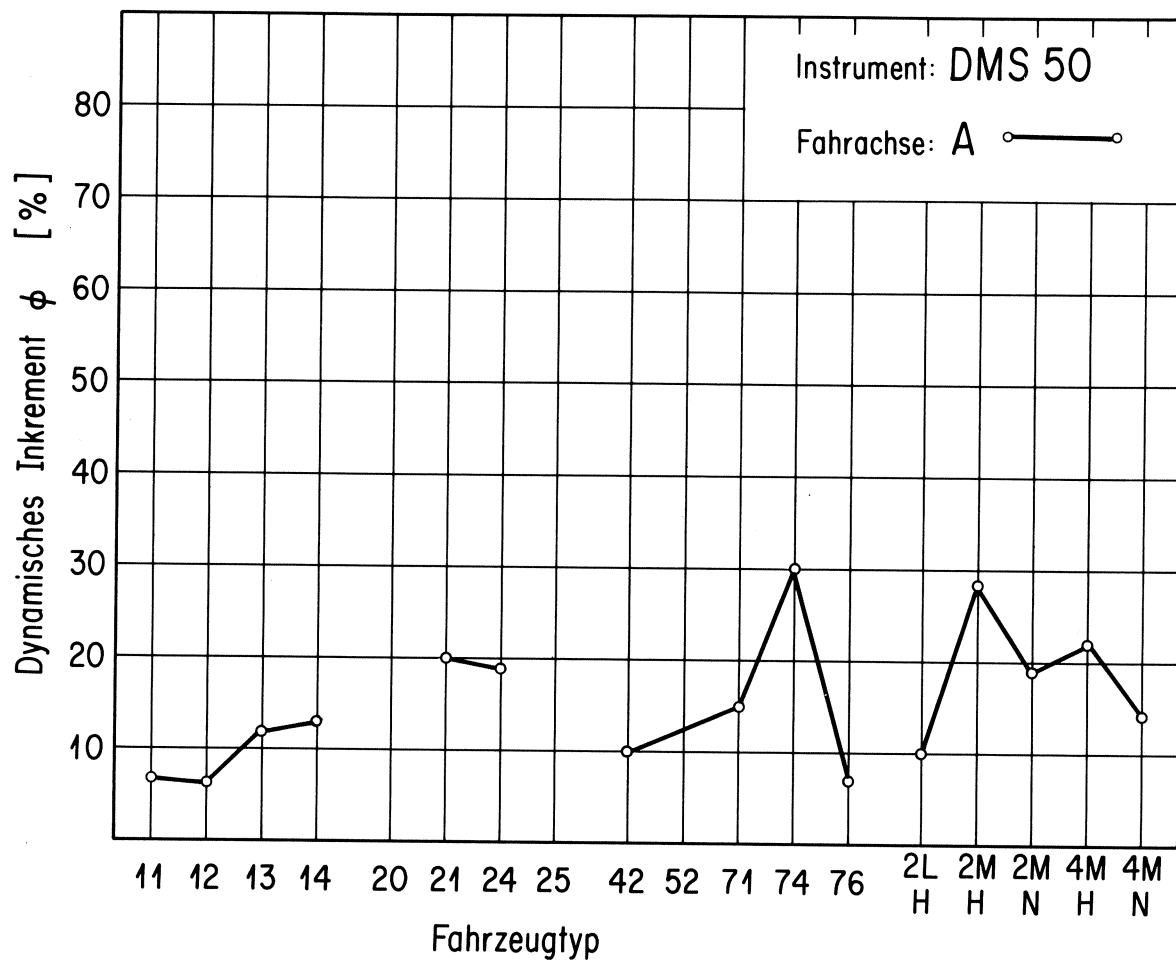


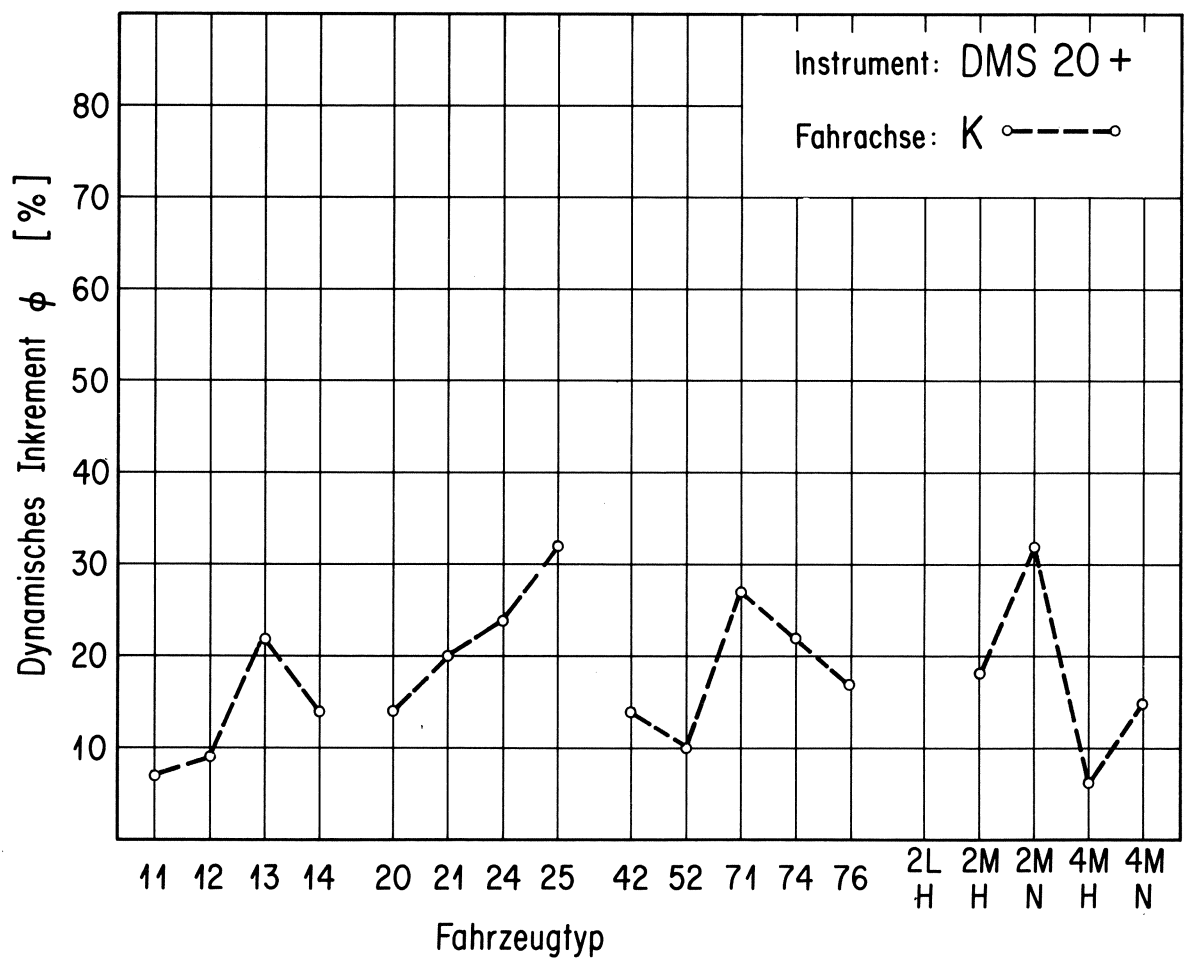
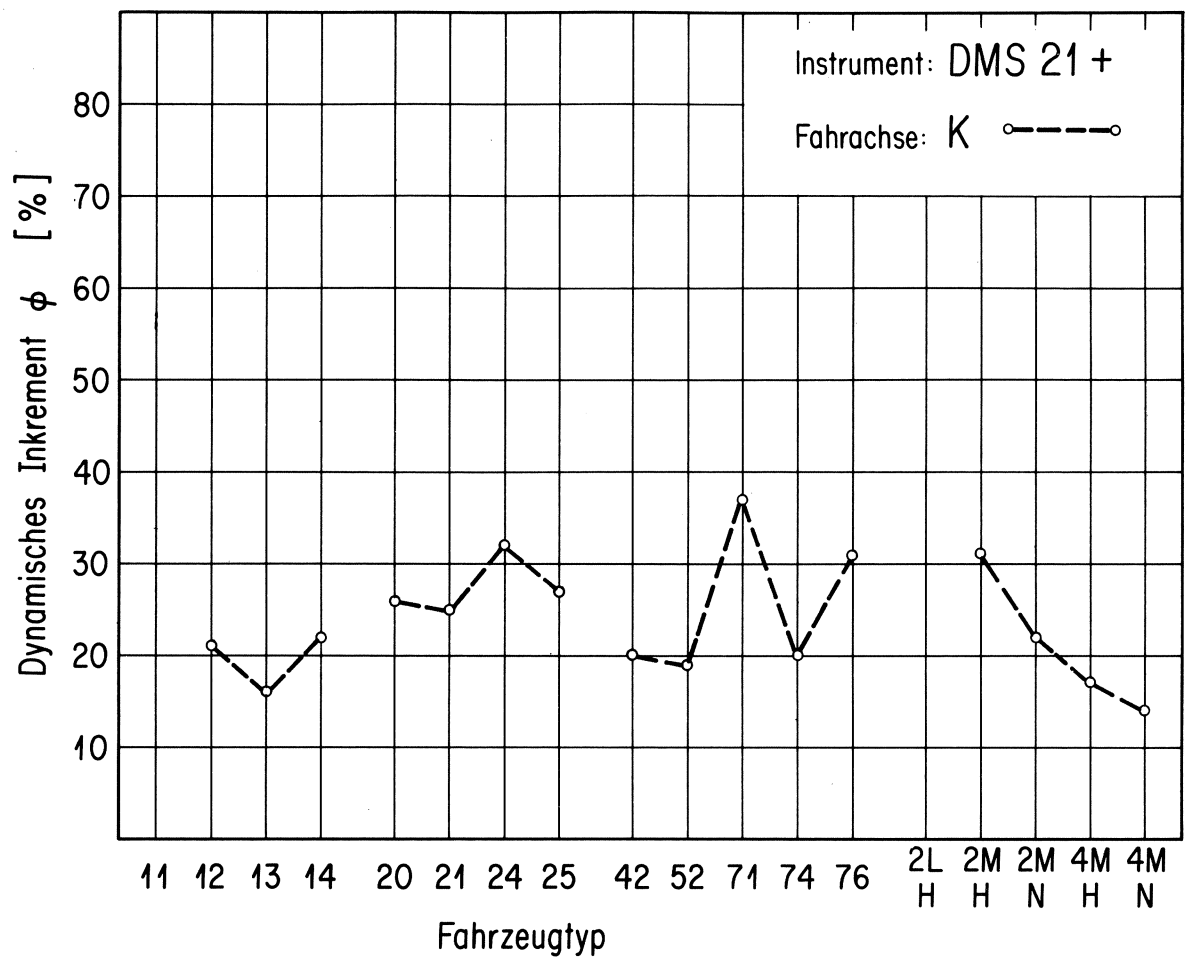


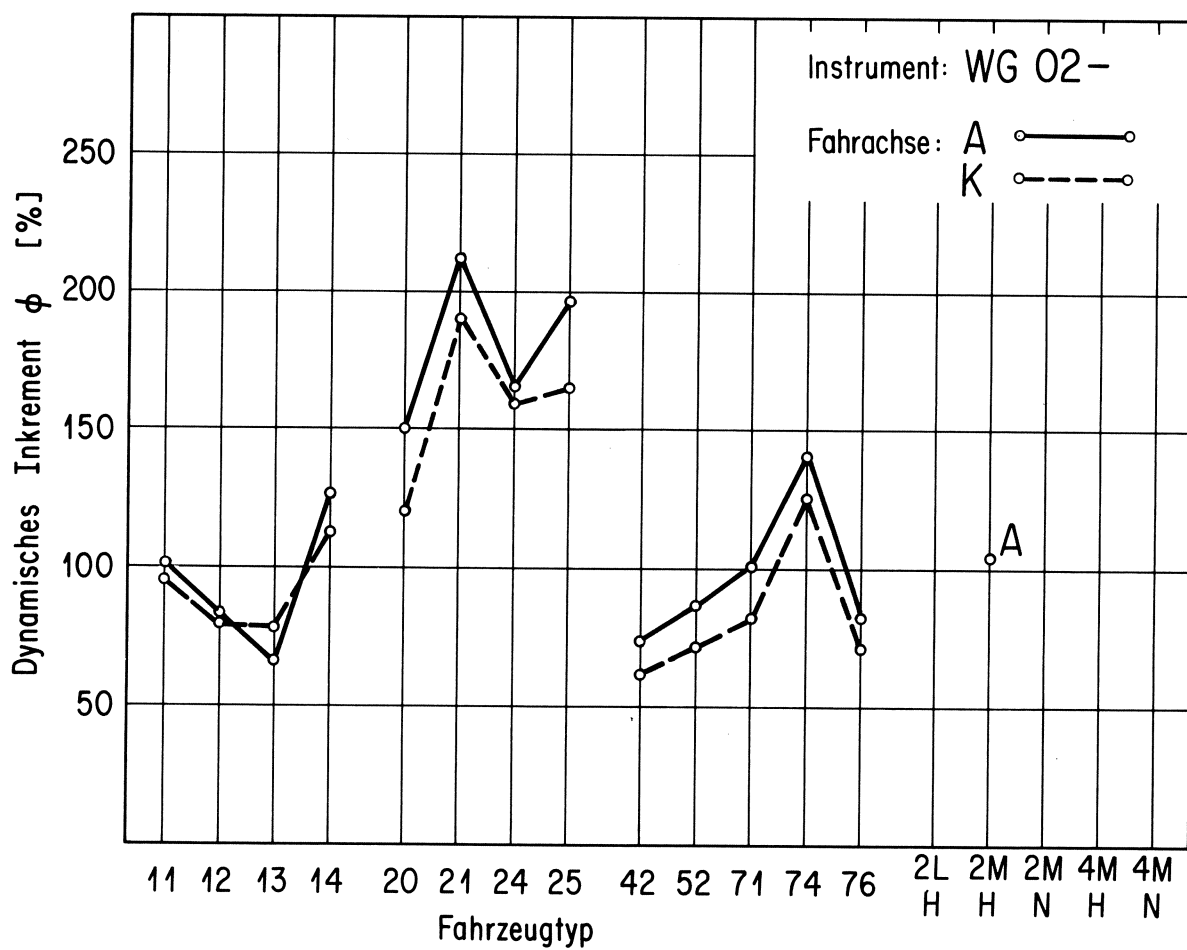
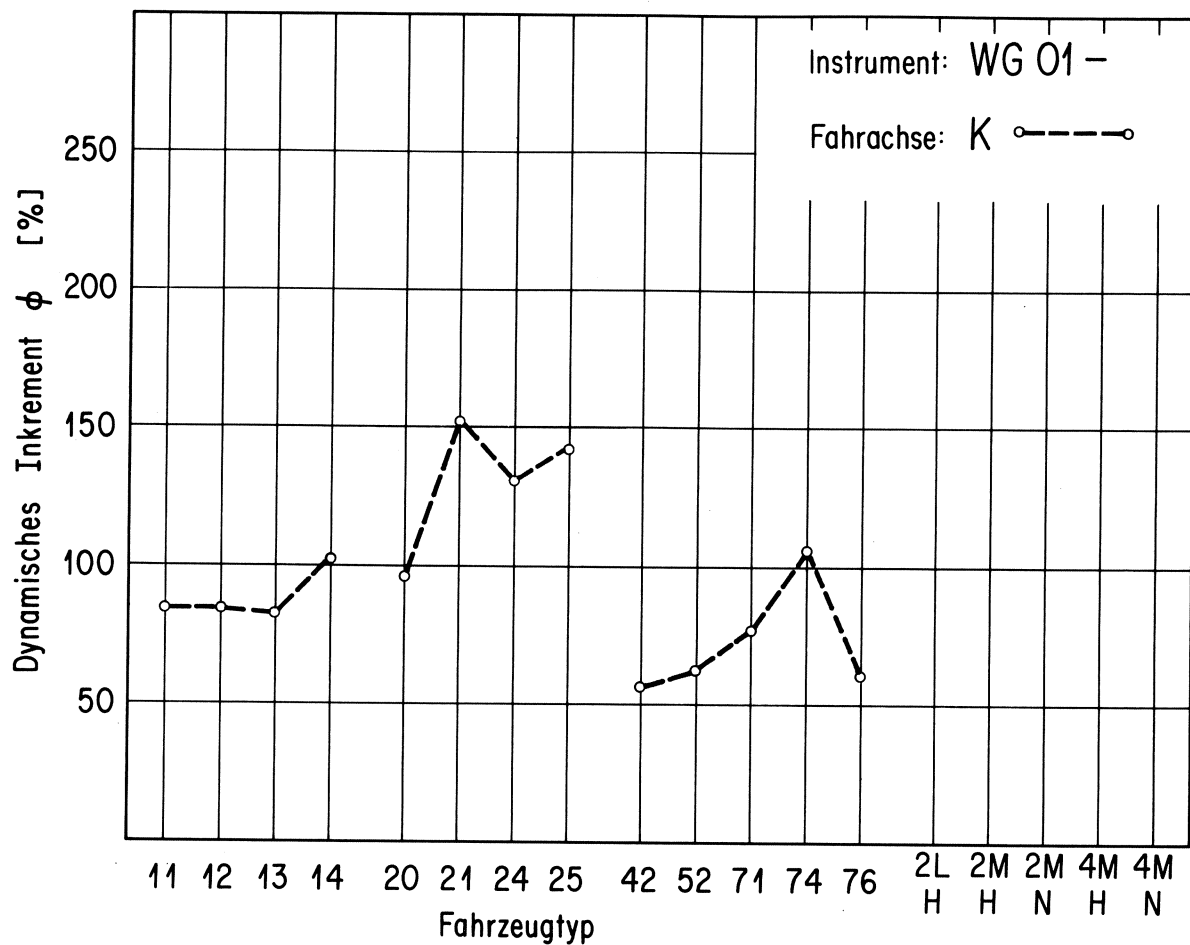


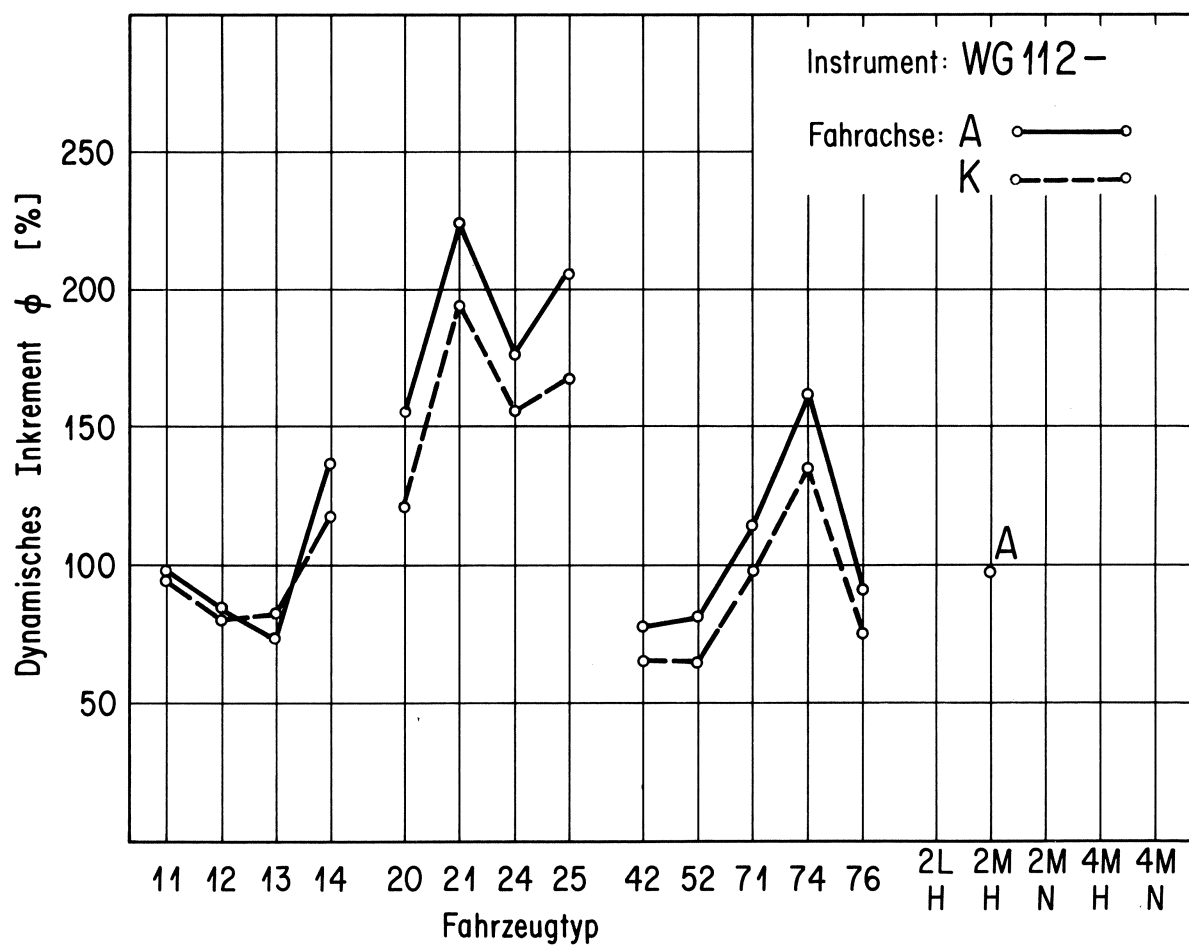
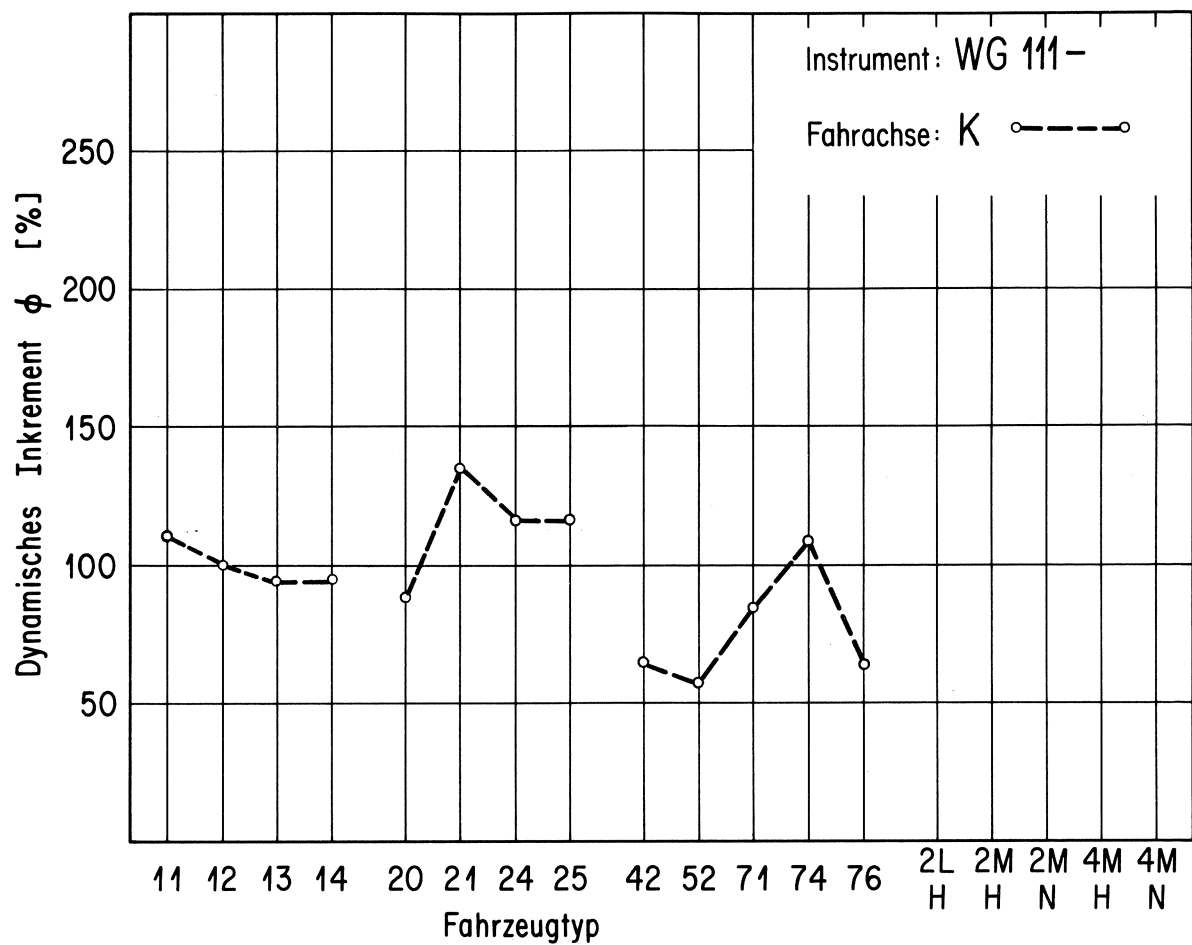


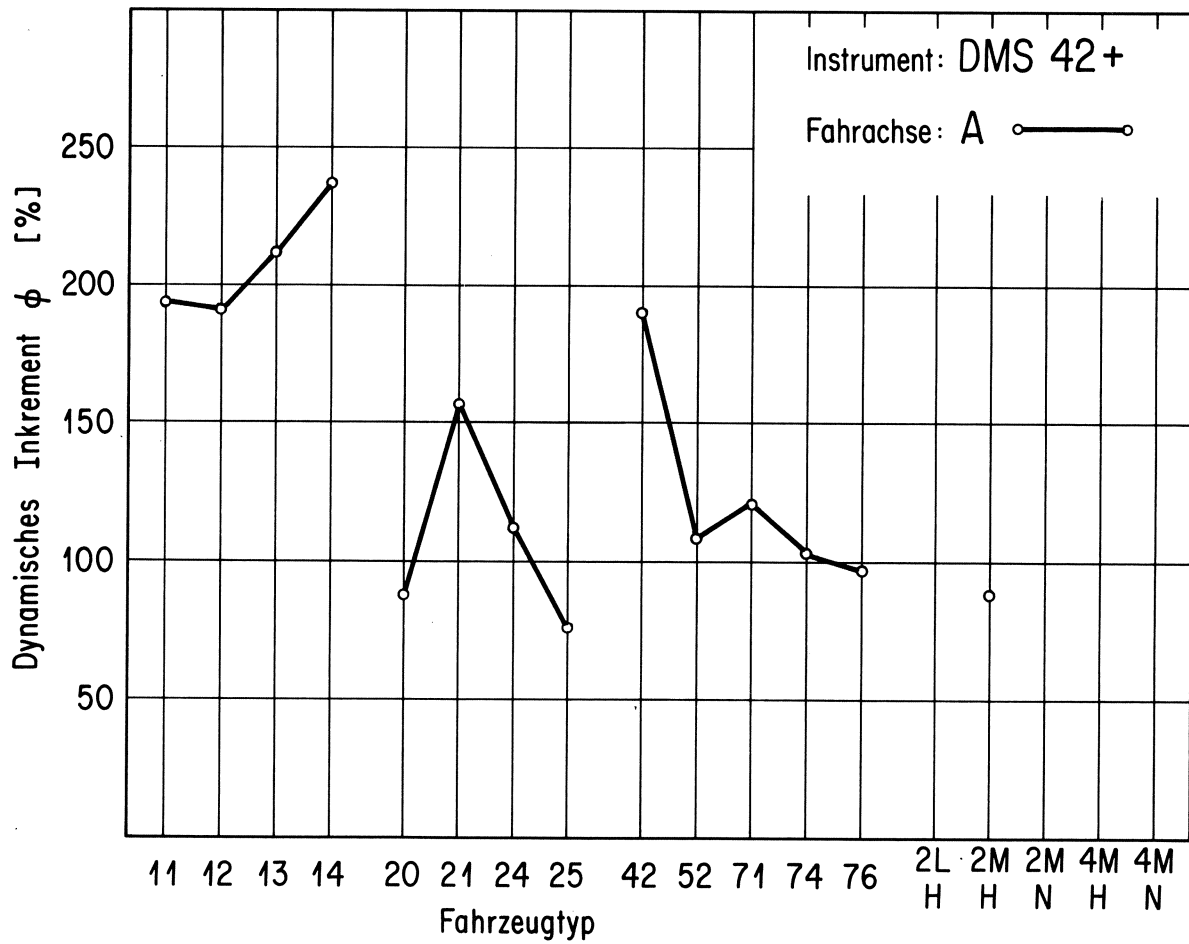
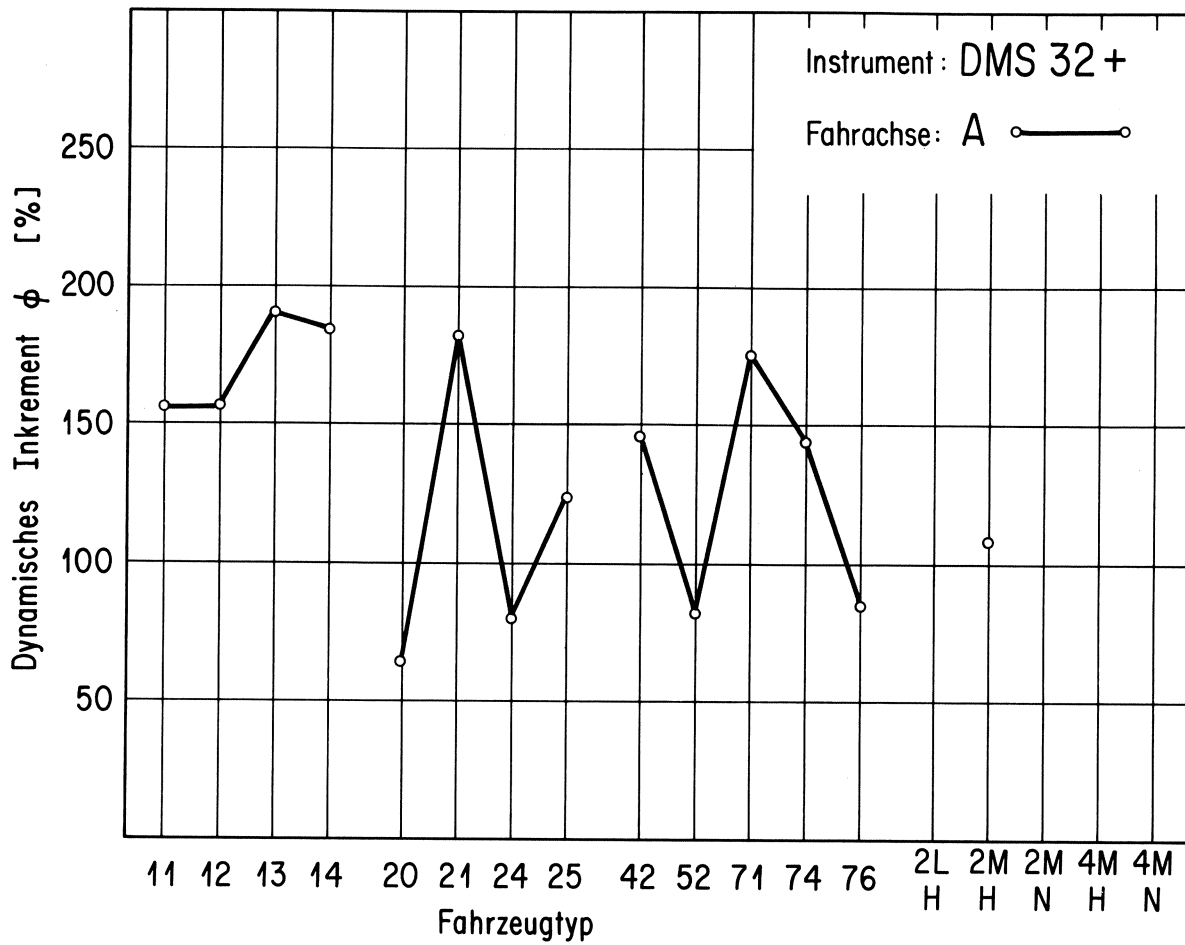


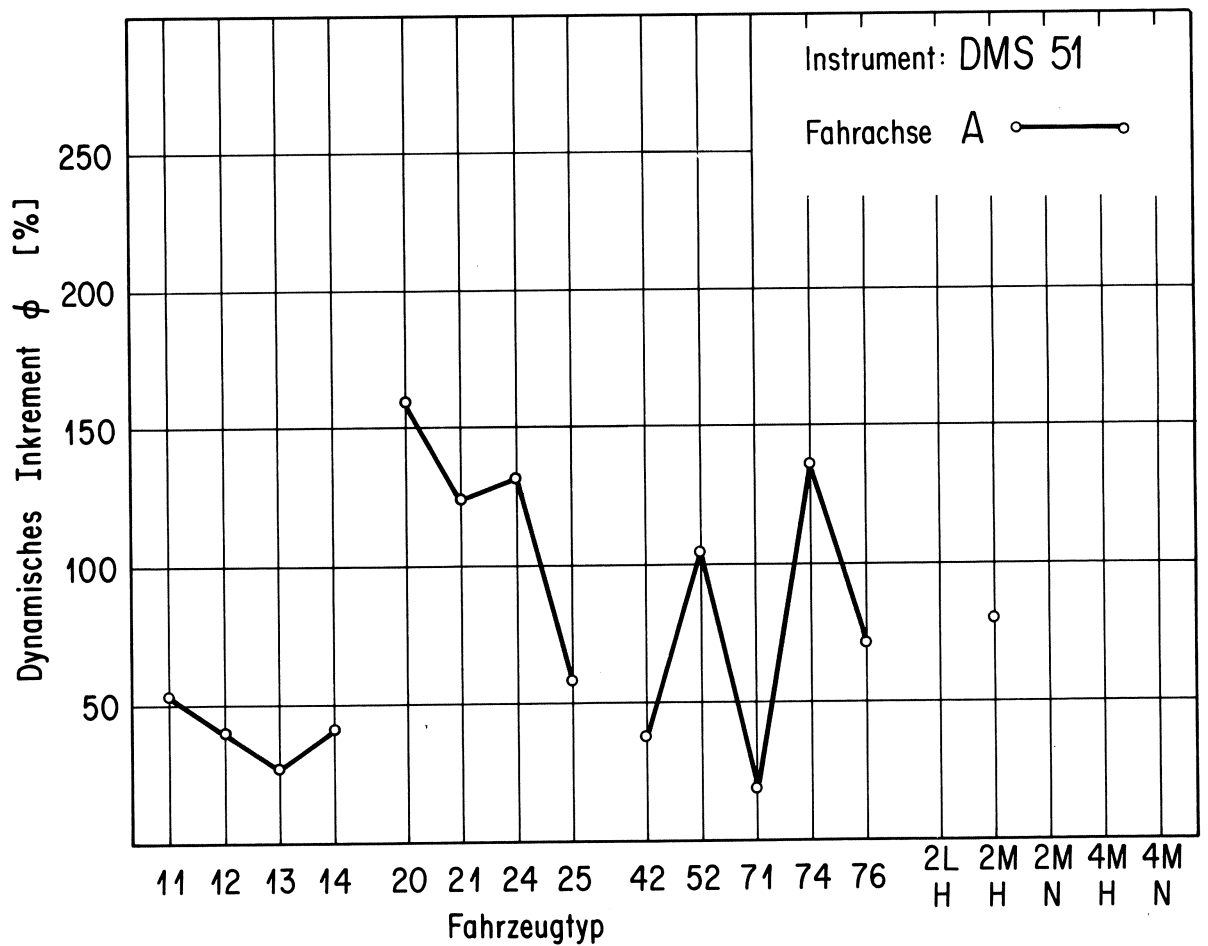
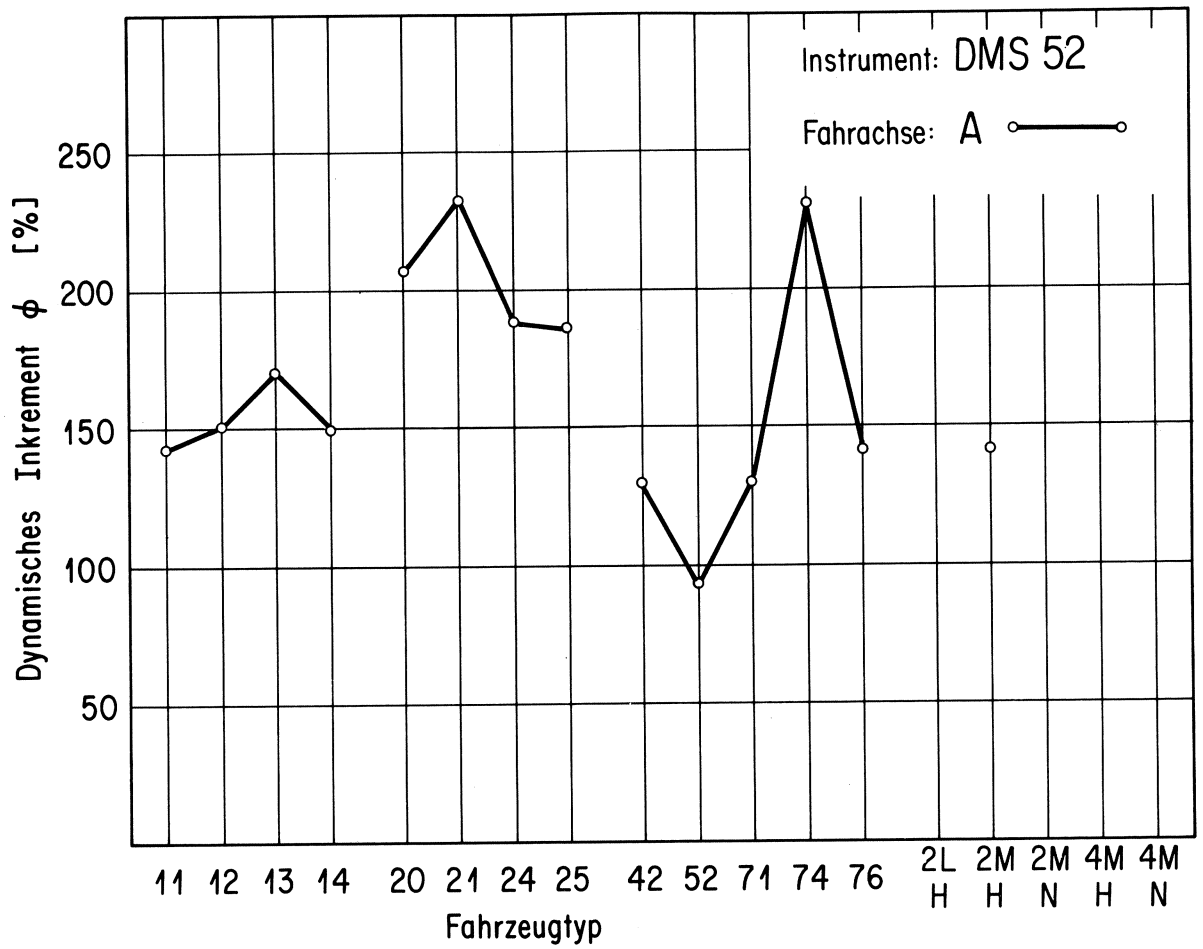


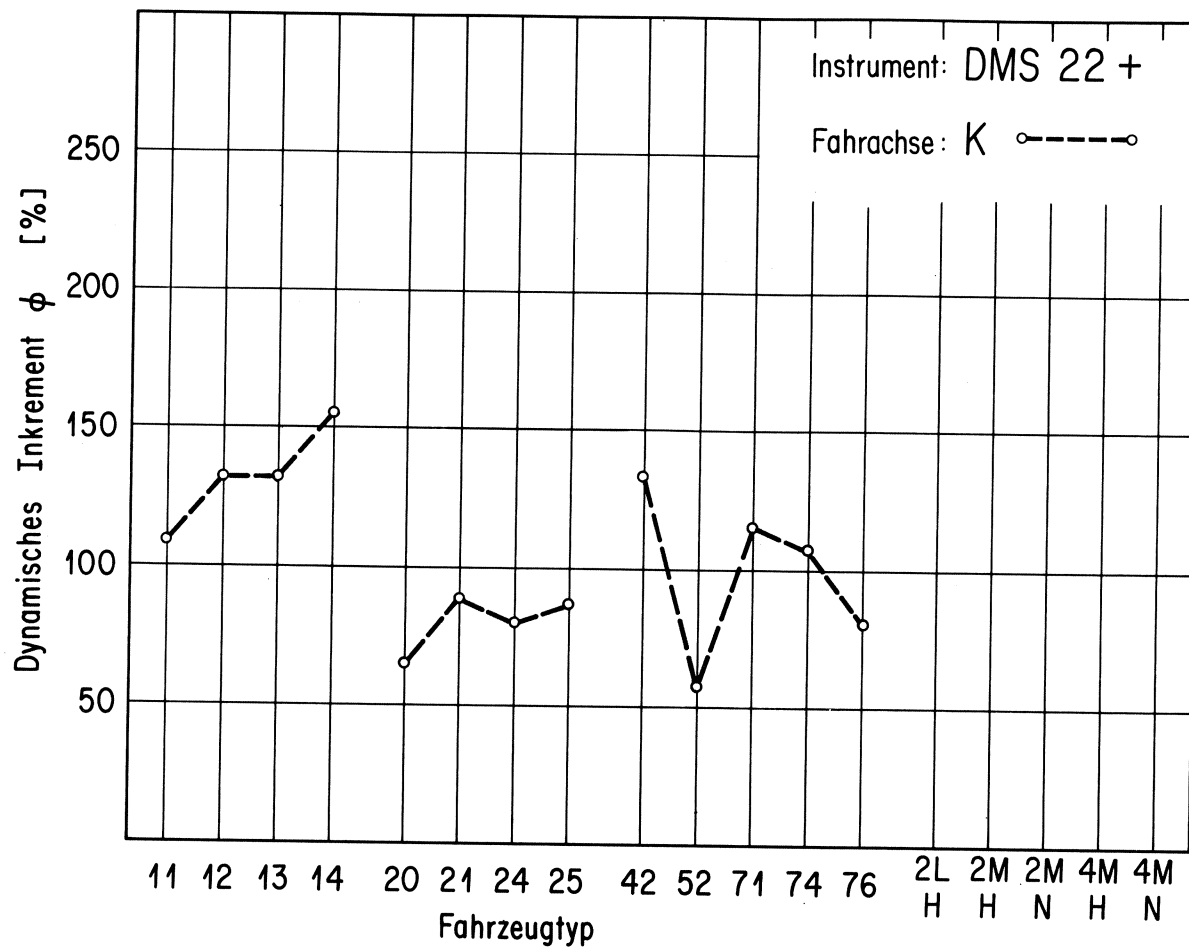












Anhang 6

Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen für fünf Gruppen von Fahrzeugtypen (Reifendruck 10 bar, Belag A)

Anhang zum Berichtteil A, Seite 134 ff,
Abschnitt 3.75,

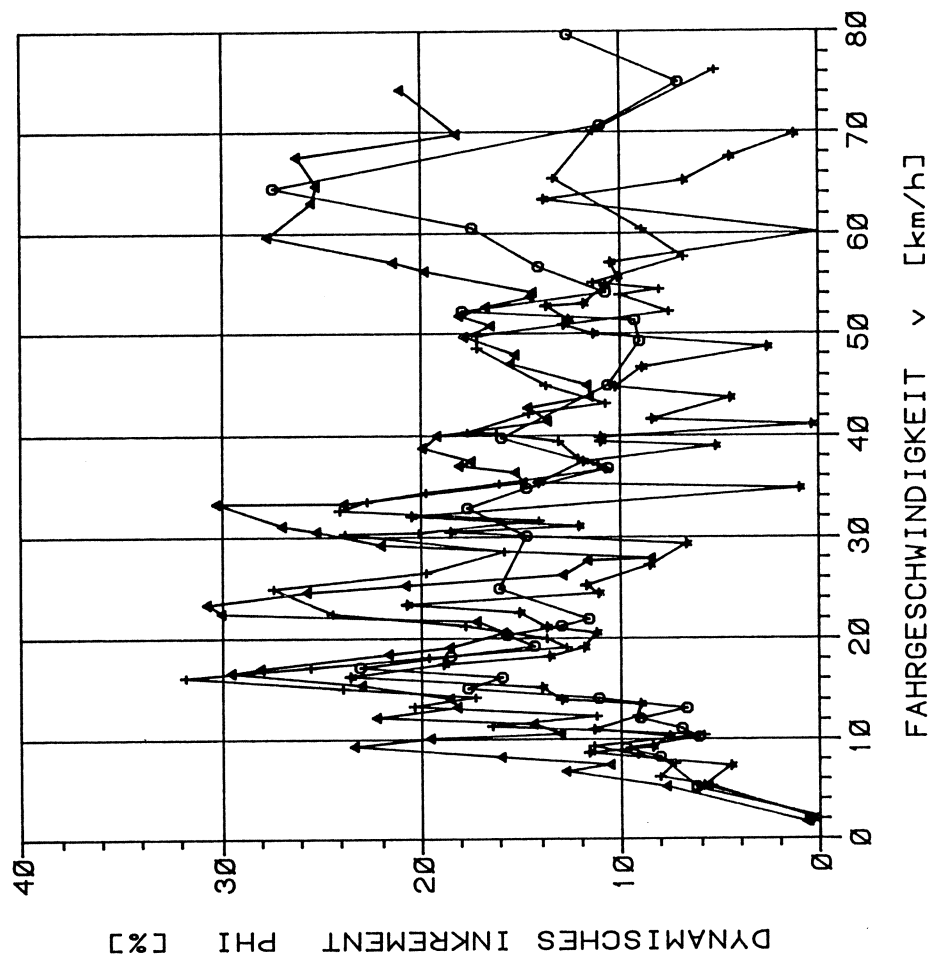
"Die $\phi(v)$ -Funktionen für fünf Gruppen von Fahrzeugtypen".

Der Verlauf des dynamischen Inkrementes über die Fahrgeschwindigkeit ist für die Fahrzeuggruppen 2D, MD, LS, und 2LH/2MH/4MH sowie 2MN/4MN grafisch dargestellt. Zudem sind der statische Vergleichswert (ASTAT) sowie das maximale dynamische Inkrement (PHIMAX) und die zugehörige Fahrgeschwindigkeit v für jede dargestellte Versuchsserie angegeben.

Die Seiten A6.1 bis A6.39 enthalten die Resultate für Durchbiegungen, A6.40 bis A6.83 jene für Dehnungen, in beiden Fällen für Fahrten ohne Brett. Die Resultate für Fahrten mit Brett sind für Durchbiegungen auf den Seiten A6.84 bis A6.90, für Dehnungen auf den Seiten A6.91 bis A6.109 gegeben.

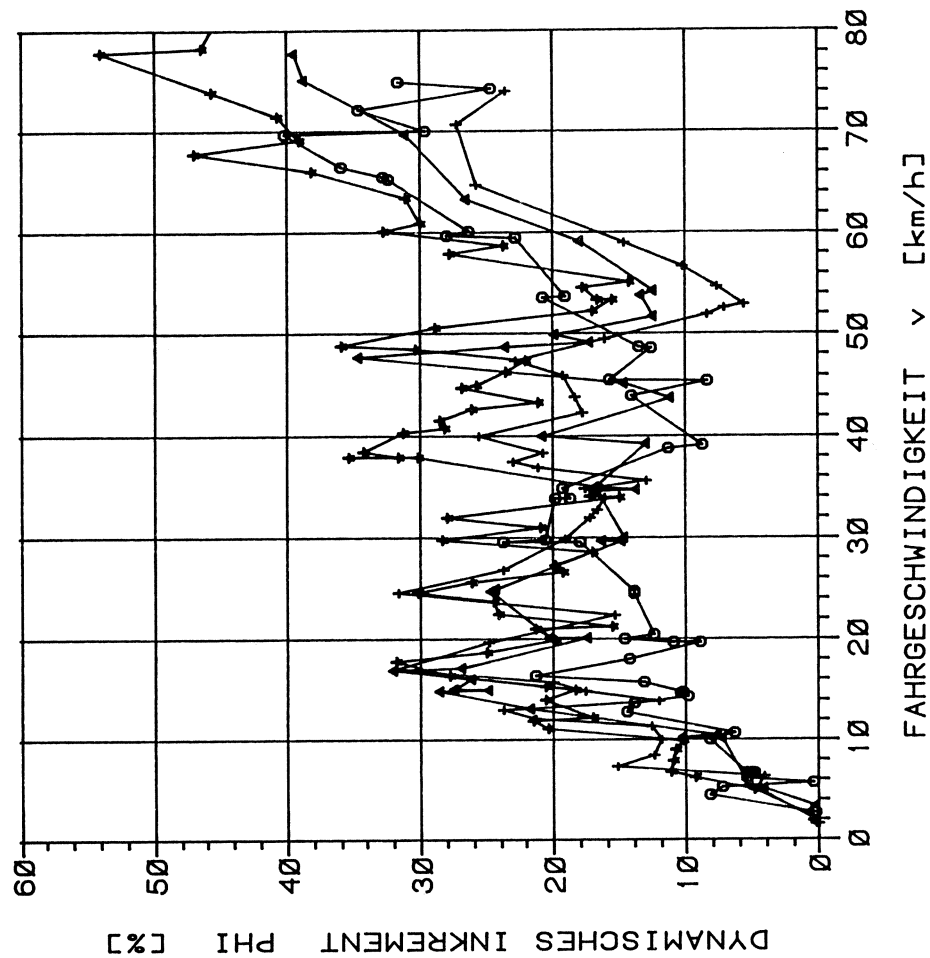
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	11R 10 AoA	-7.1 MM	27.33
+	WG 82	12R 10 AoA	-7.2 MM	23.51
+	WG 82	13R 10 AoA	-6.8 MM	31.81
+	WG 82	14R 10 AoA	-6.7 MM	30.65
				64.5
				16.3
				16.2
				23.3



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 82

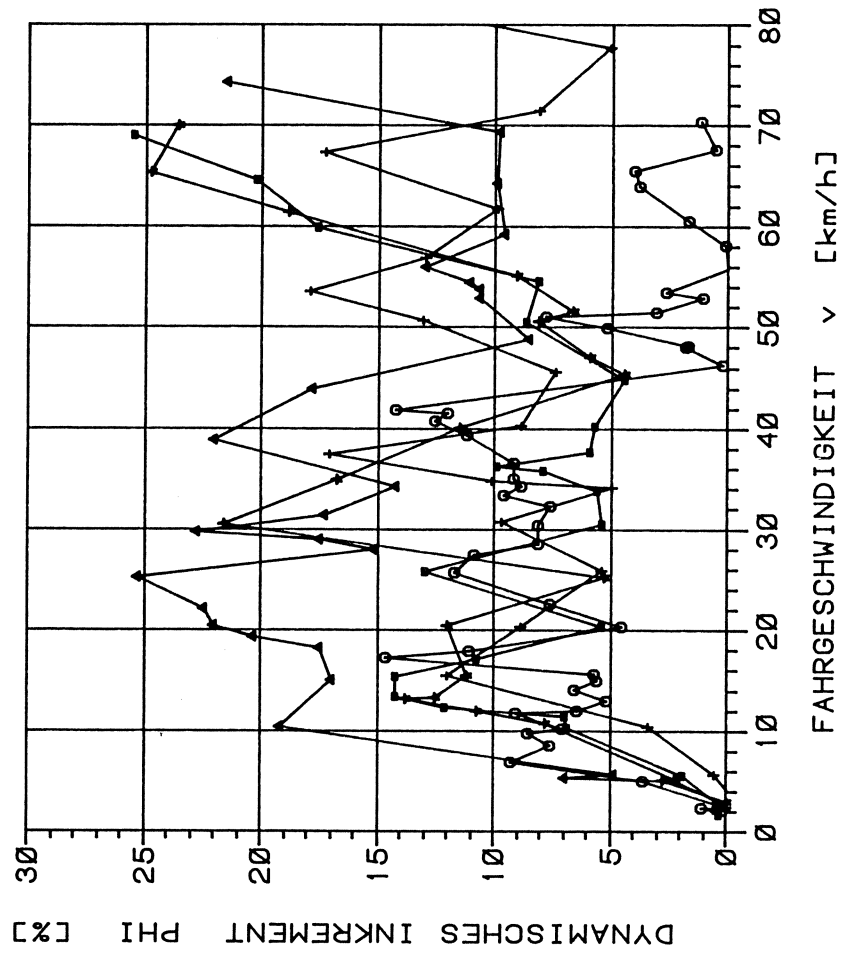
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	20R 10 AoA	-1.18 MM	40.00
+	WG 82	21R 10 AoA	-1.12 MM	53.96
+	WG 82	24R 10 AoA	-1.29 MM	31.83
+	WG 82	25R 10 AoA	-1.20 MM	39.37
				69.7
				77.8
				17.0
				77.6



A6.4
A6.3

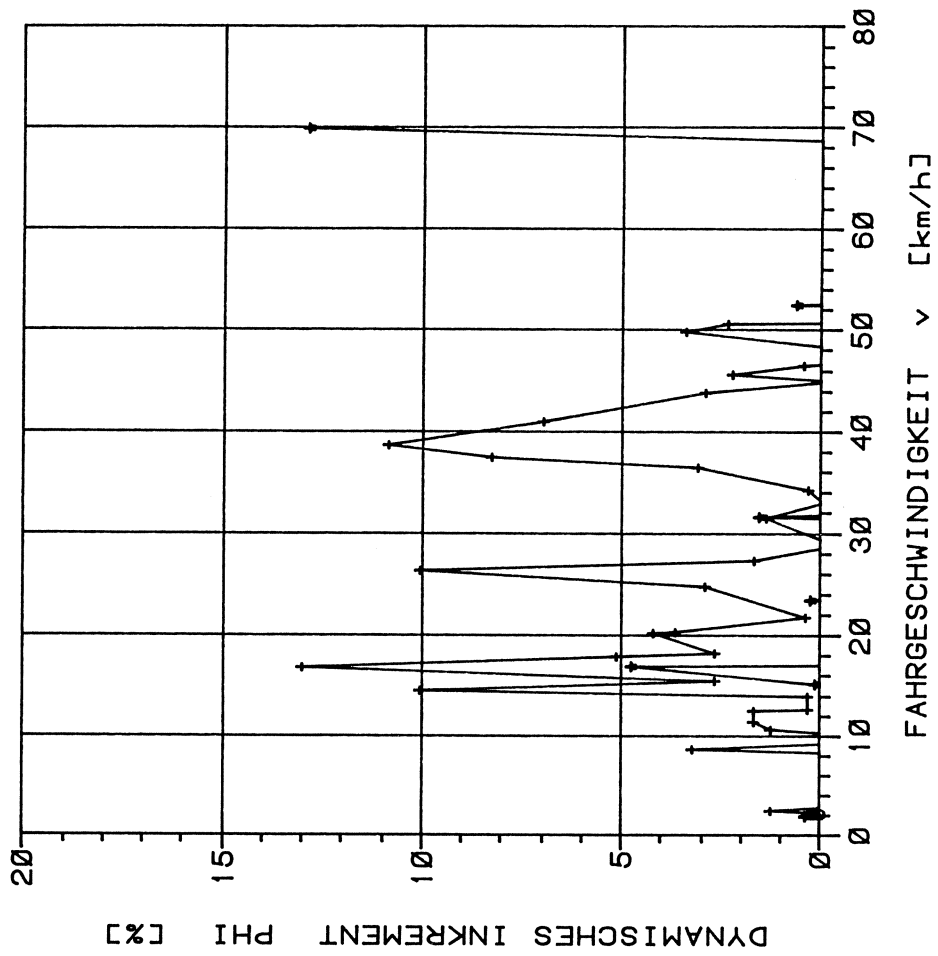
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	42R 10 AoA	-1.15 MM	14.68
+	WG 82	52R 10 AoA	-1.69 MM	24.77
+	WG 82	71R 10 AoA	-1.01 MM	17.89
+	WG 82	74R 10 AoA	-1.20 MM	25.30
+	WG 82	76R 10 AoA	-1.50 MM	25.50
				17.3
				65.4
				53.5
				25.2
				69.0



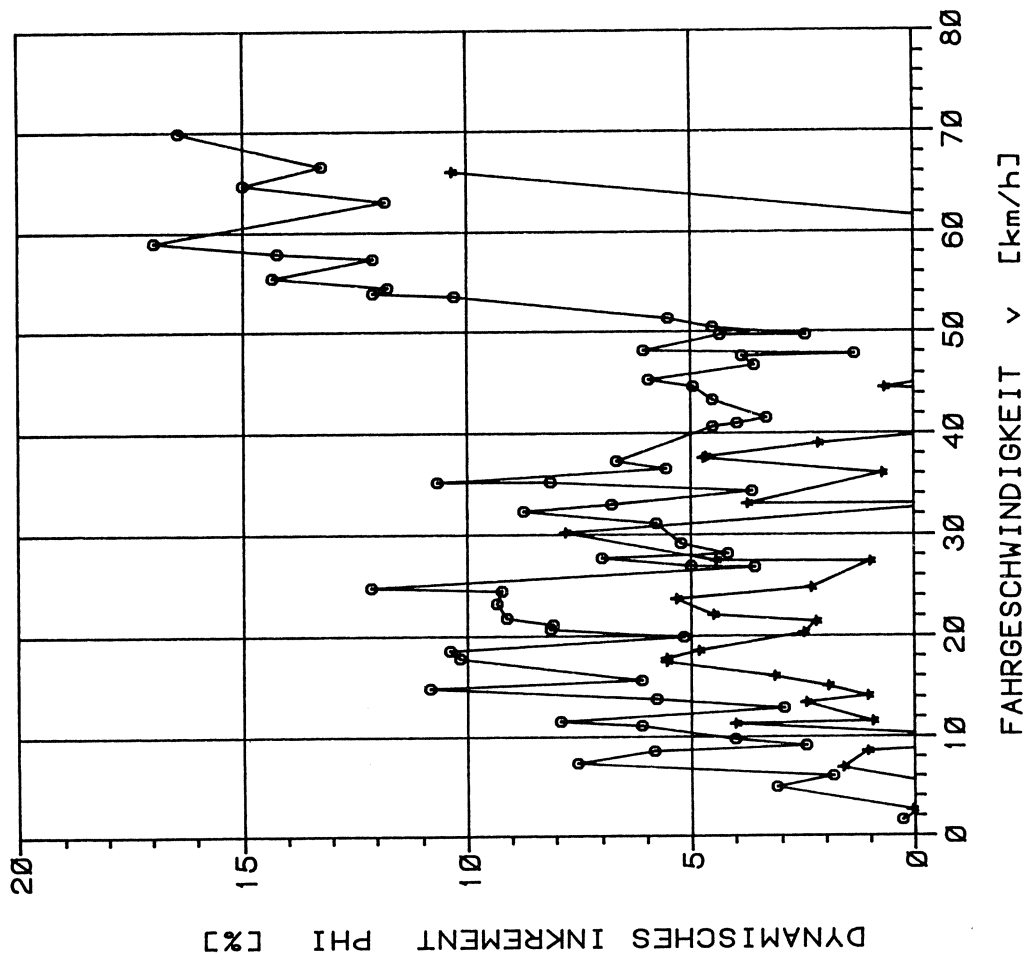
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	2LH 10 AoA	-1.17 MM	1.00
+	WG 82	2MH 10 AoA	-2.08 MM	12.87
+	WG 82	4MH 10 AoA	-1.78 MM	12.99
				16.8



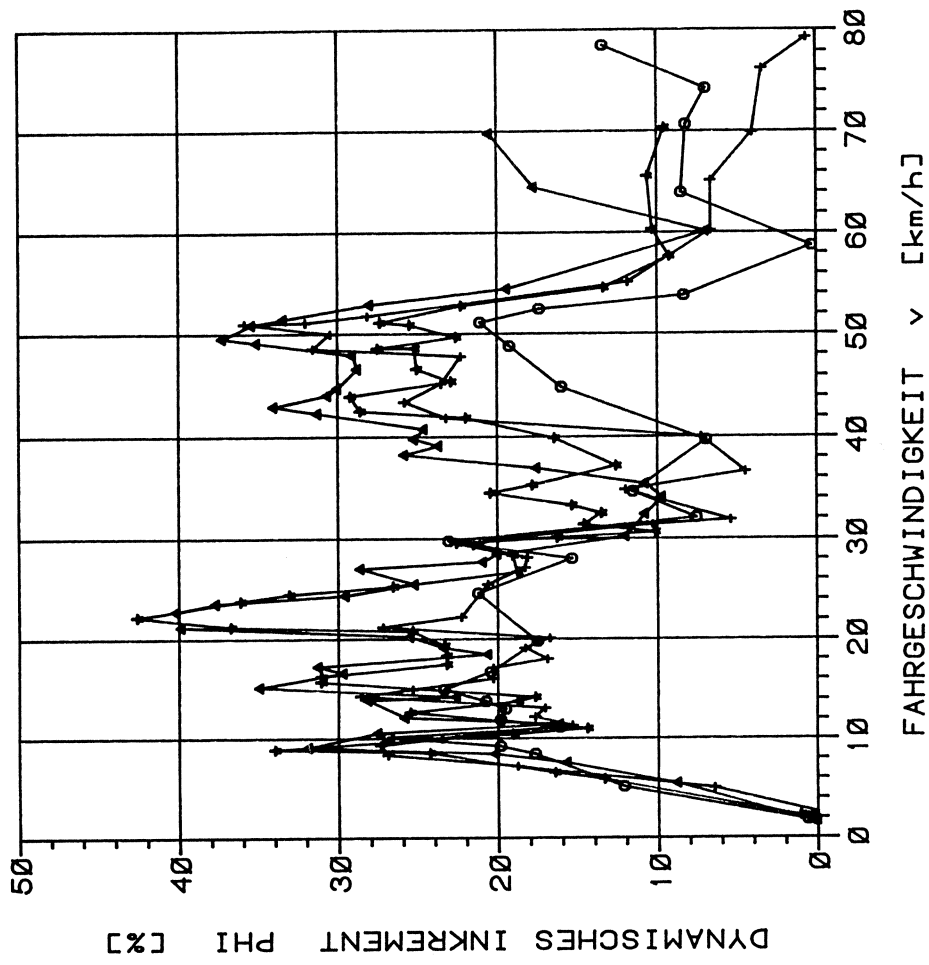
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 82	2MN 10 oA	-2.87 MM	16.93	58.9
WG 82	4MN 10 oA	-3.80 MM	10.30	66.0



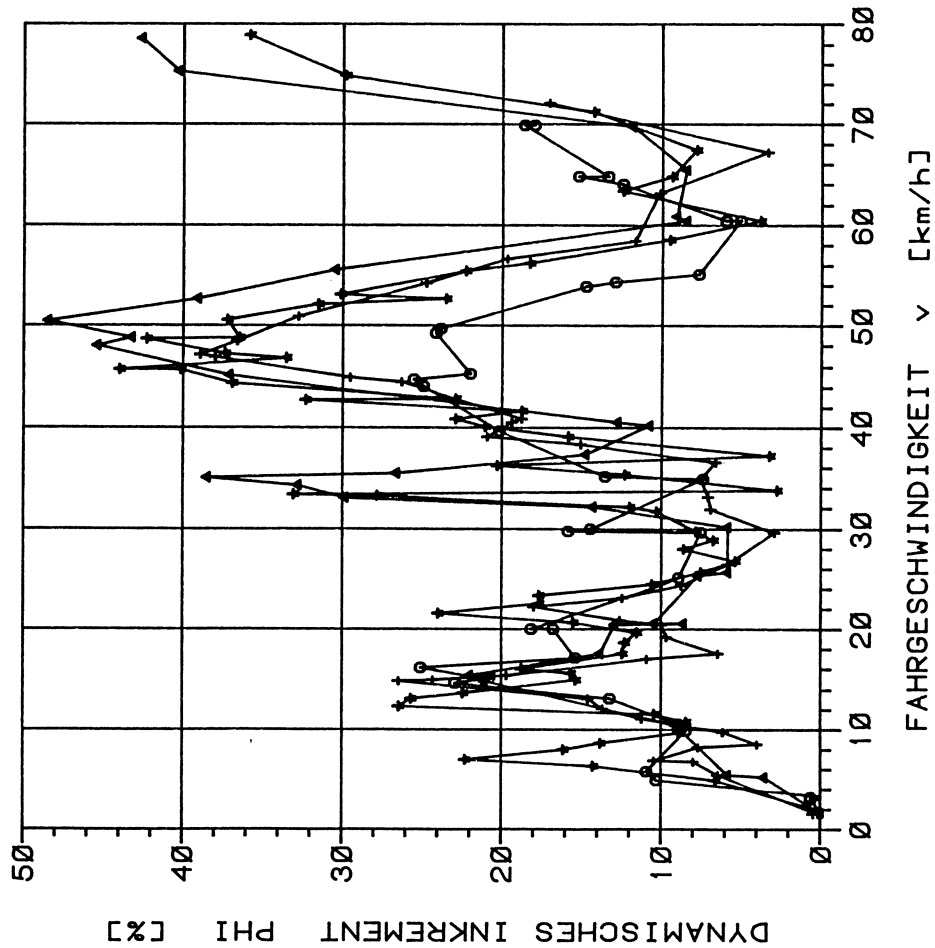
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 01

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 01	11R 10 KoA	-1.80 MM	26.95	10.0
WG 01	12R 10 KoA	-1.74 MM	42.54	22.1
WG 01	13R 10 KoA	-1.79 MM	35.92	51.0
WG 01	14R 10 KoA	-1.68 MM	40.21	22.7



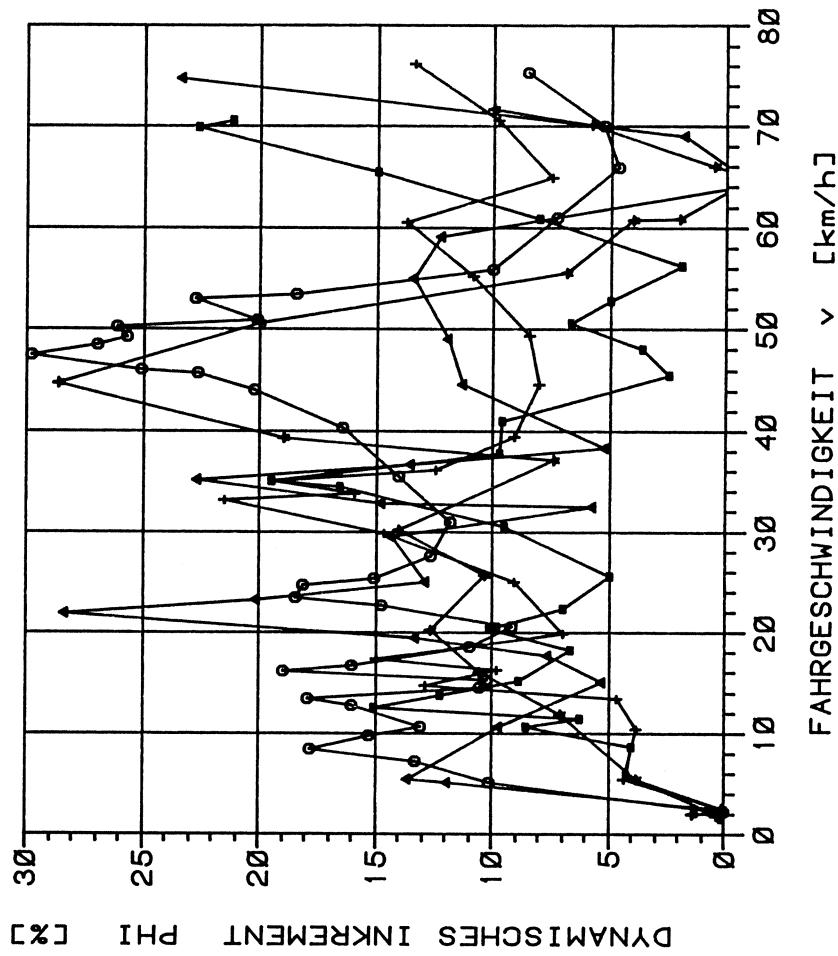
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 01

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
○—	WG 01	20R 10 KoA	-2.94 MM
→—	WG 01	21R 10 KoA	-2.84 MM
↑—	WG 01	24R 10 KoA	-3.20 MM
▲—	WG 01	25R 10 KoA	-2.89 MM
			44.6
			44.01
			38.97
			48.49
			45.7
			47.1
			50.4



ZUSAMMENGESetzte FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 01

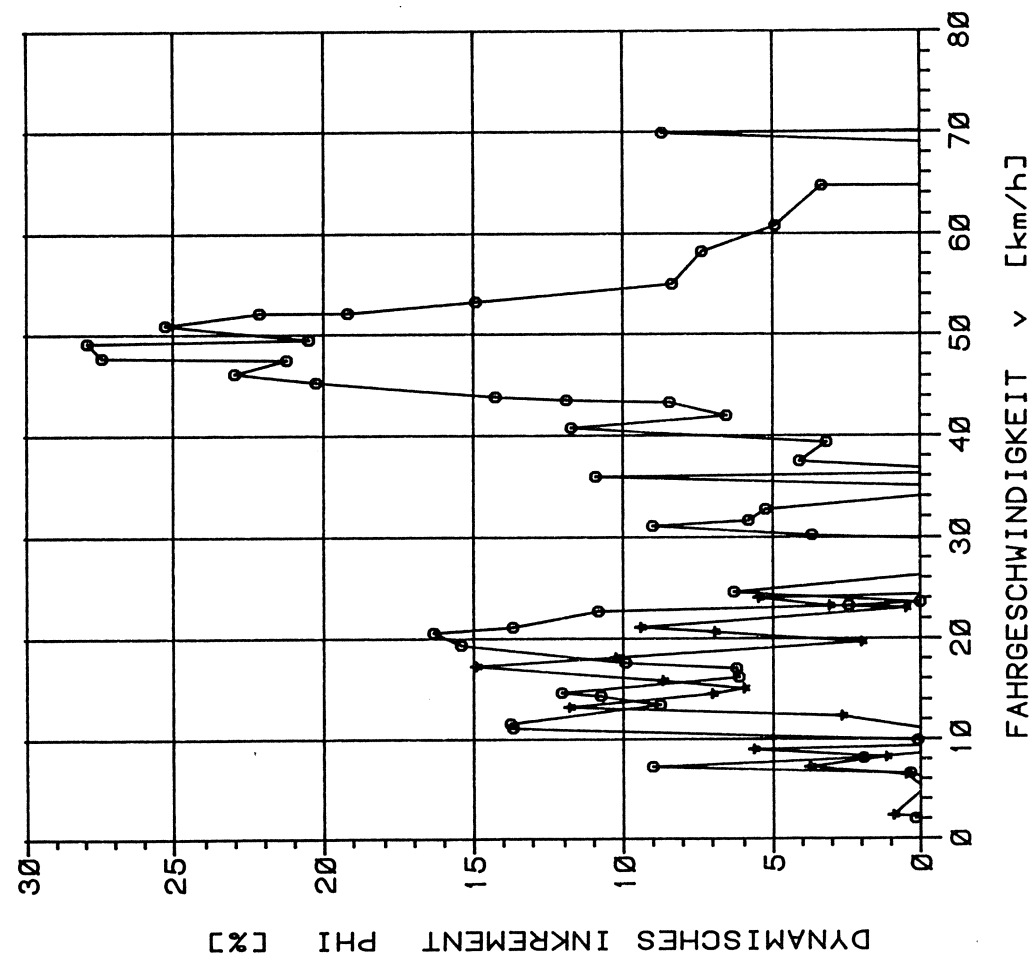
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
○—	WG 01	42R 10 KoA	-2.75 MM
→—	WG 01	52R 10 KoA	-4.07 MM
↑—	WG 01	71R 10 KoA	-2.46 MM
▲—	WG 01	74R 10 KoA	-2.98 MM
■—	WG 01	76R 10 KoA	-3.68 MM
			29.84
			28.58
			21.52
			28.29
			21.8
			69.8



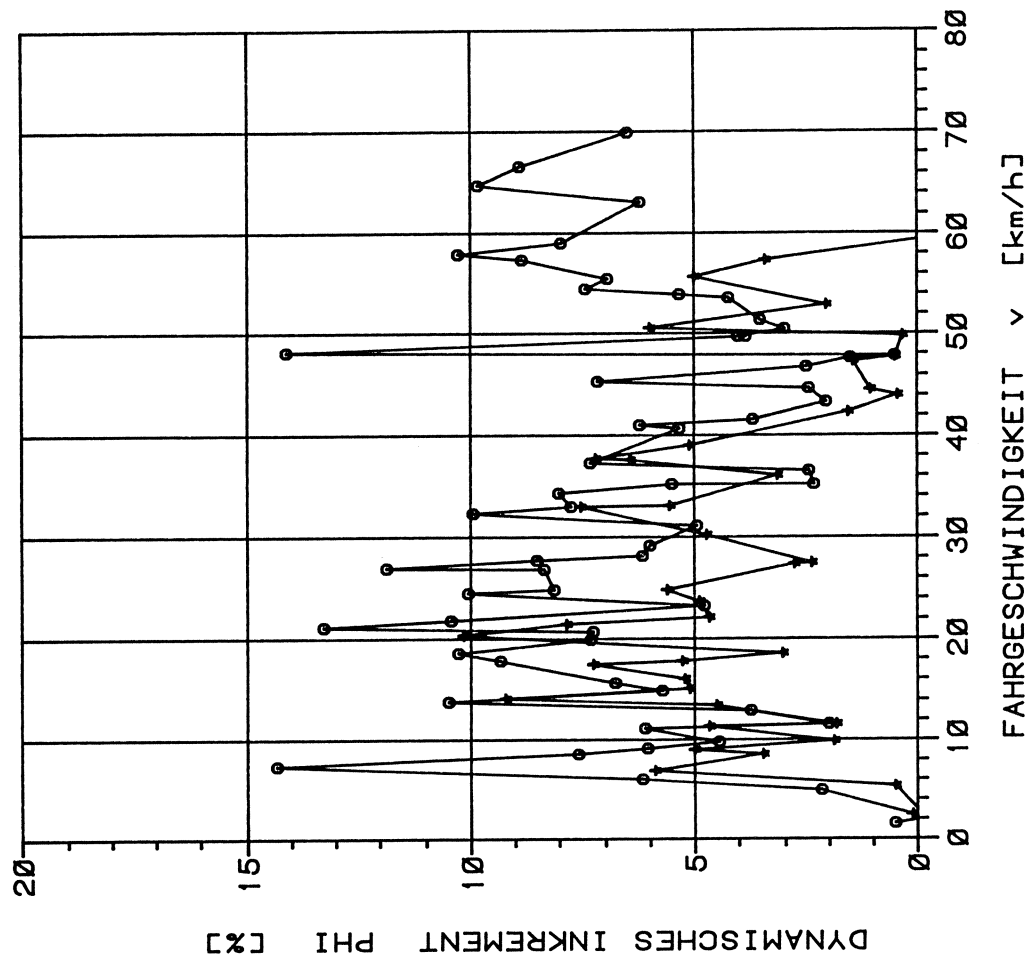
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG Ø1

MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	WG Ø1	2MH 10 K _{0A}	-4.94 MM	27.90
○—	WG Ø1	4MH 10 K _{0A}	-5.15 MM	14.86
○—	WG Ø1			49.1
○—	WG Ø1			17.2



INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	WG Ø1	2MN 10 oA	-5.05 MM	14.28
○—	WG Ø1	4MN 10 oA	-6.89 MM	10.11
○—	WG Ø1			7.3
○—	WG Ø1			20.3



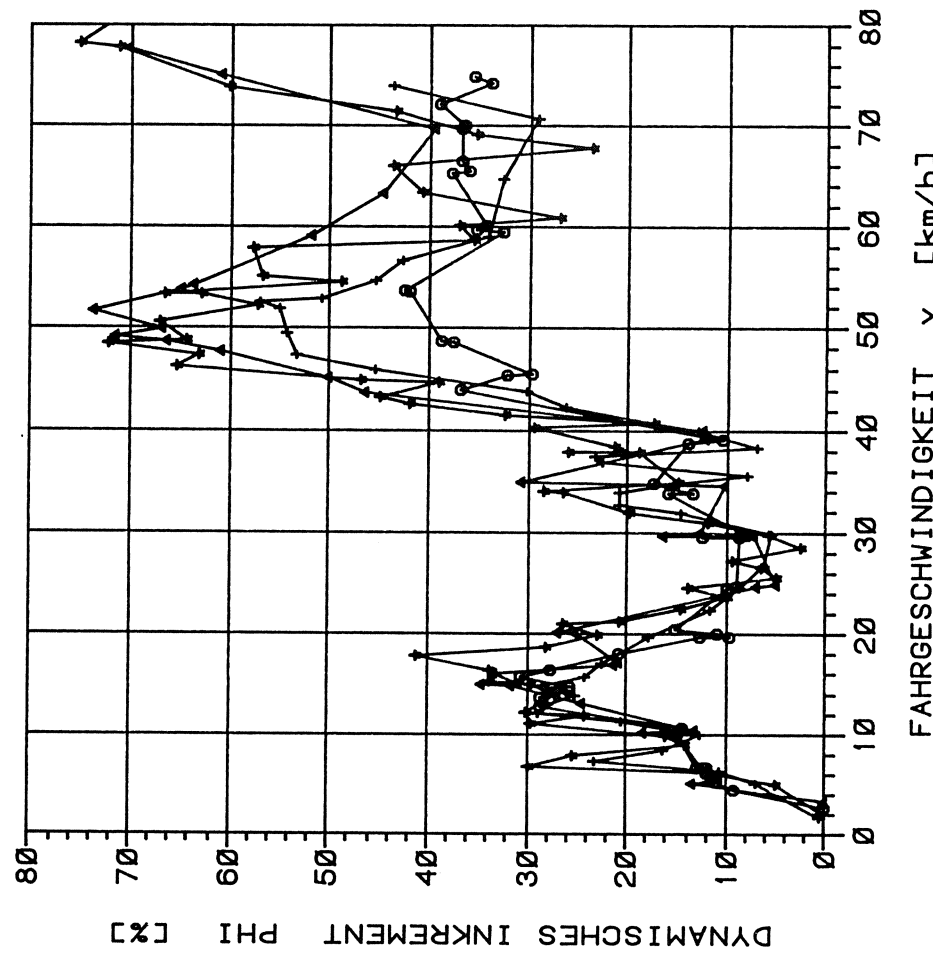
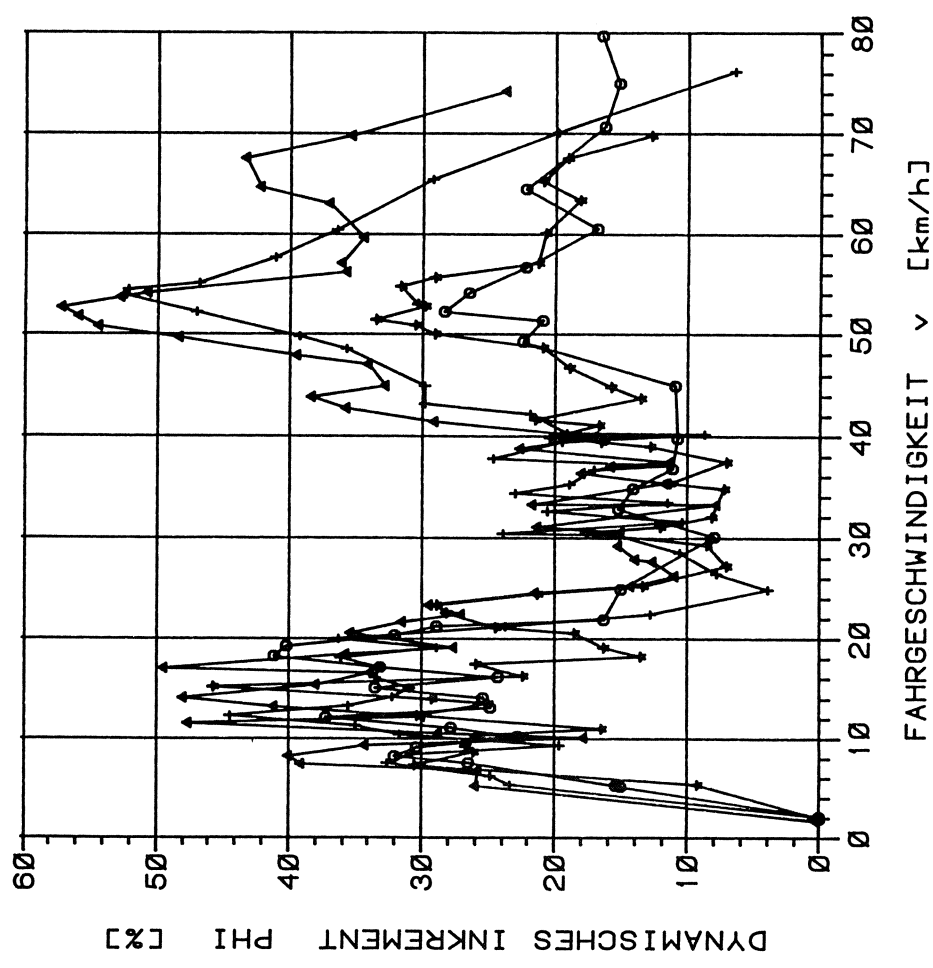
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø2

MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø2

A6.12
A6.11

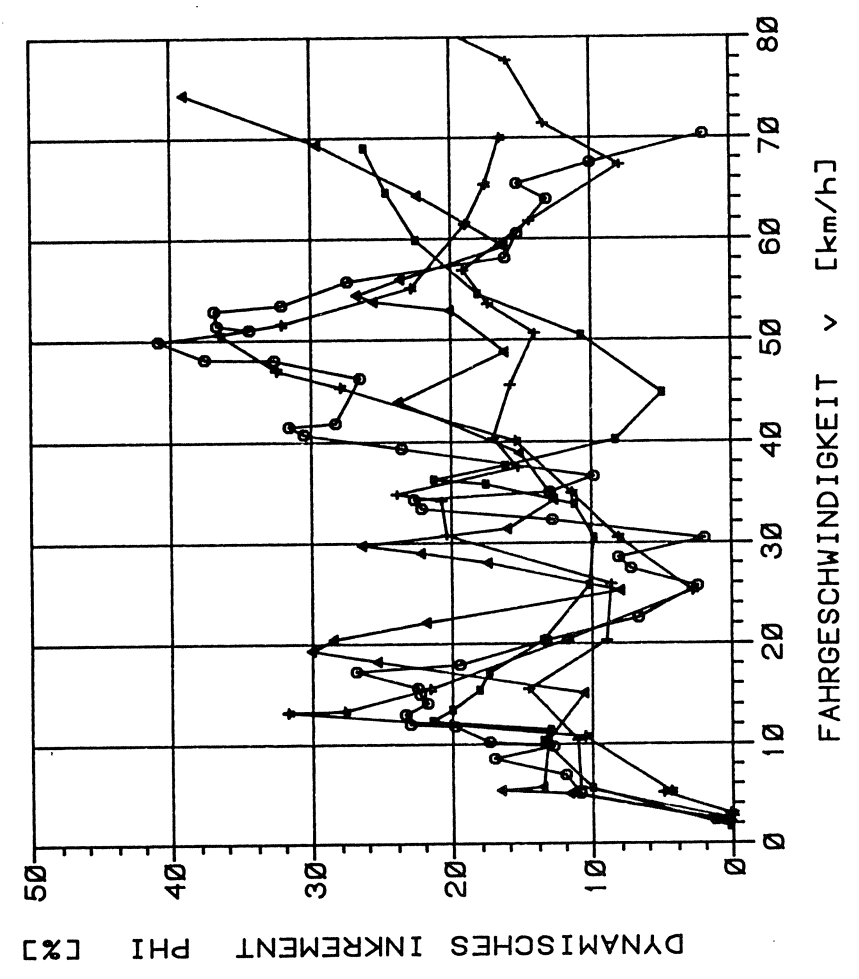
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	WG Ø2	11R 10 AoA	-1.05 MM	40.97
→	WG Ø2	12R 10 AoA	-1.03 MM	45.65
+	WG Ø2	13R 10 AoA	-1.03 MM	52.18
▲	WG Ø2	14R 10 AoA	-1.01 MM	57.10

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	WG Ø2	20R 10 AoA	-1.75 MM	42.42
→	WG Ø2	21R 10 AoA	-1.68 MM	75.14
+	WG Ø2	24R 10 AoA	-1.88 MM	56.79
▲	WG Ø2	25R 10 AoA	-1.76 MM	73.71



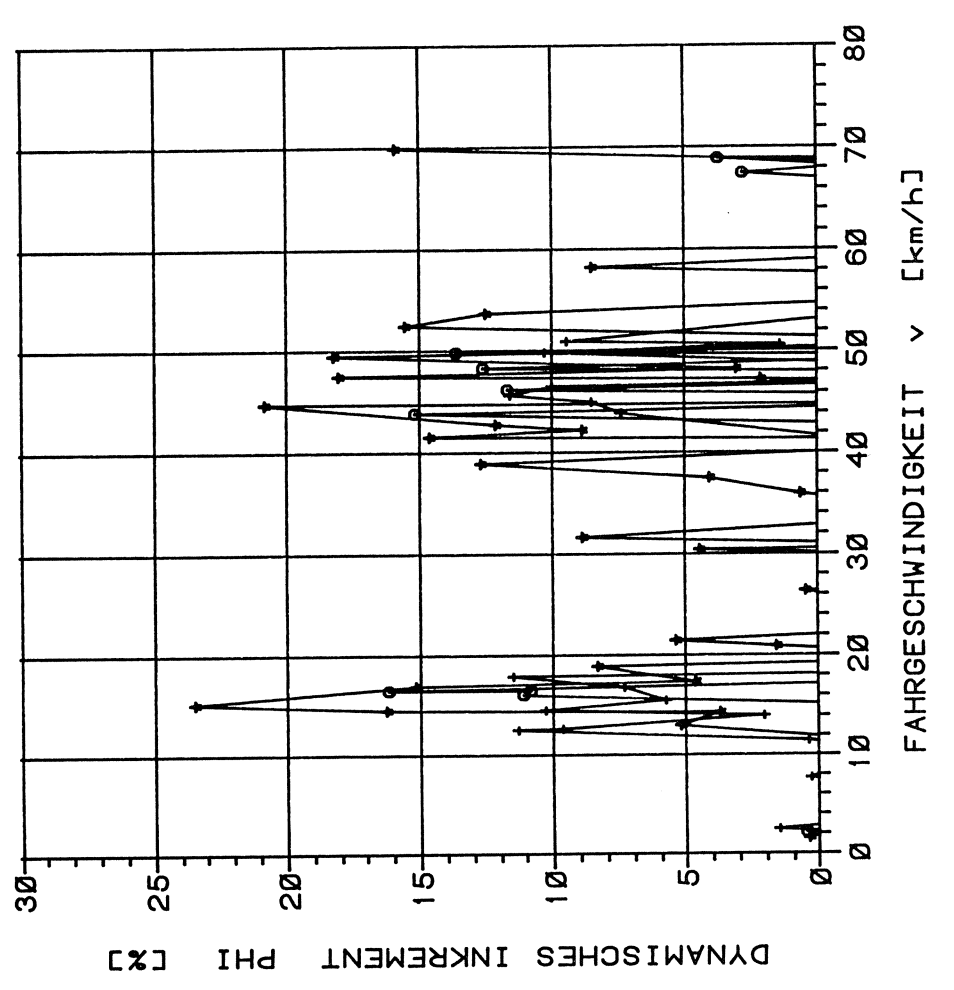
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	WG Ø2	42R 10 AoA	-1.72 MM	49.9
→—→	WG Ø2	52R 10 AoA	-2.52 MM	50.5
→—→	WG Ø2	71R 10 AoA	-1.51 MM	34.7
→—→	WG Ø2	74R 10 AoA	-1.83 MM	74.3
→—→	WG Ø2	76R 10 AoA	-2.22 MM	69.0



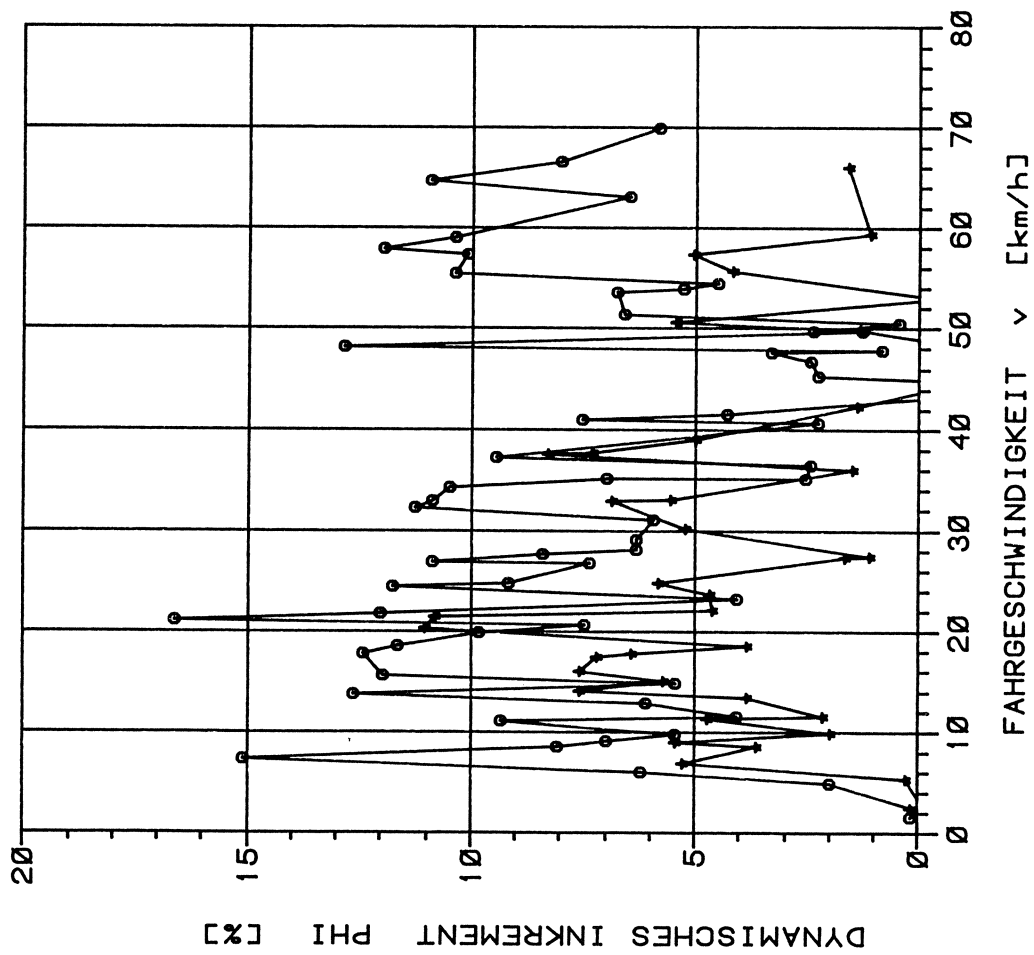
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	WG Ø2	2LH 10 AoA	-1.83 MM	16.5
→—→	WG Ø2	2MH 10 AoA	-3.21 MM	15.1
→—→	WG Ø2	4MH 10 AoA	-3.24 MM	11.53
→—→	WG Ø2	4MH 10 AoA	-3.24 MM	45.5



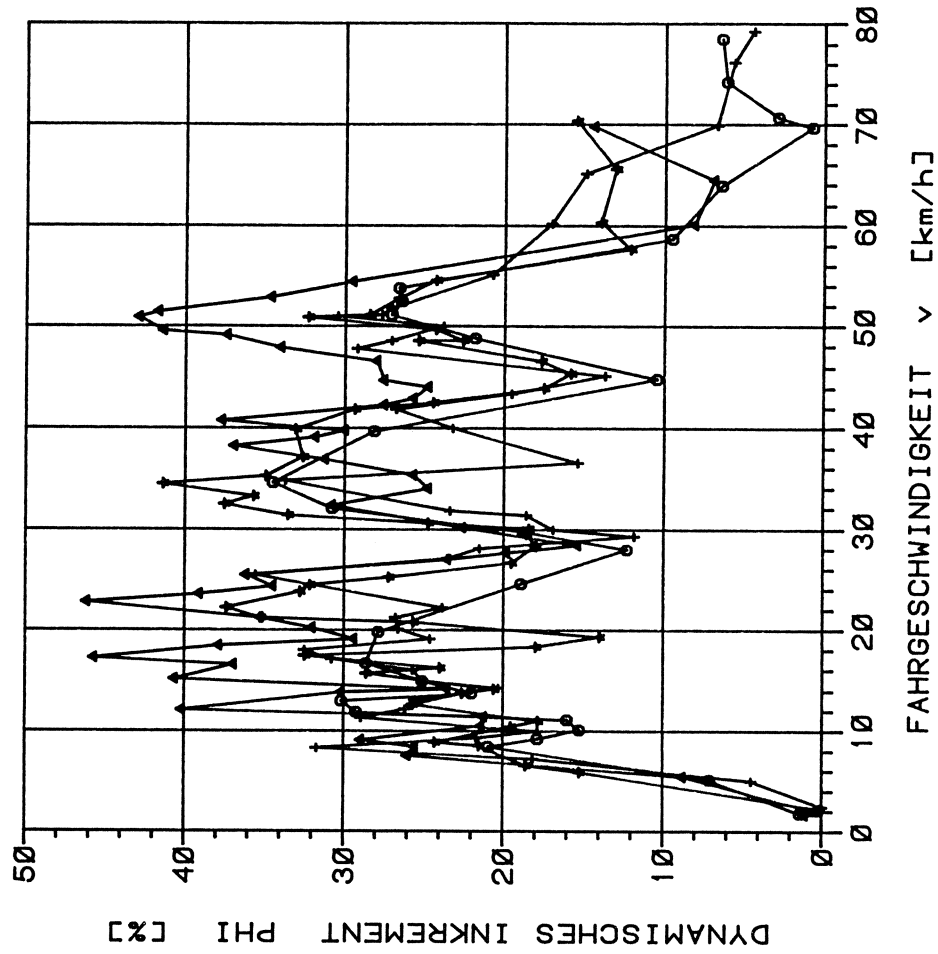
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 02

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	WG 02	2MN 10 oA	-4.11 MM	16.62
○—	WG 02	4MN 10 oA	-5.72 MM	21.1
○—	WG 02	4MN 10 oA	10.99	20.3



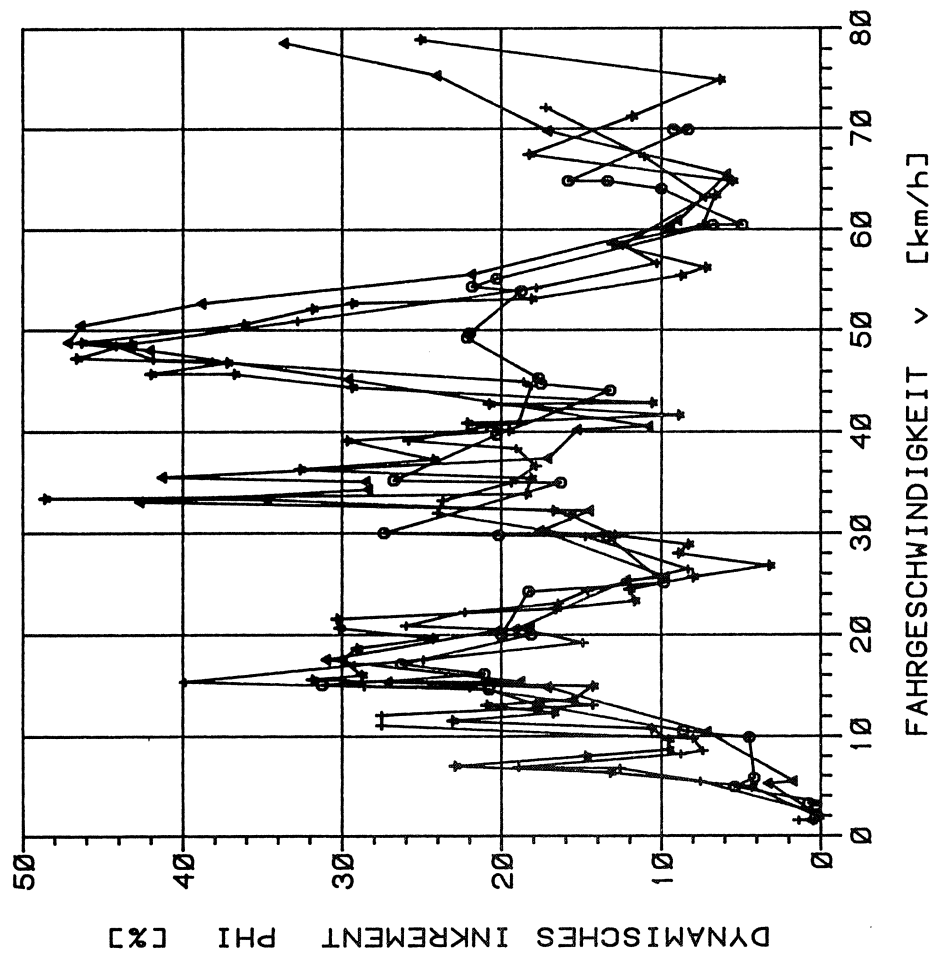
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 111

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	WG 111	11R 10 KoA	-1.31 MM	34.4
○—	WG 111	12R 10 KoA	-1.24 MM	34.4
○—	WG 111	13R 10 KoA	-1.26 MM	25.3
○—	WG 111	14R 10 KoA	-1.20 MM	22.7



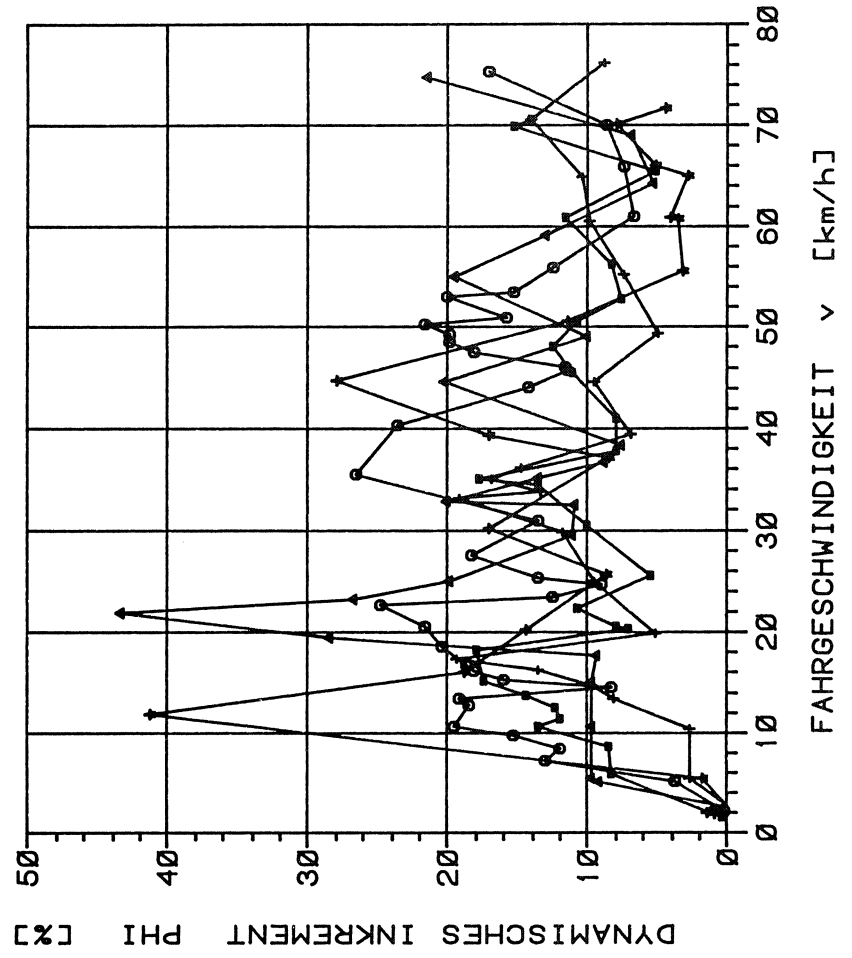
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 111

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	20R 10 KoA	-2.12 MM	31.20	15.0
+	21R 10 KoA	-2.02 MM	48.54	33.4
+	24R 10 KoA	-2.29 MM	44.12	48.4
▲	25R 10 KoA	-2.05 MM	47.03	48.8



ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 111

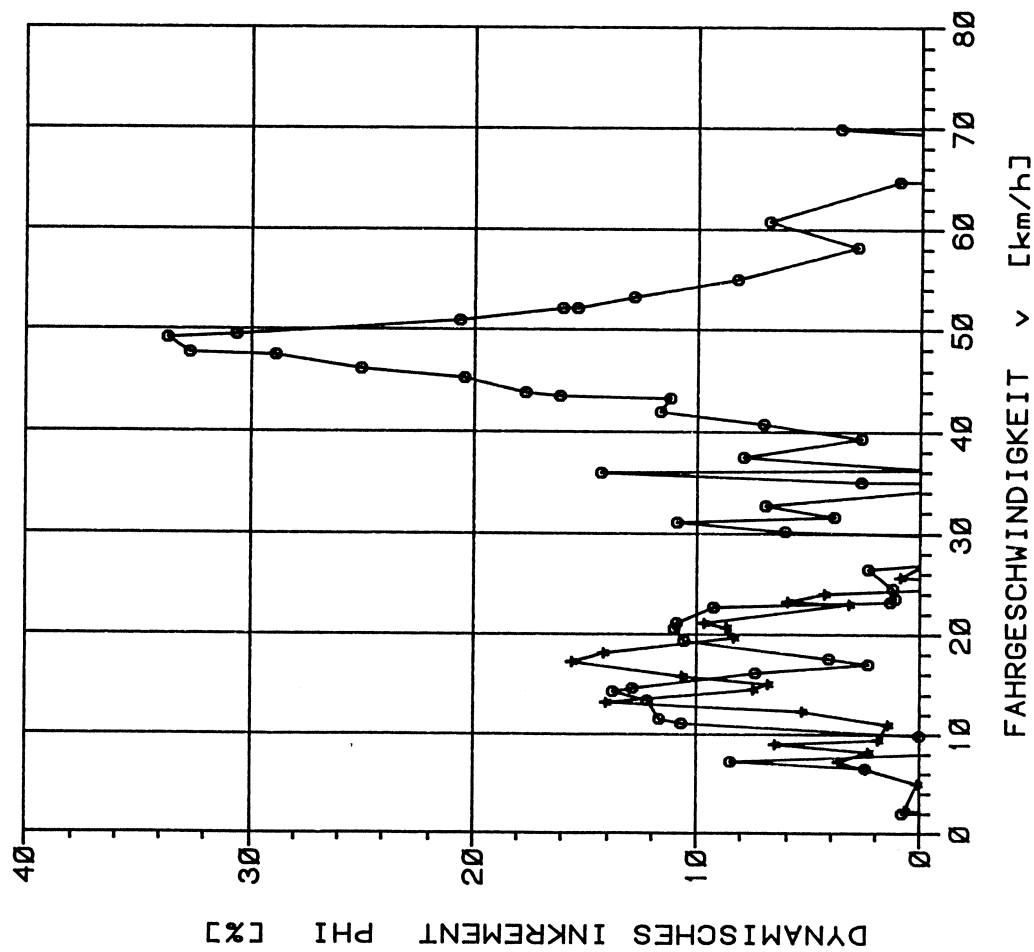
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	42R 10 KoA	-2.02 MM	26.51	35.4
+	52R 10 KoA	-3.01 MM	41.17	11.8
+	71R 10 KoA	-1.82 MM	19.22	17.3
▲	74R 10 KoA	-2.14 MM	43.41	21.8
■	76R 10 KoA	-2.62 MM	17.83	18.2



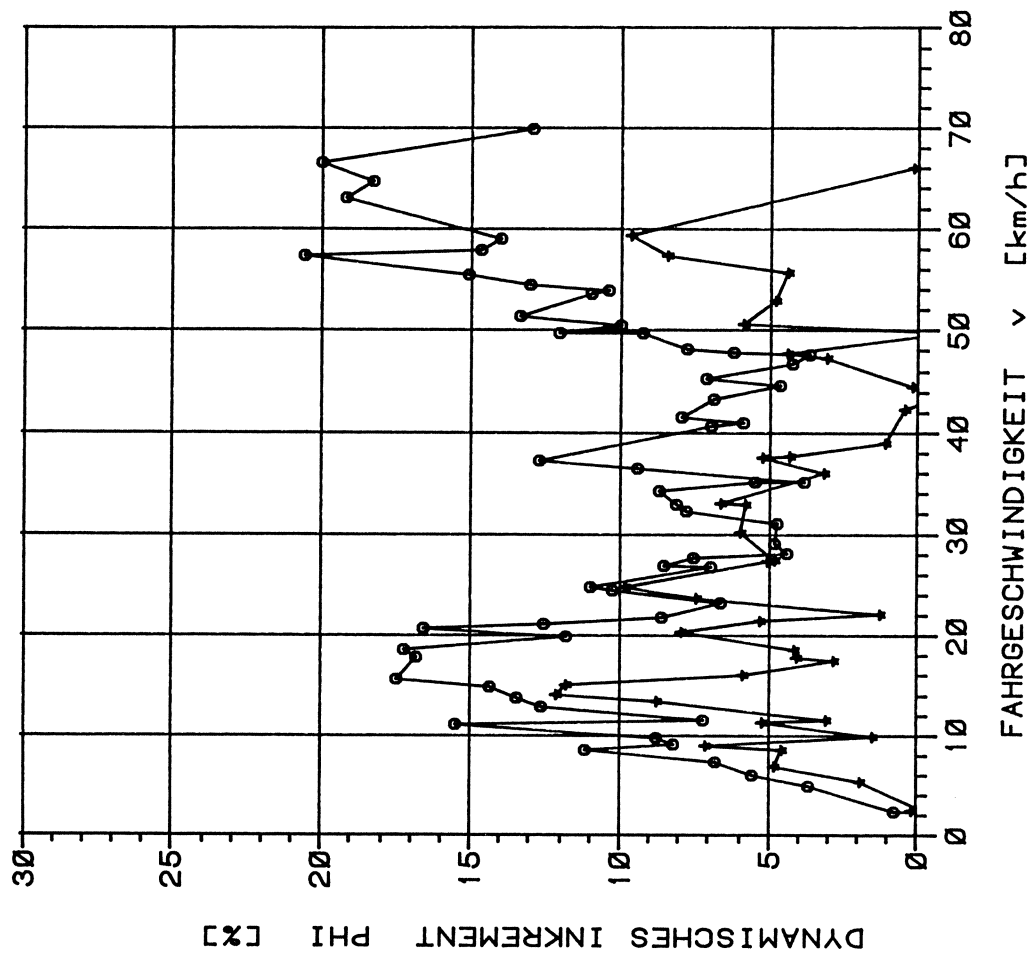
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG 111

MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 111

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	2MH 10 KoA	-3.82 MM	33.65	49.1
+	4MH 10 KoA	-4.02 MM	15.58	17.2

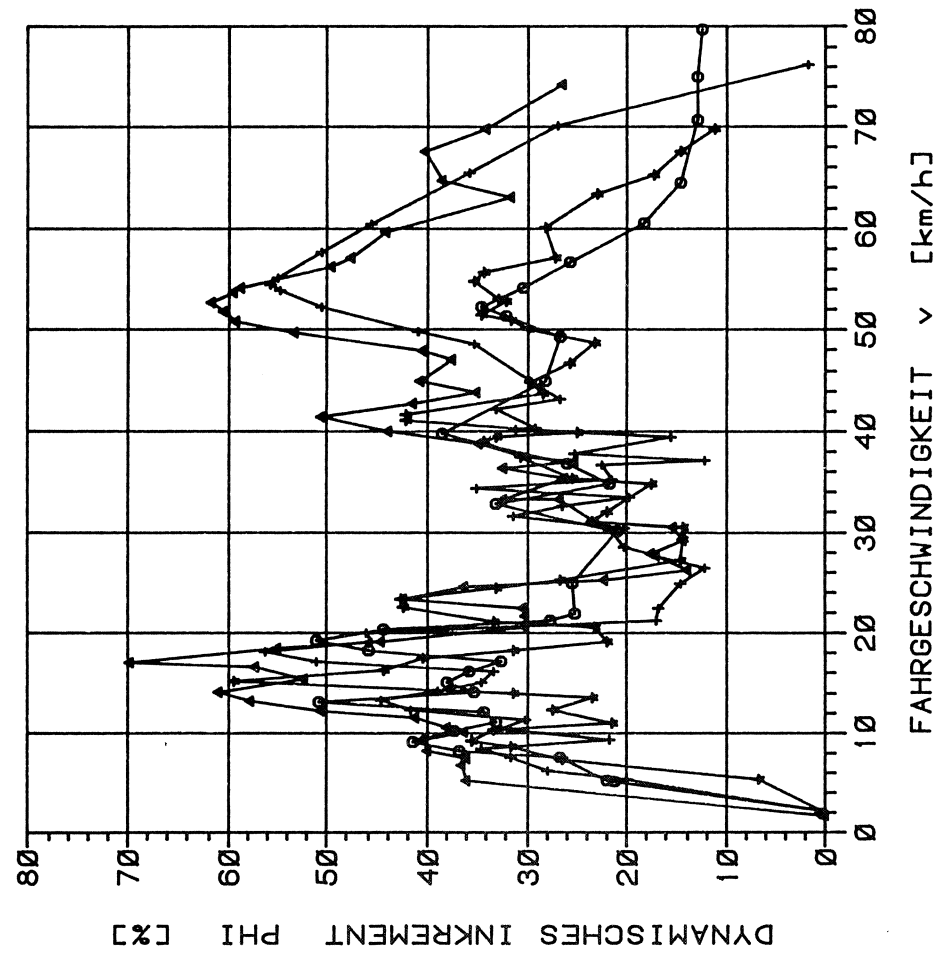


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	2MH 10 oA	-3.51 MM	20.56	57.3
+	4MH 10 oA	-5.00 MM	12.12	14.0



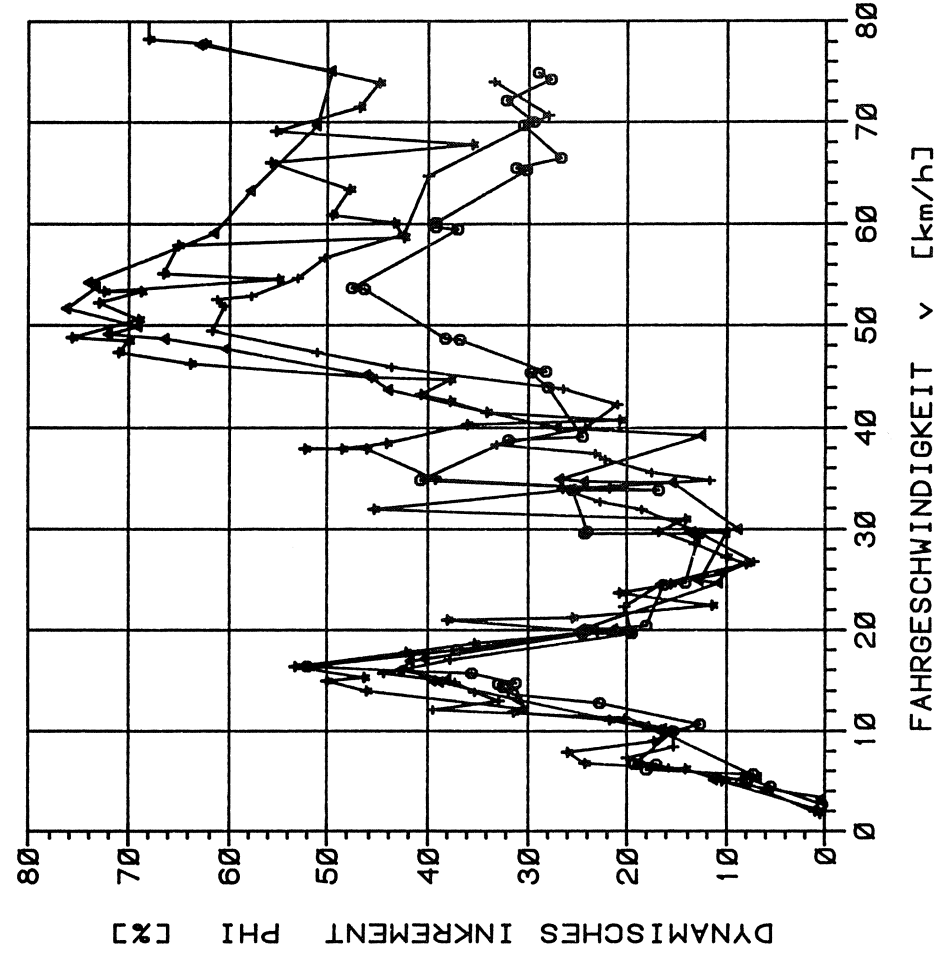
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 112

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	11R 10 AoA	-0.74 MM	50.88	19.2
↑—	12R 10 AoA	-0.74 MM	59.24	15.1
↑—	13R 10 AoA	-0.73 MM	56.22	18.1
▲—	14R 10 AoA	-0.71 MM	69.75	17.0



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 112

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	20R 10 AoA	-1.23 MM	51.83	16.3
↑—	21R 10 AoA	-1.17 MM	75.49	48.8
↑—	24R 10 AoA	-1.33 MM	61.61	49.4
▲—	25R 10 AoA	-1.25 MM	75.98	51.7

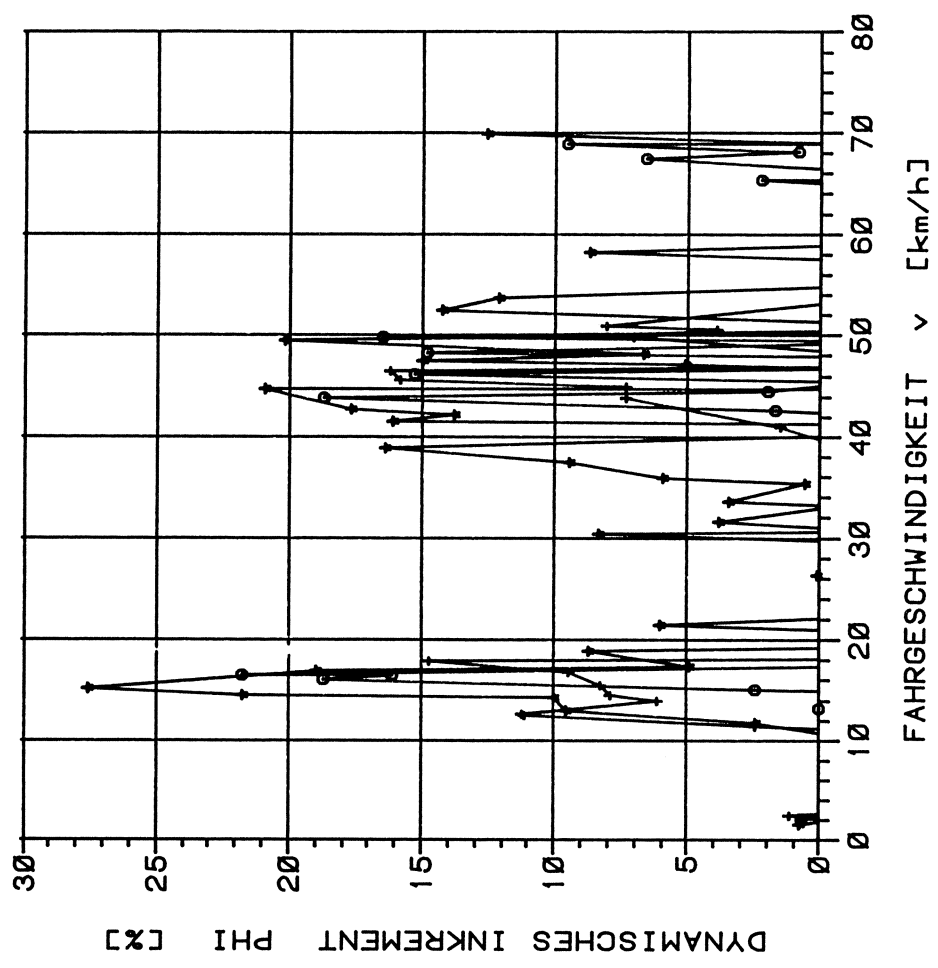
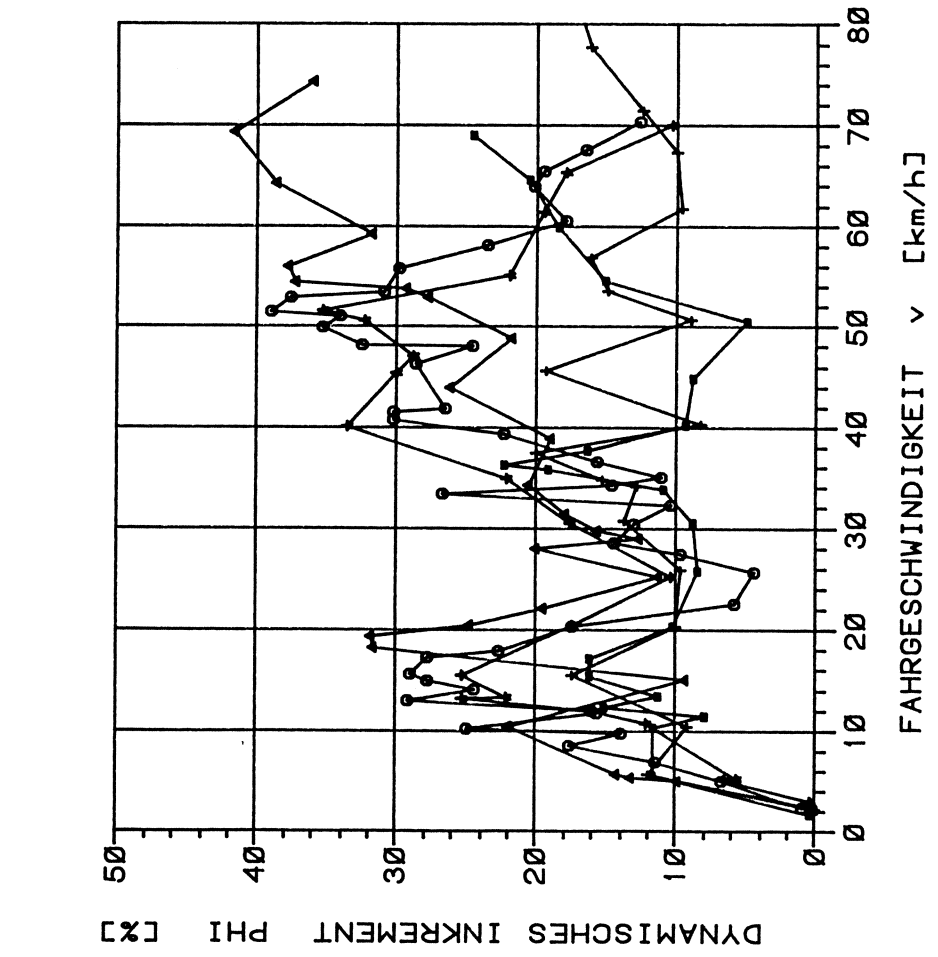


ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 112 MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG 112

A6.24
A6.23

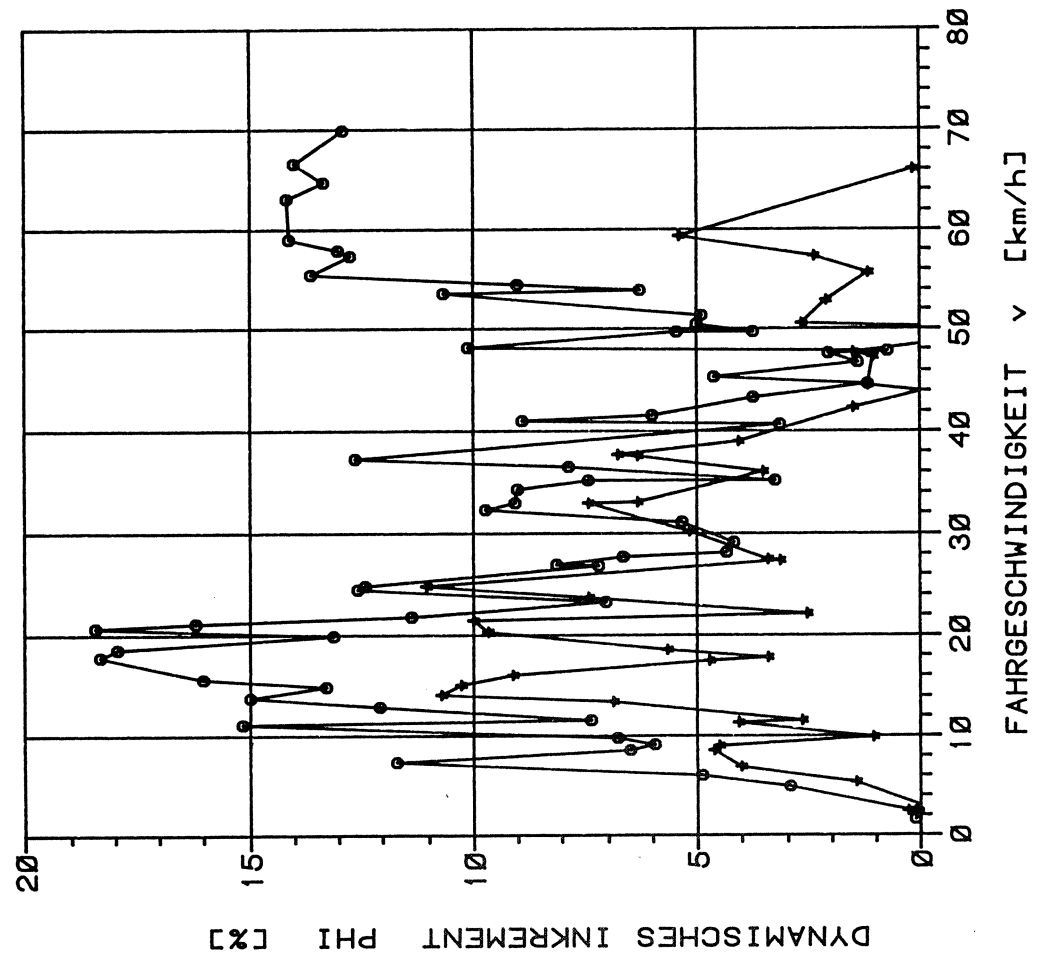
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[Σ]	BEI v=[km/h]
○	WG 112	42R 10 AoA	-1.24 MM	51.4
+	WG 112	52R 10 AoA	-1.80 MM	51.6
+	WG 112	71R 10 AoA	-1.08 MM	37.4
+	WG 112	74R 10 AoA	-1.29 MM	69.3
+	WG 112	76R 10 AoA	-1.57 MM	69.0

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[Σ]	BEI v=[km/h]
○	WG 112	2LH 10 AoA	-1.31 MM	21.65
+	WG 112	2MH 10 AoA	-2.33 MM	27.47
+	WG 112	4MH 10 AoA	-2.38 MM	46.4



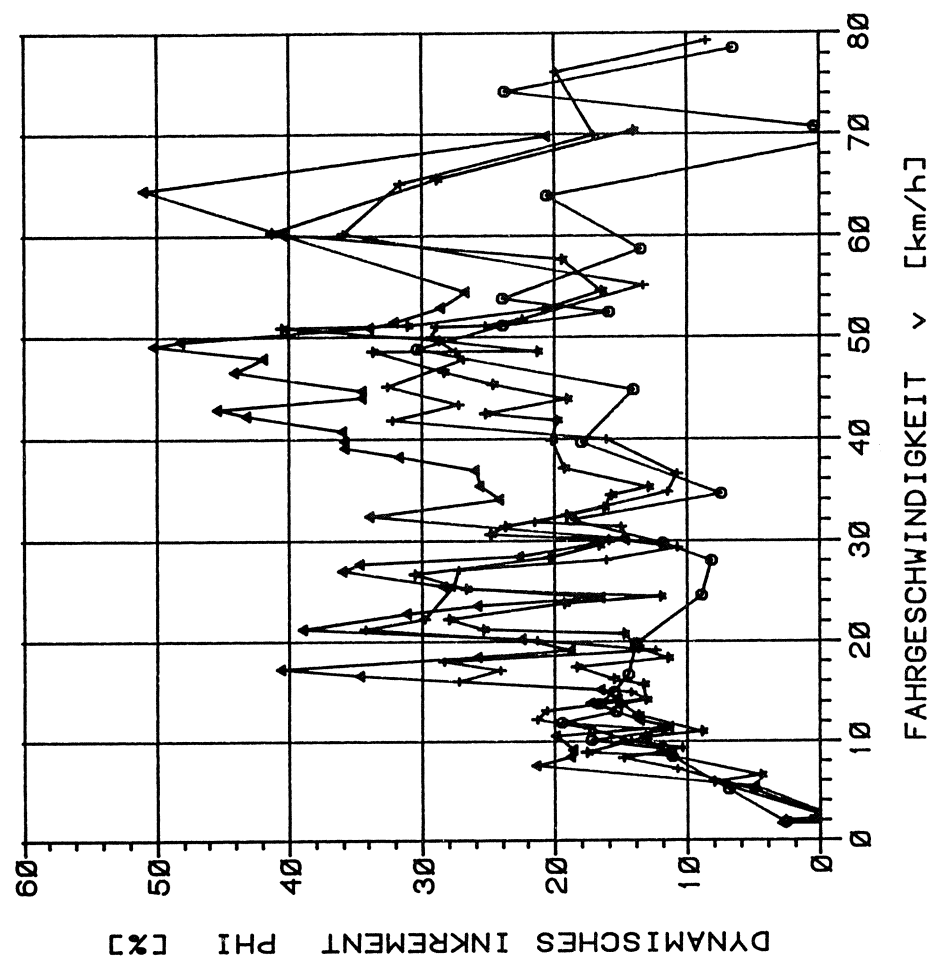
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 112

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 112	2MN 10 oA	-2.93 MM	18.42	20.7
WG 112	4MN 10 oA	-4.22 MM	10.99	24.8



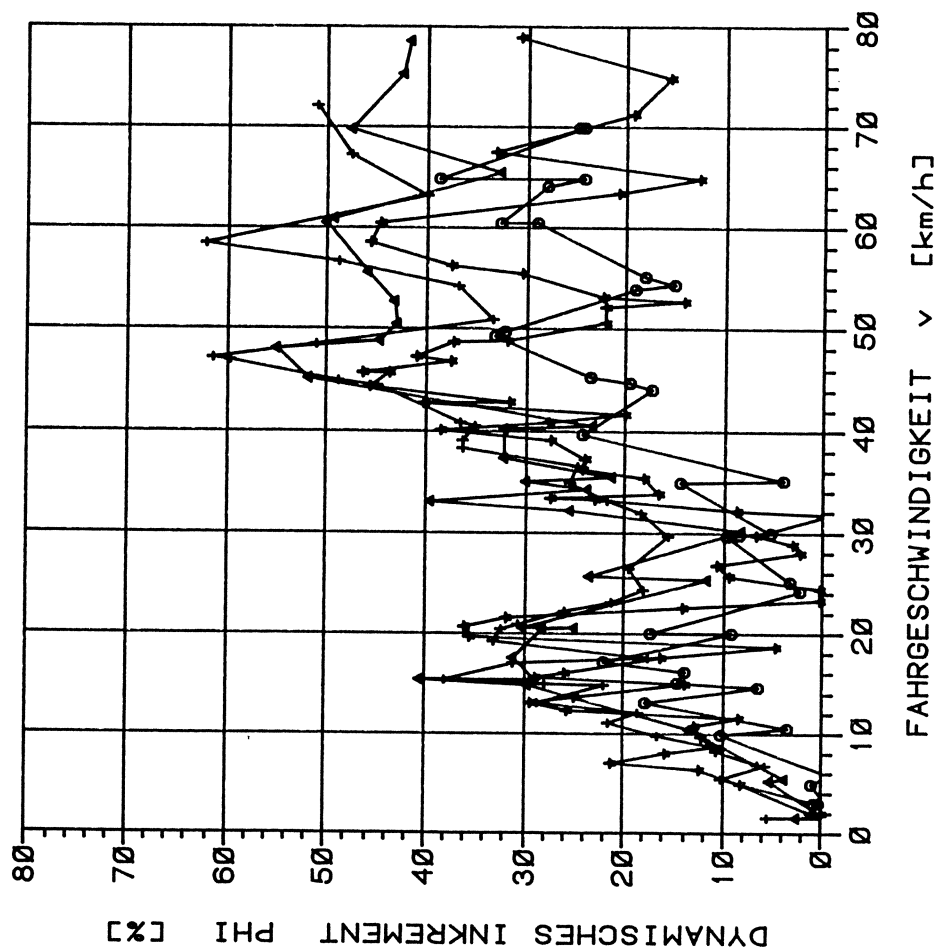
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 101

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 101	11R 10 KoA	-.53 MM	30.31	48.8
WG 101	12R 10 KoA	-.51 MM	41.26	60.2
WG 101	13R 10 KoA	-.51 MM	35.77	60.2
WG 101	14R 10 KoA	-.47 MM	50.75	64.5



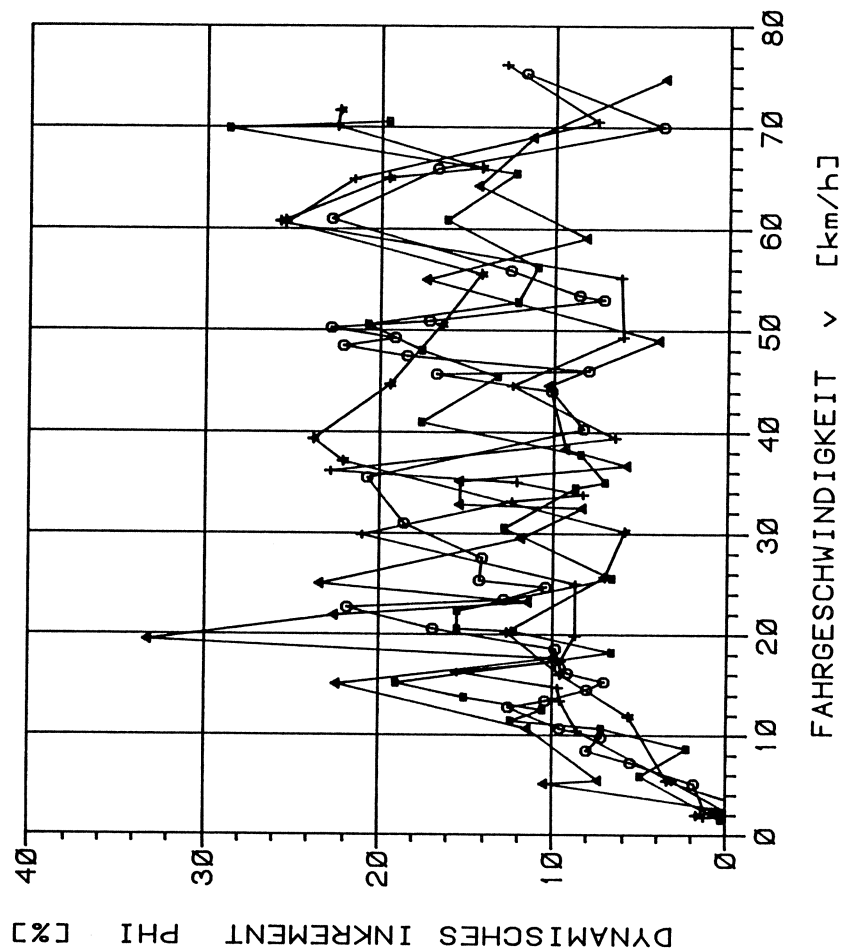
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 101

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
○	WG 101	20R 10 KoA	-0.89 MM
+	WG 101	21R 10 KoA	-0.82 MM
+	WG 101	24R 10 KoA	-0.88 MM
+	WG 101	25R 10 KoA	-0.78 MM



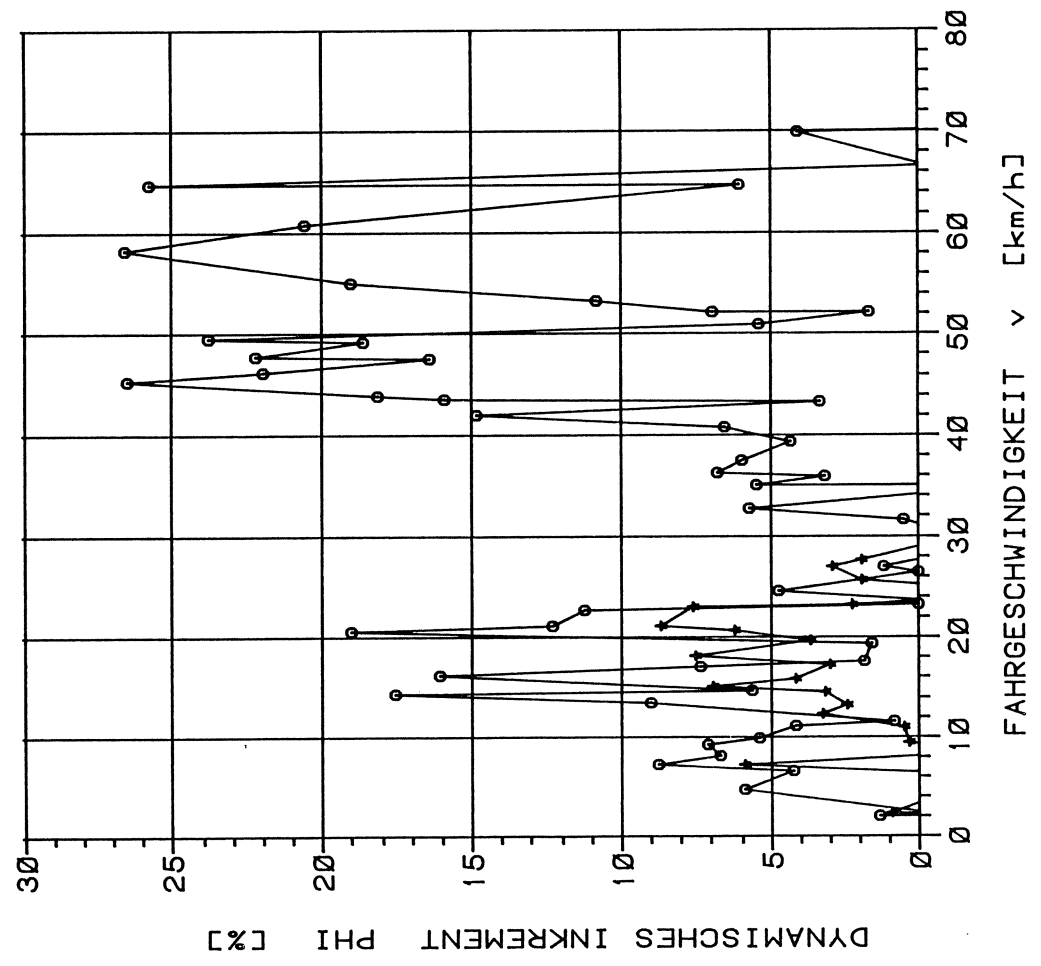
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 101

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
○	WG 101	42R 10 KoA	-0.80 MM
+	WG 101	52R 10 KoA	-1.18 MM
+	WG 101	71R 10 KoA	-0.71 MM
+	WG 101	74R 10 KoA	-0.82 MM
+	WG 101	76R 10 KoA	-1.01 MM



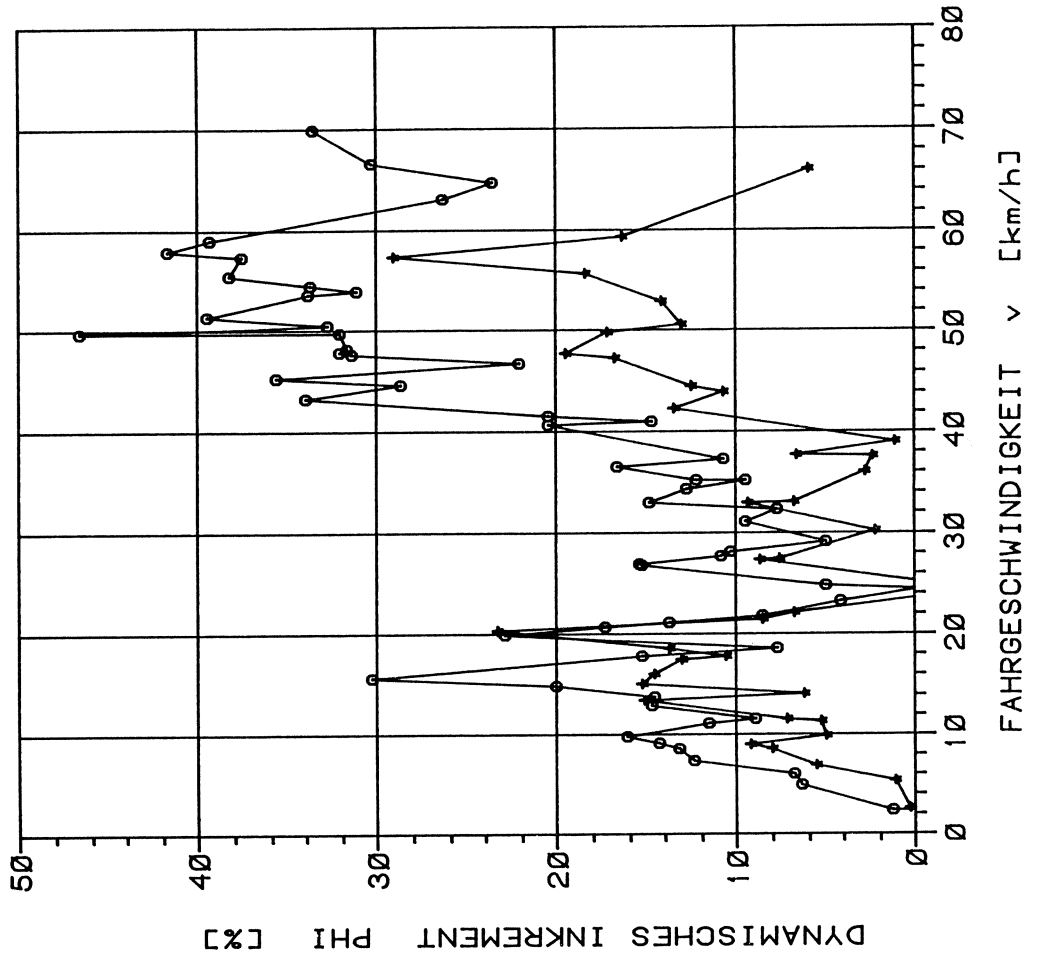
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG 101

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	2MH 10 KoA	-1.51 MM	26.56	58.1
→	4MH 10 KoA	-1.80 MM	8.64	21.1



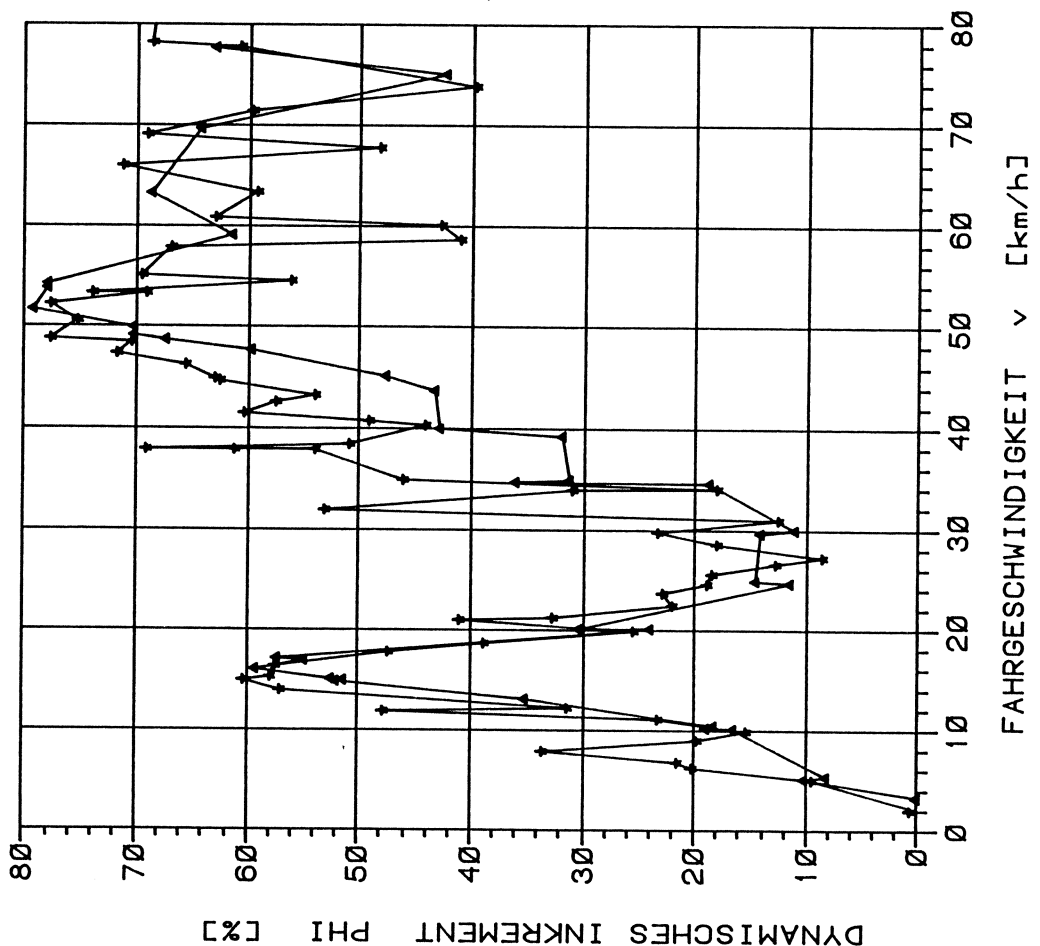
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 101

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	2MN 10 oA	-1.06 MM	46.51	49.6
→	4MN 10 oA	-1.58 MM	29.05	57.3



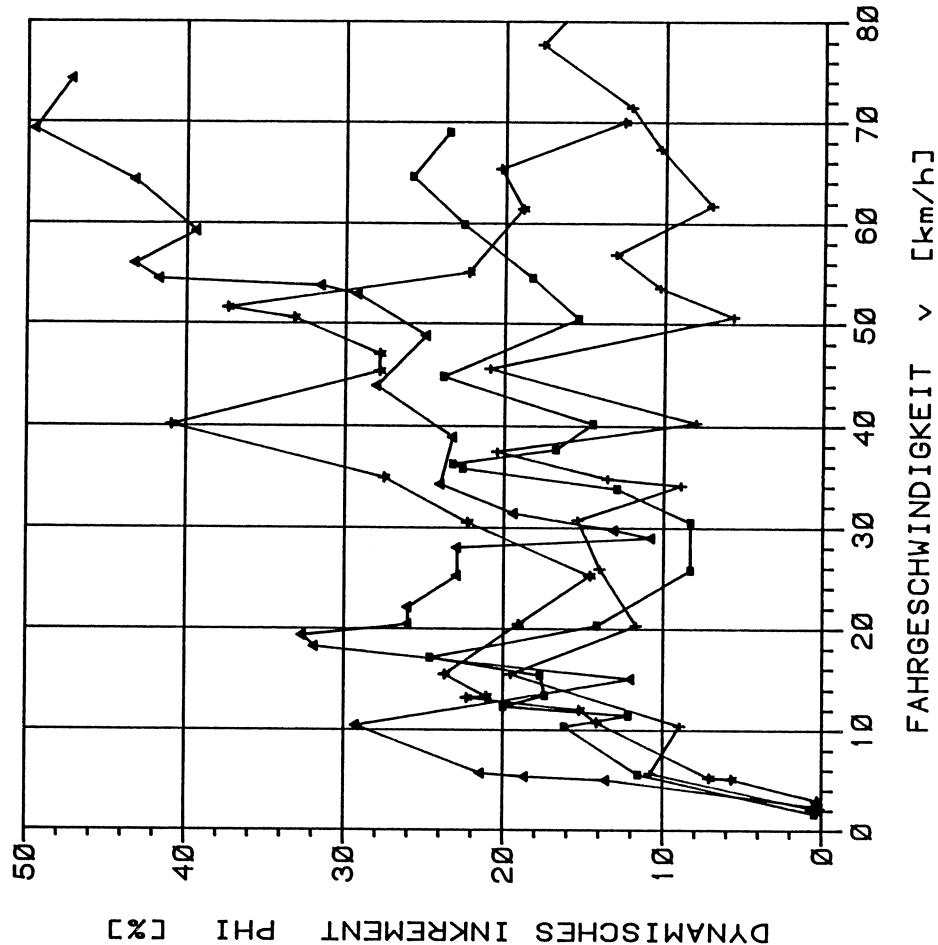
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 102

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
→	WG 102	21R 10 AoA	-0.23 MM	77.67
→	WG 102	25R 10 AoA	-0.25 MM	79.03



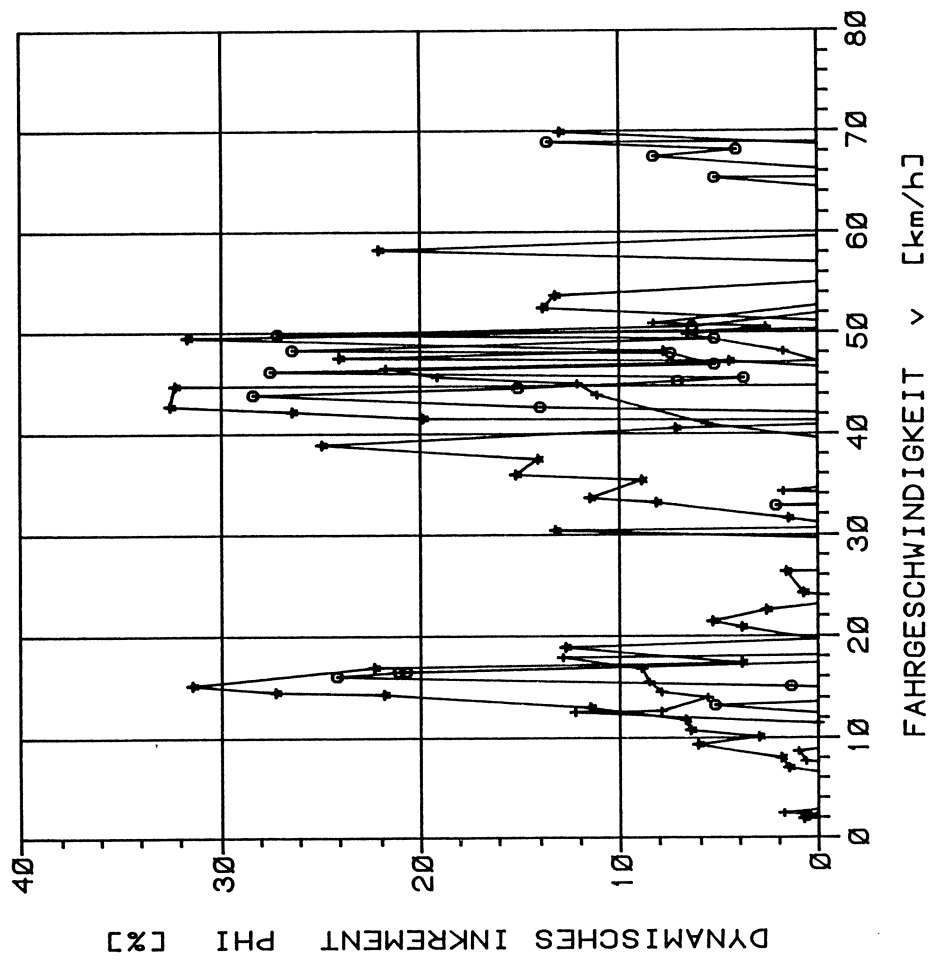
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 102

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
→	WG 102	52R 10 AoA	-0.35 MM	40.85
→	WG 102	71R 10 AoA	-0.22 MM	20.92
→	WG 102	74R 10 AoA	-0.26 MM	49.51
→	WG 102	76R 10 AoA	-0.31 MM	25.85



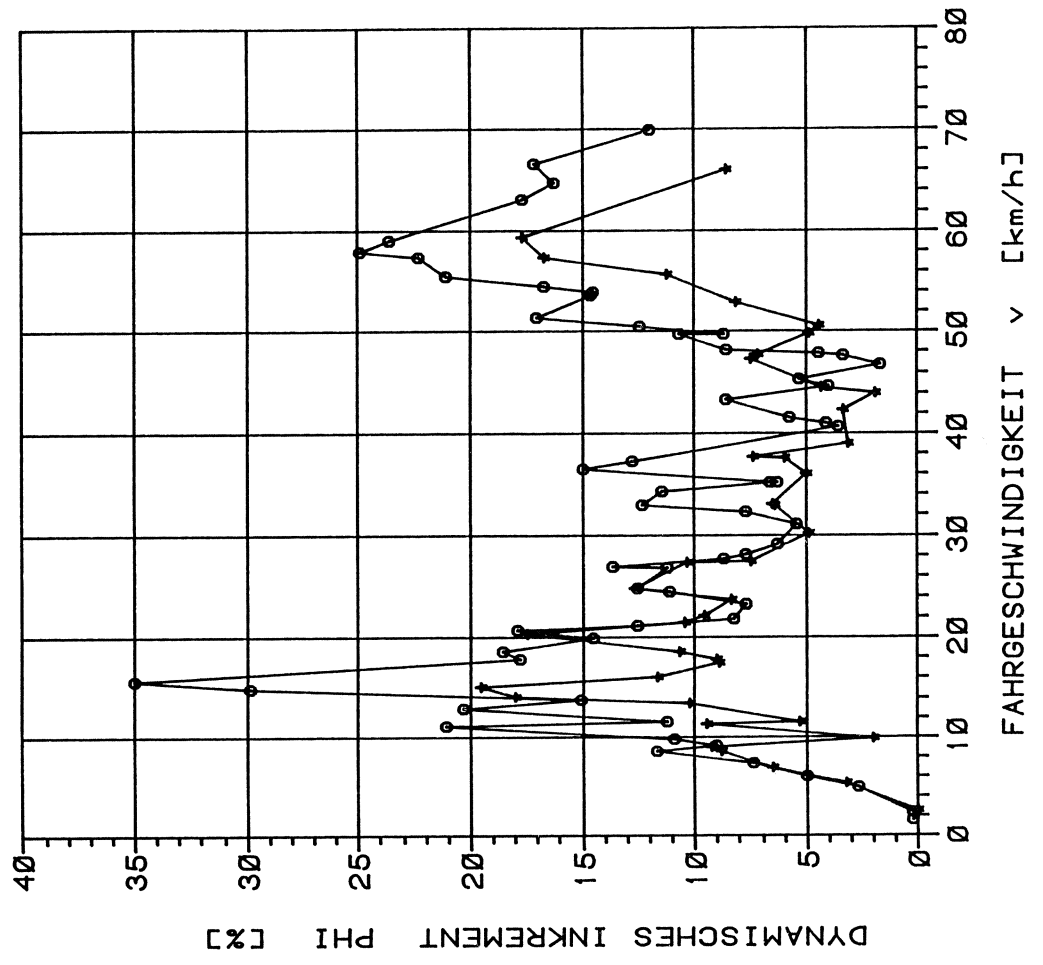
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG 102

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 102	2LH 10 AoA	-0.26 MM	43.8
+	WG 102	2MH 10 AoA	-0.46 MM	42.7
+	WG 102	4MH 10 AoA	-0.51 MM	46.4



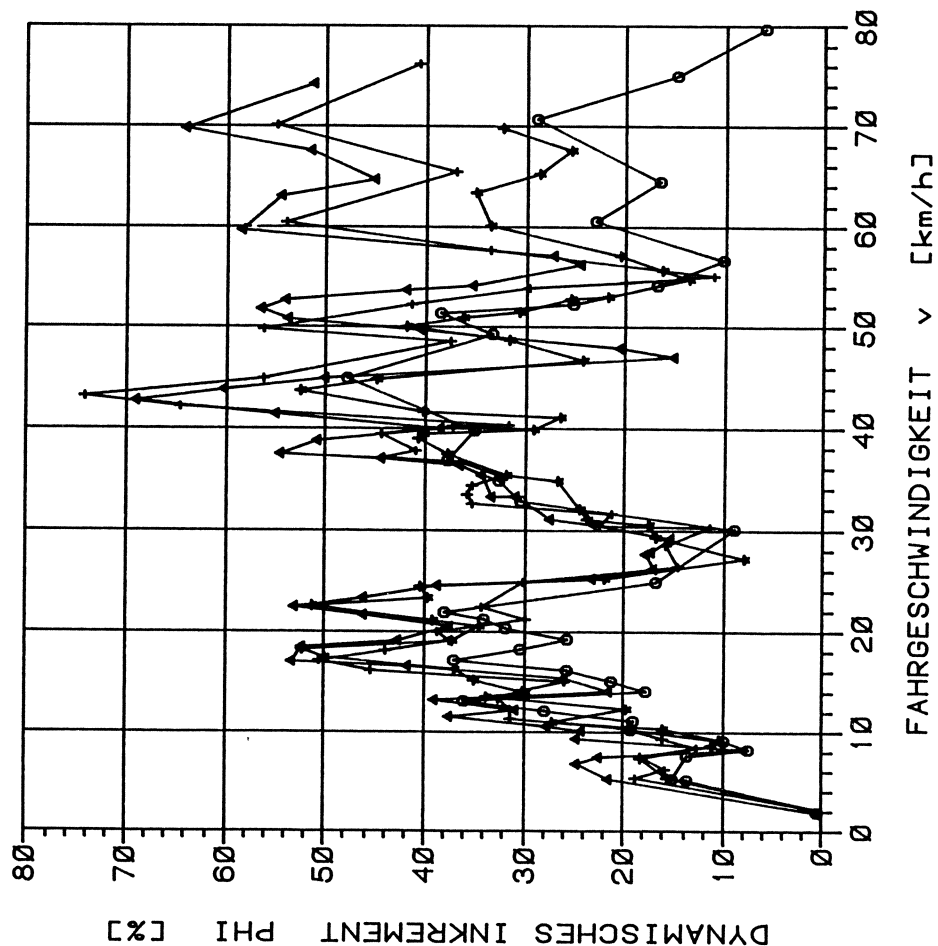
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 102

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 102	2MN 10 oA	-0.67 MM	34.99
+	WG 102	4MN 10 oA	-0.98 MM	19.55



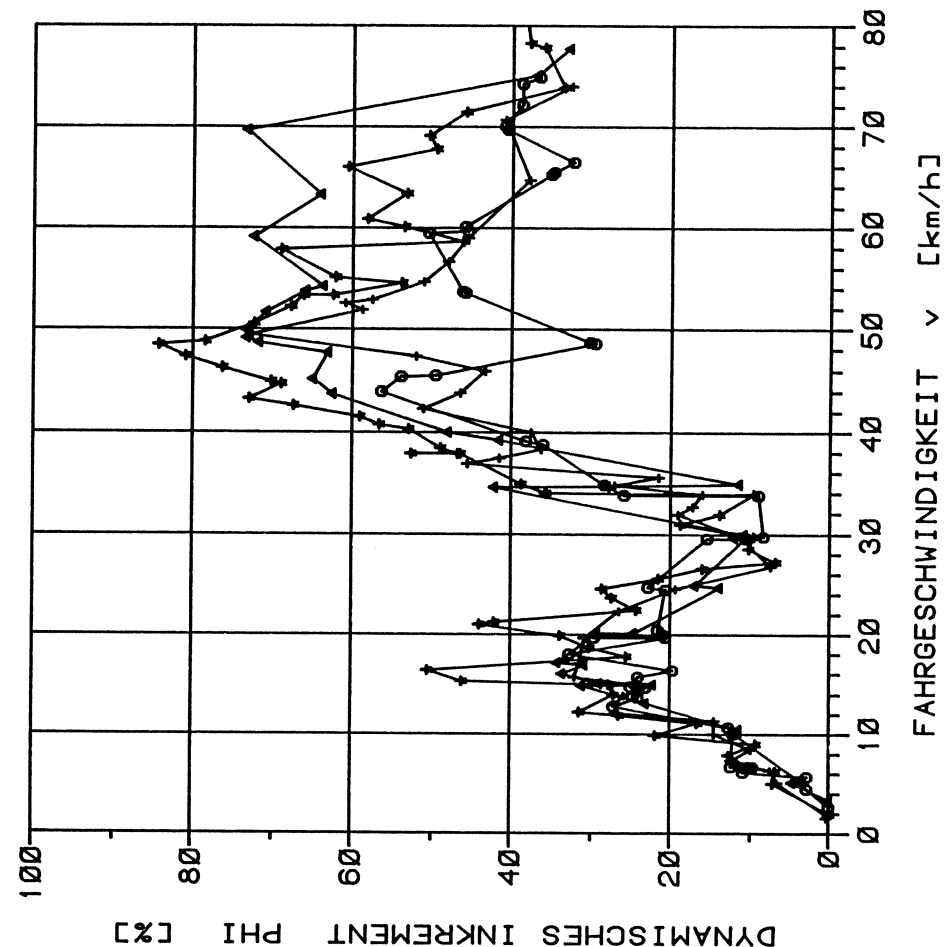
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 1Ø BAR, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	11R 1Ø AoA	-1.12 MM	47.72
+	WG 22	12R 1Ø AoA	-1.11 MM	52.43
+	WG 22	13R 1Ø AoA	-1.1Ø MM	74.15
+	WG 22	14R 1Ø AoA	-1.Ø8 MM	68.81



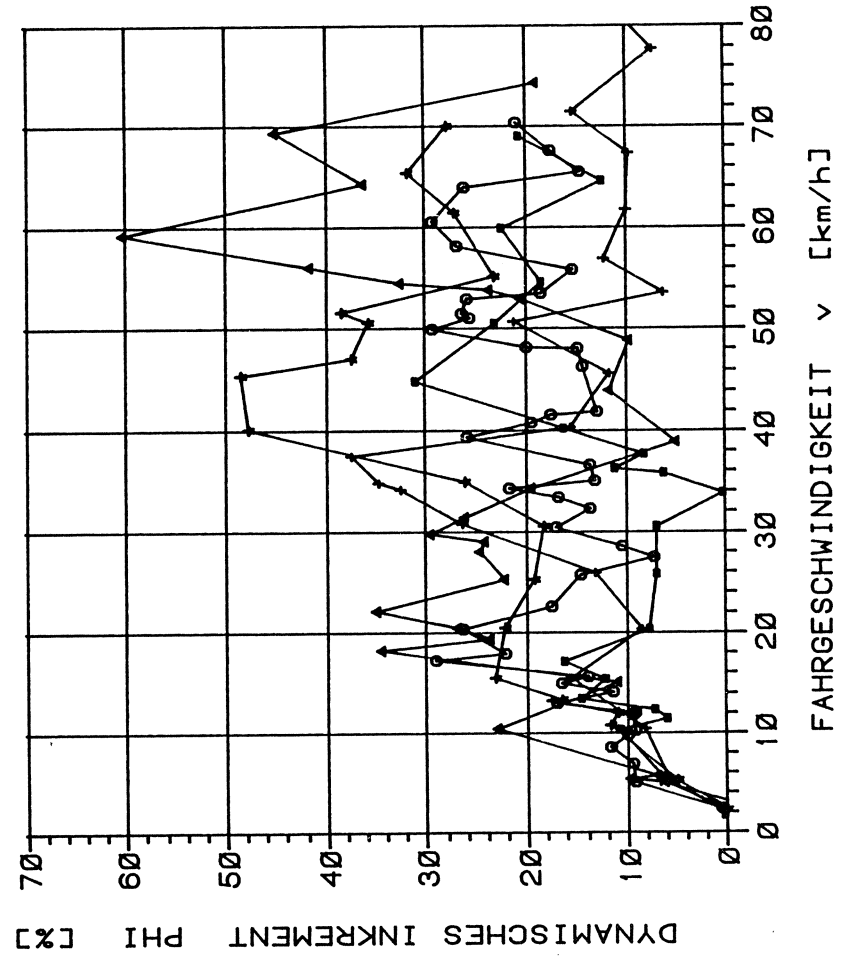
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 1Ø BAR, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	2ØR 1Ø AoA	-1.83 MM	56.26
+	WG 22	21R 1Ø AoA	-1.77 MM	84.16
+	WG 22	24R 1Ø AoA	-2.ØØ MM	72.71
+	WG 22	25R 1Ø AoA	-1.87 MM	73.25



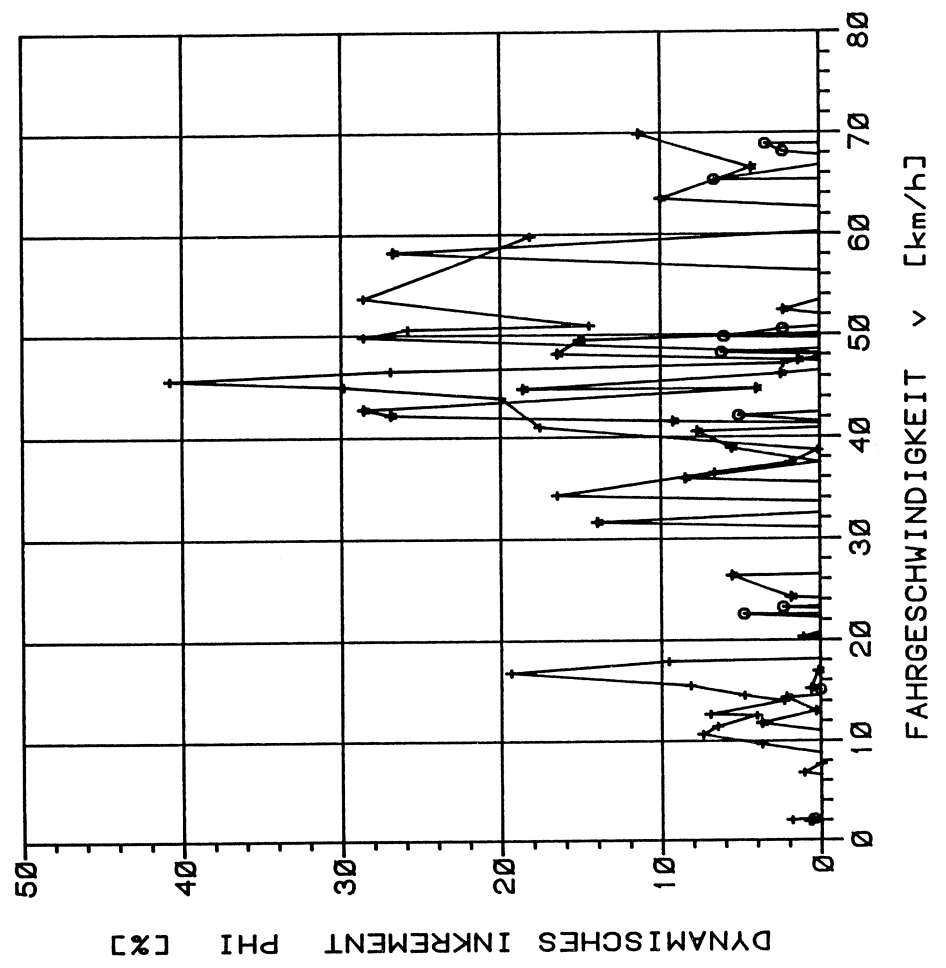
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	42R 10 AoA	-1.82 MM	29.35
+	WG 22	52R 10 AoA	-2.65 MM	48.30
+	WG 22	71R 10 AoA	-1.61 MM	37.24
+	WG 22	74R 10 AoA	-1.91 MM	60.11
+	WG 22	76R 10 AoA	-2.37 MM	31.00



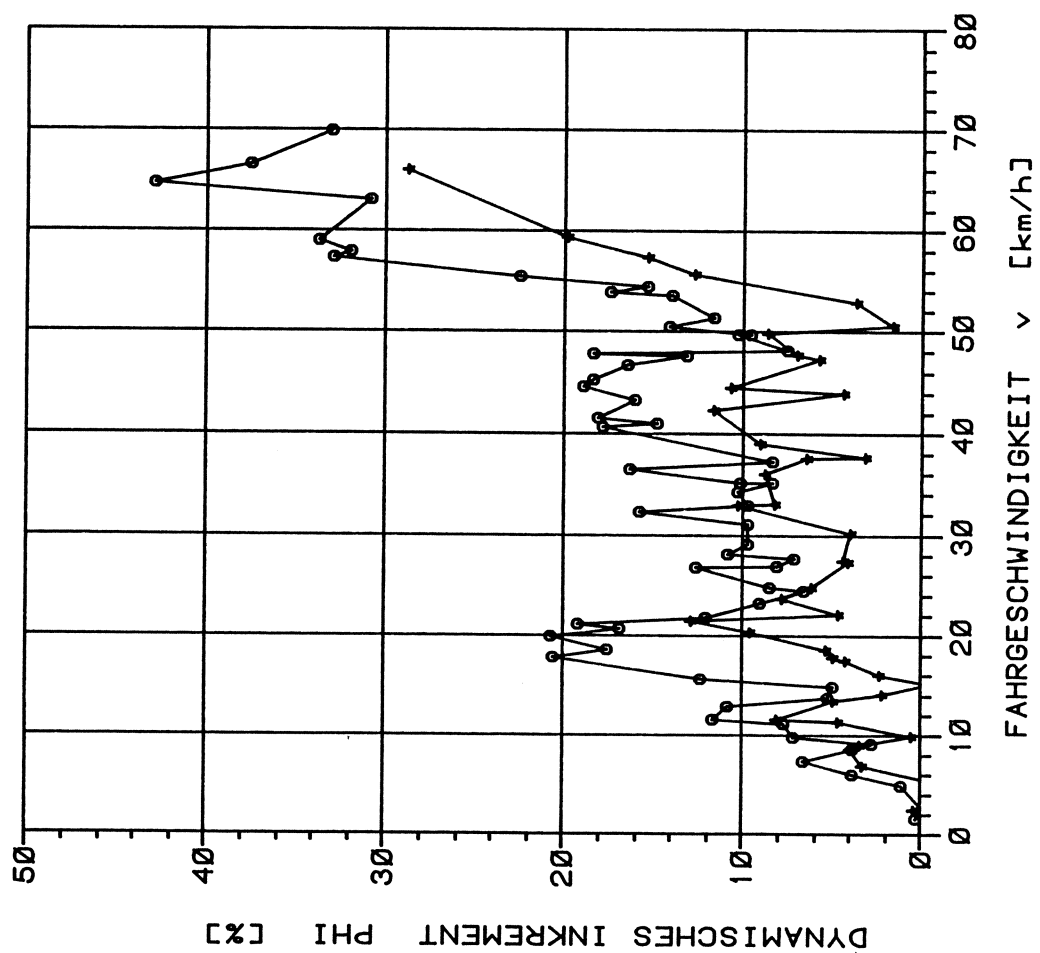
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	2LH 10 AoA	-1.96 MM	6.67
+	WG 22	2MH 10 AoA	-3.36 MM	28.61
+	WG 22	4MH 10 AoA	-3.11 MM	40.74



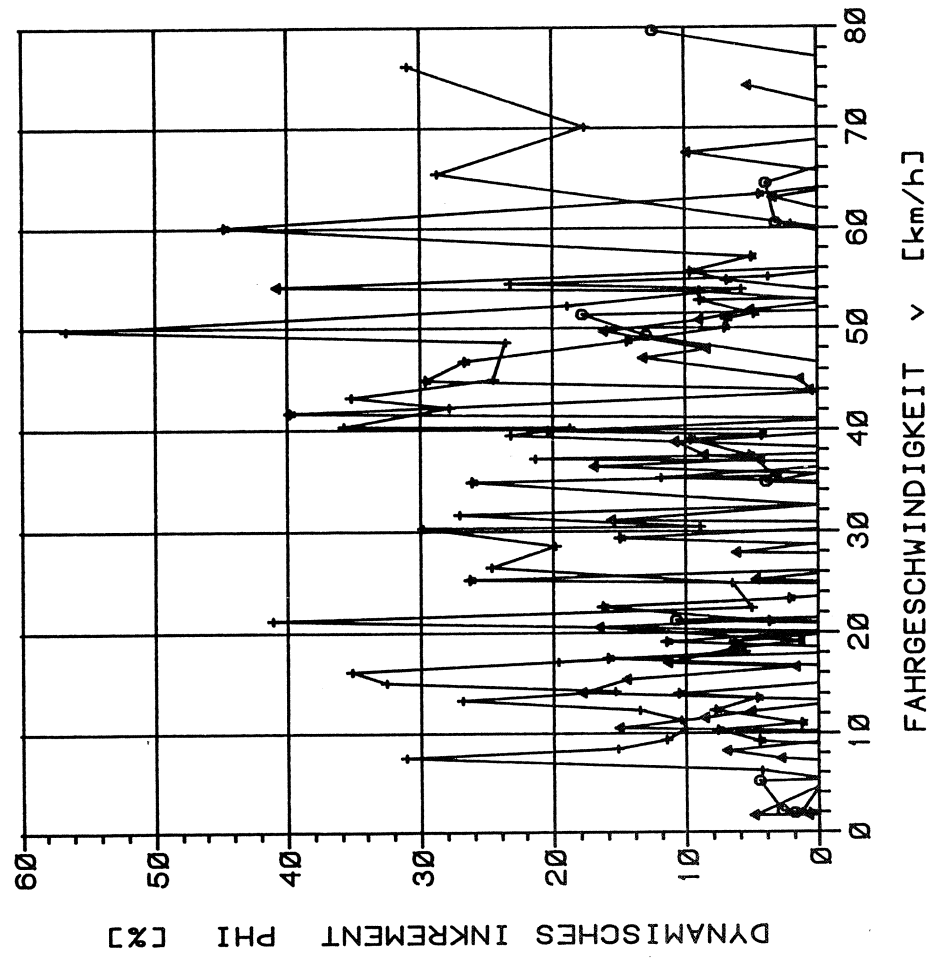
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	2MN 10 oA	-4.30 MM	42.93
+	WG 22	4MN 10 oA	-5.84 MM	28.74
				64.7
				66.0



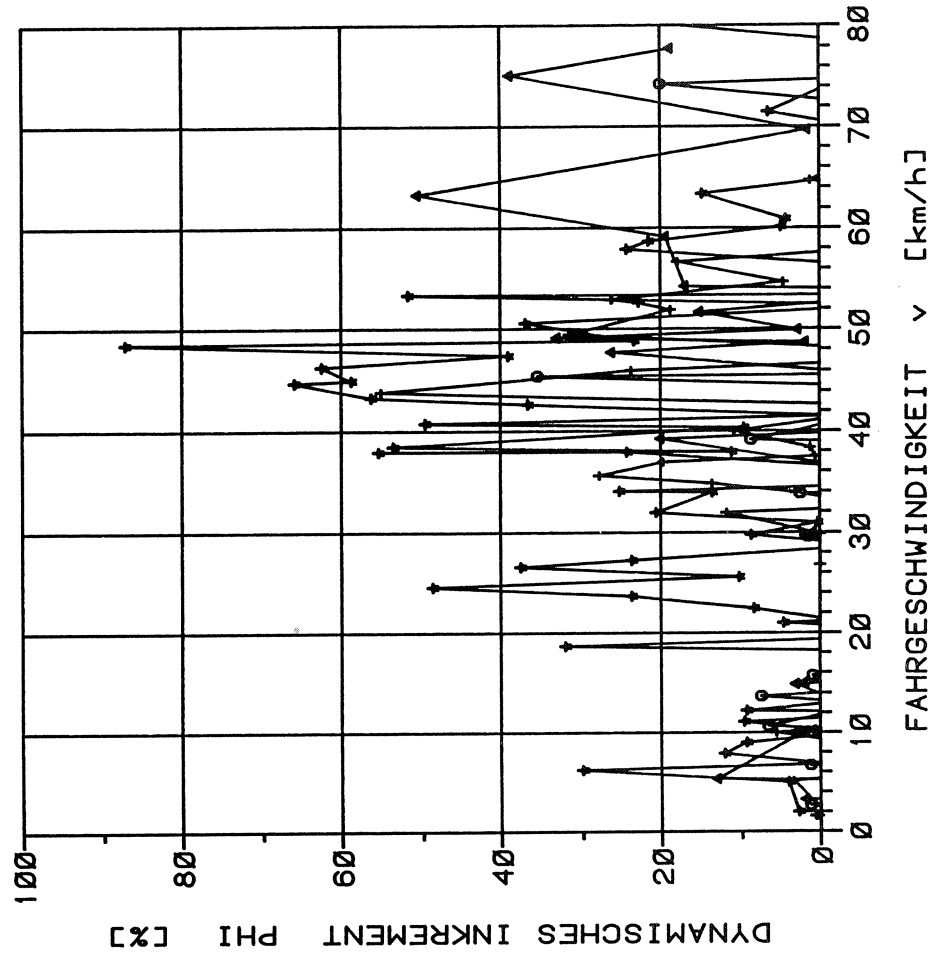
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 32

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AoA	7.75 MI	17.68	51.3
↑—↑	12R 10 AoA	6.47 MI	44.66	60.0
↑—↑	13R 10 AoA	5.93 MI	56.58	49.7
↑—↑	14R 10 AoA	6.62 MI	40.61	54.1



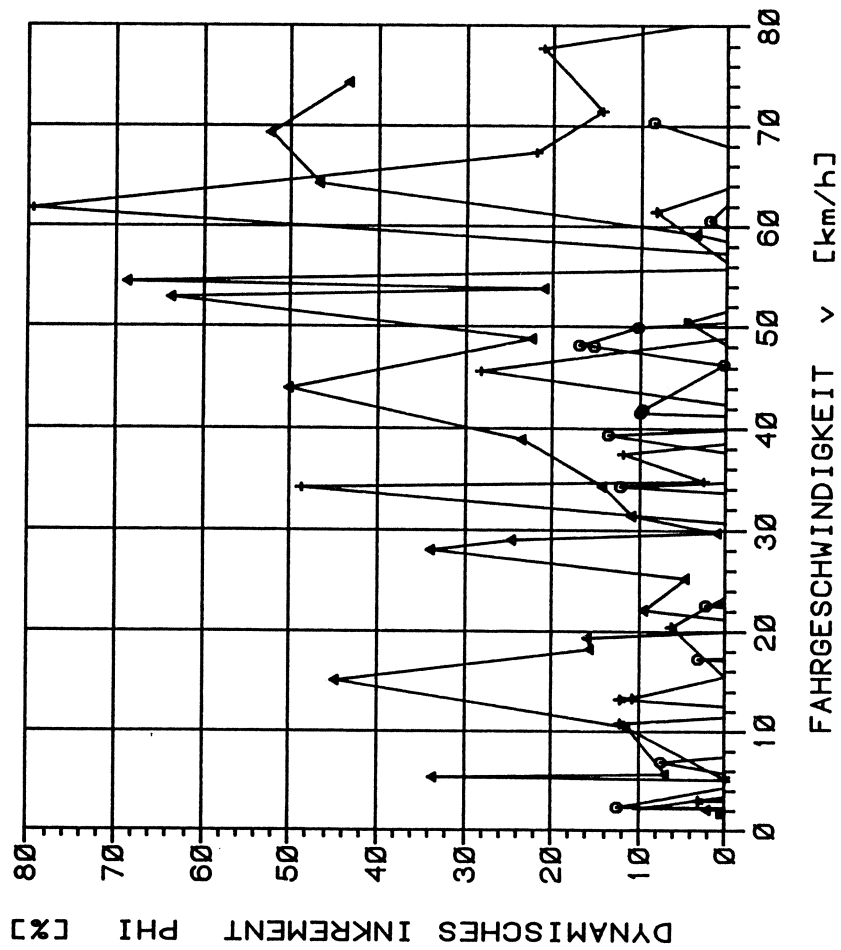
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 32

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	20R 10 AoA	13.29 MI	35.24	45.4
↑—↑	21R 10 AoA	8.96 MI	86.95	48.4
↑—↑	24R 10 AoA	10.34 MI	54.98	43.8
↑—↑	25R 10 AoA	10.97 MI	50.53	63.3

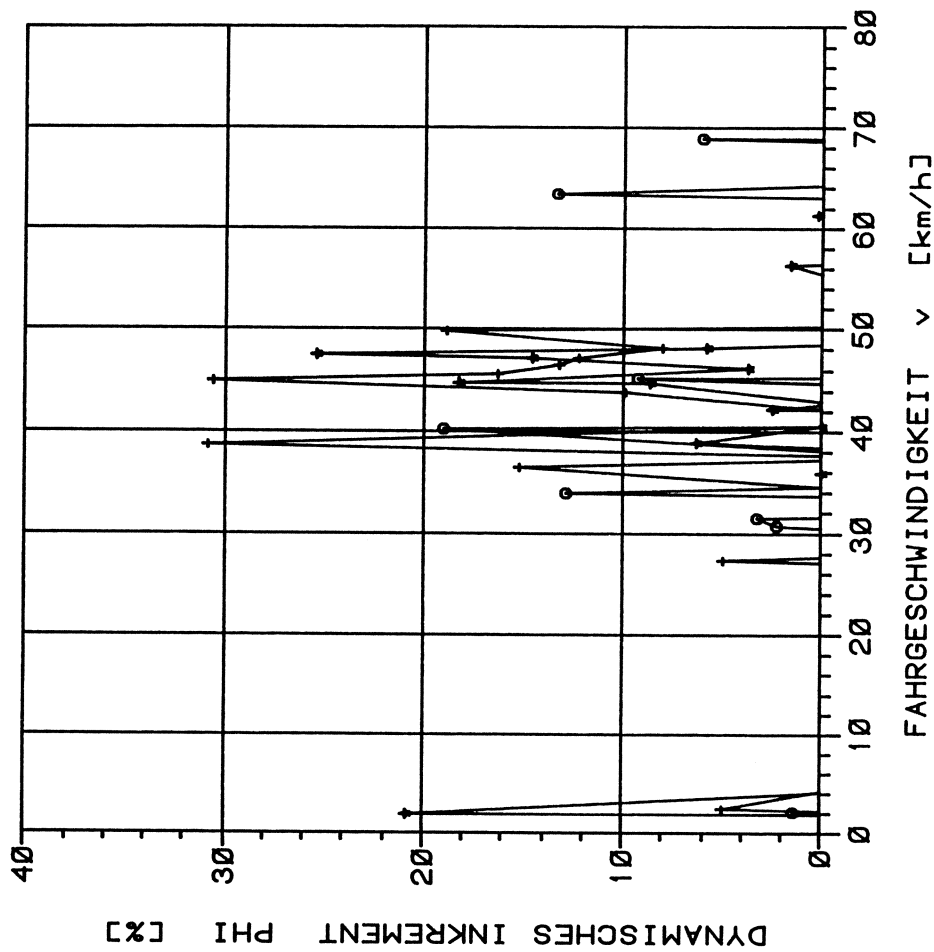


A6.43
A6.42

	INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	DMS 32	42R 10 AoA	9.74 MI	16.82	48.1
→—	DMS 32	52R 10 AoA	13.35 MI	12.19	13.1
↑—	DMS 32	71R 10 AoA	6.48 MI	79.51	61.7
▲—	DMS 32	74R 10 AoA	6.09 MI	68.38	54.5
■—	DMS 32	76R 10 AoA	6.82 MI	4.45	50.5

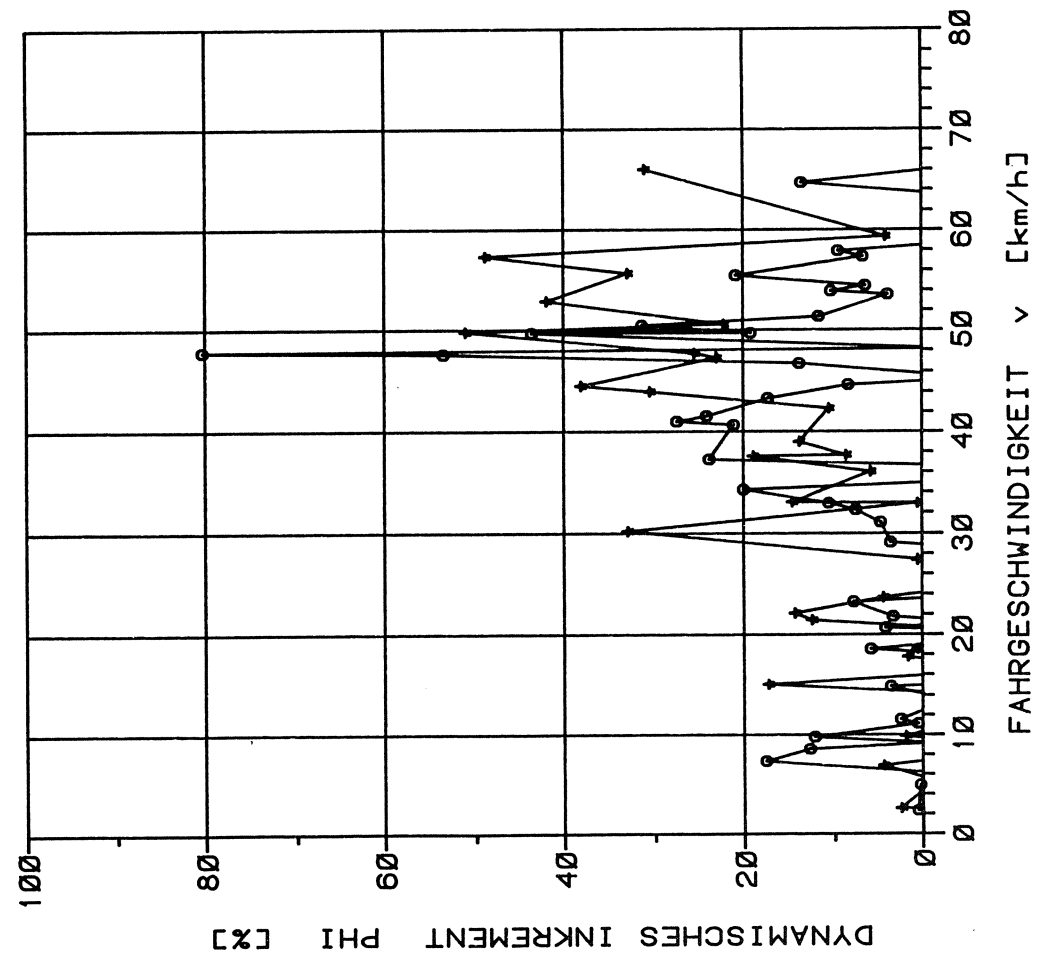


	INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	DMS 32	2LH 10 AoA	8.89 MI	18.95	40.2
→—	DMS 32	2MH 10 AoA	13.21 MI	25.39	47.4
↑—	DMS 32	4MH 10 AoA	13.38 MI	30.80	38.7



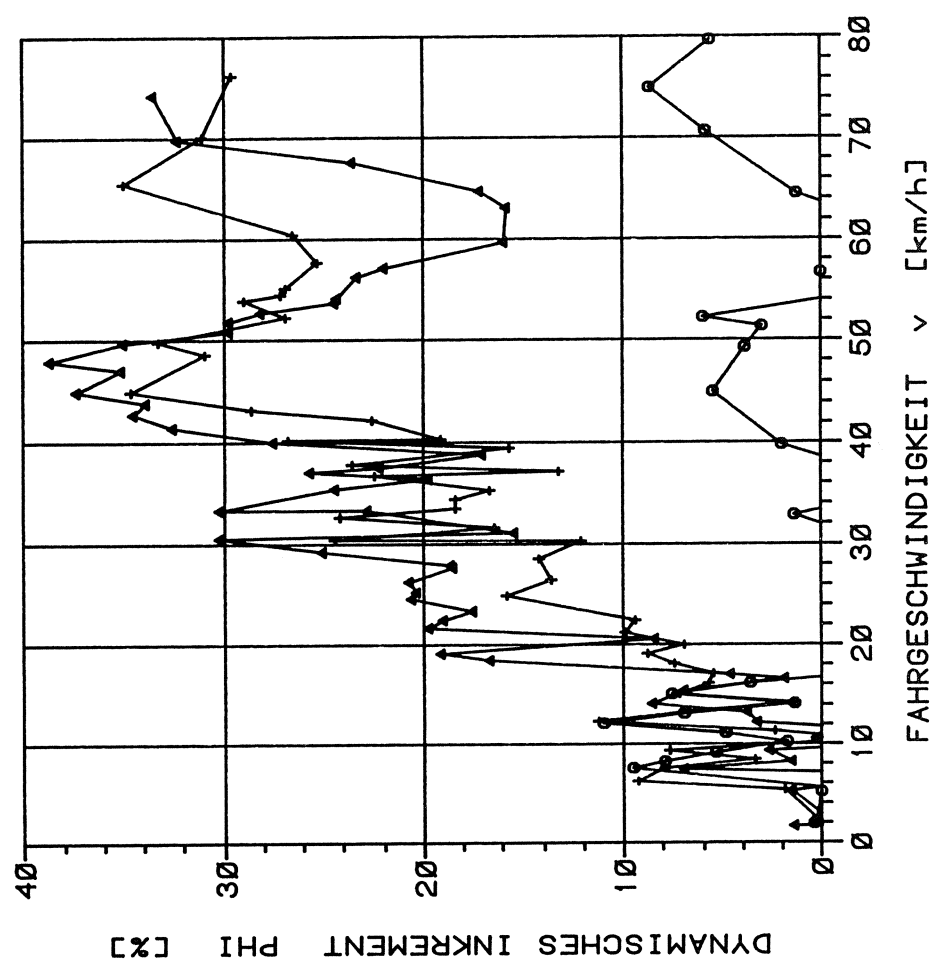
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 32

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 32	2MN 10 oA	10.77 MI	47.8
+	DMS 32	4MN 10 oA	10.99 MI	49.8



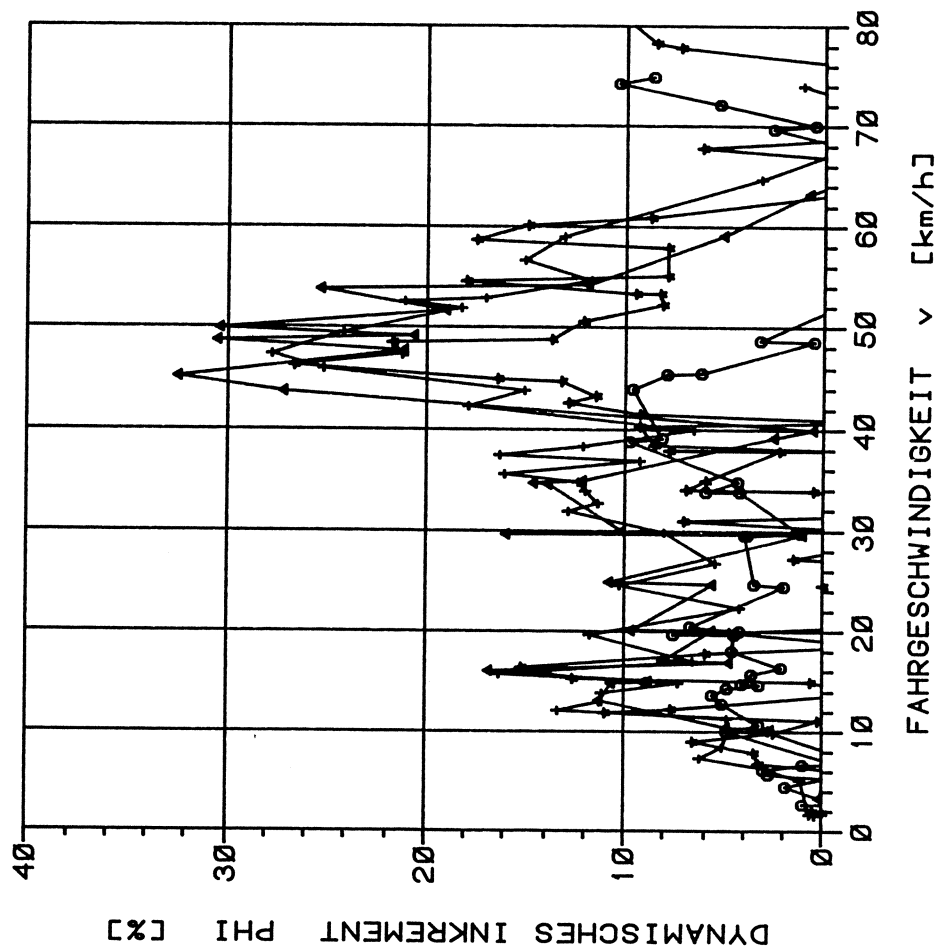
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	11R 10 AoA	9.05 MI	12.1
+	DMS 42	13R 10 AoA	8.94 MI	65.5
▲	DMS 42	14R 10 AoA	9.17 MI	47.9



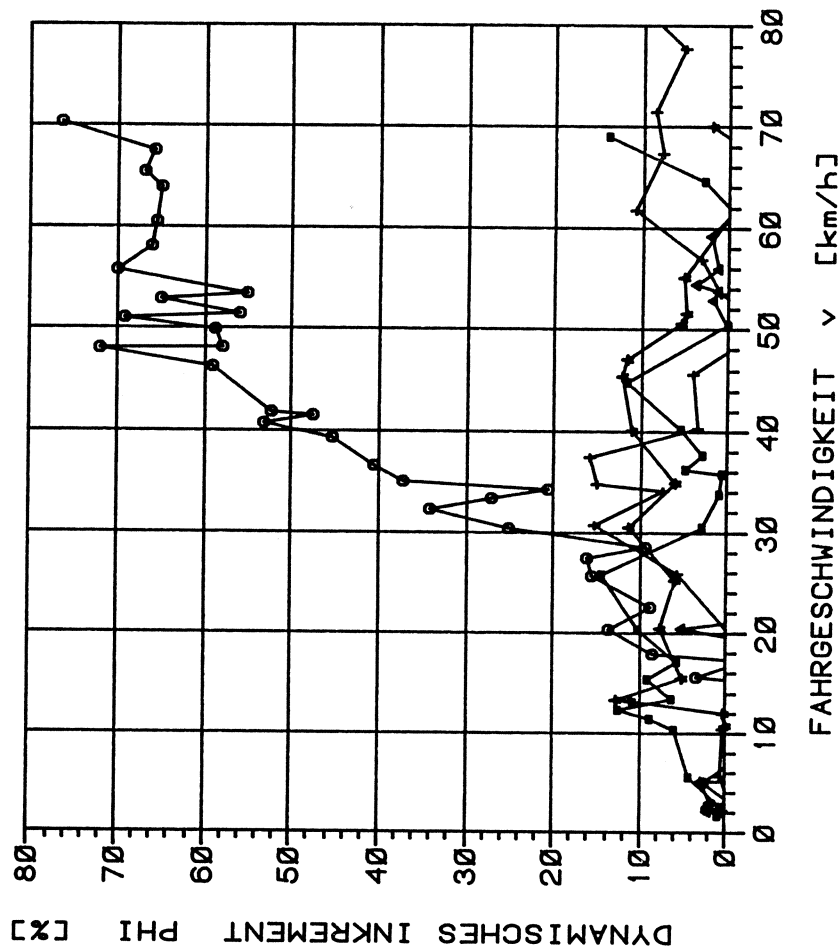
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	20R 10 AoA	10.28	74.2
+	DMS 42	21R 10 AoA	26.55	46.2
+	DMS 42	24R 10 AoA	27.72	47.3
▲	DMS 42	25R 10 AoA	32.36	45.1



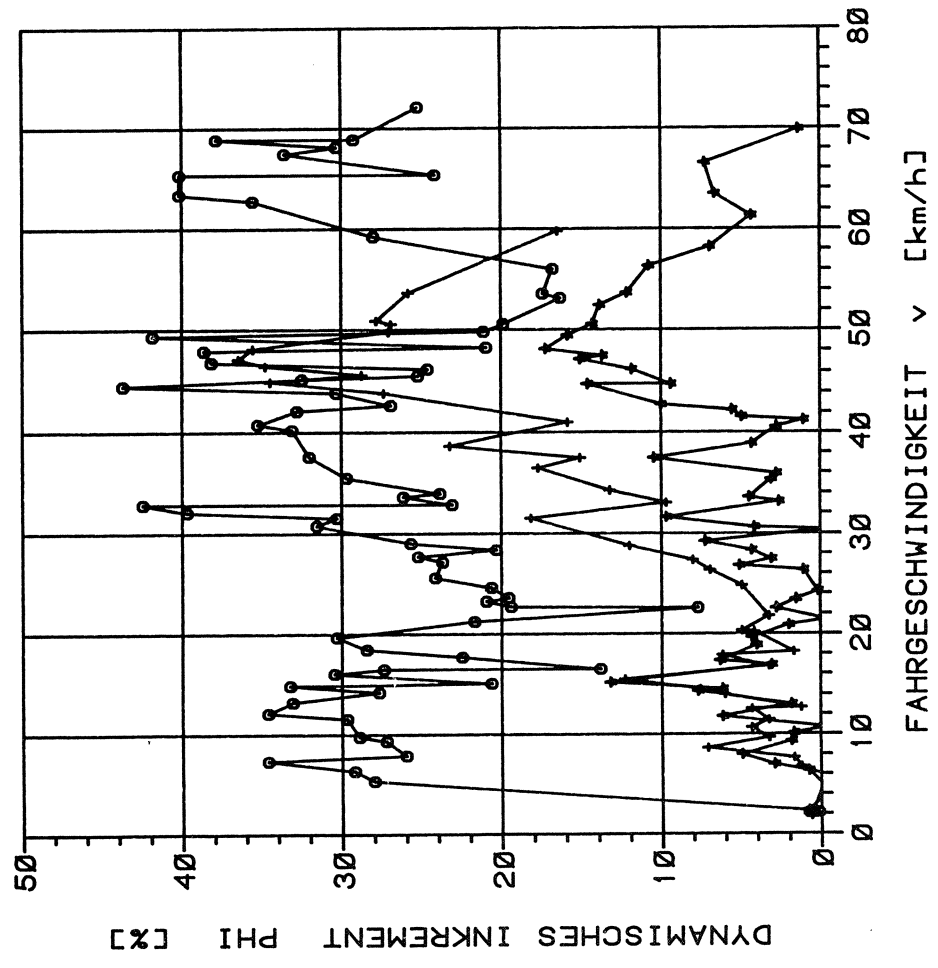
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	42R 10 AoA	76.40	70.3
+	DMS 42	52R 10 AoA	15.05	13.3
+	DMS 42	71R 10 AoA	9.72	37.4
▲	DMS 42	74R 10 AoA	11.62	20.4
■	DMS 42	76R 10 AoA	10.25	25.8

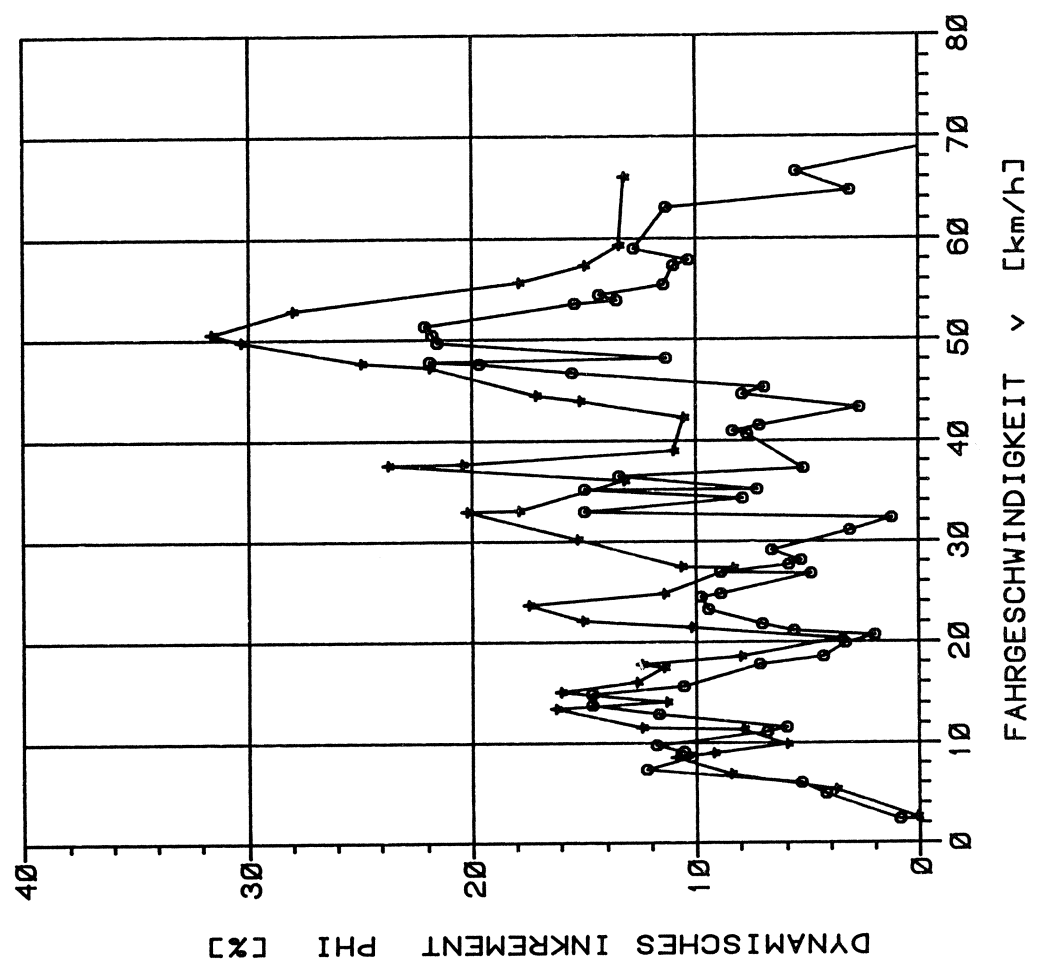


MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 42 MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	2LH 10 AoA	5.81 MI	43.67
+	DMS 42	2MH 10 AoA	18.52 MI	17.22
+	DMS 42	4MH 10 AoA	17.16 MI	36.51
				44.4
				48.1
				47.1



INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	2MN 10 oA	17.94 MI	22.01
+	DMS 42	4MN 10 oA	17.97 MI	31.59
				51.3
				50.5

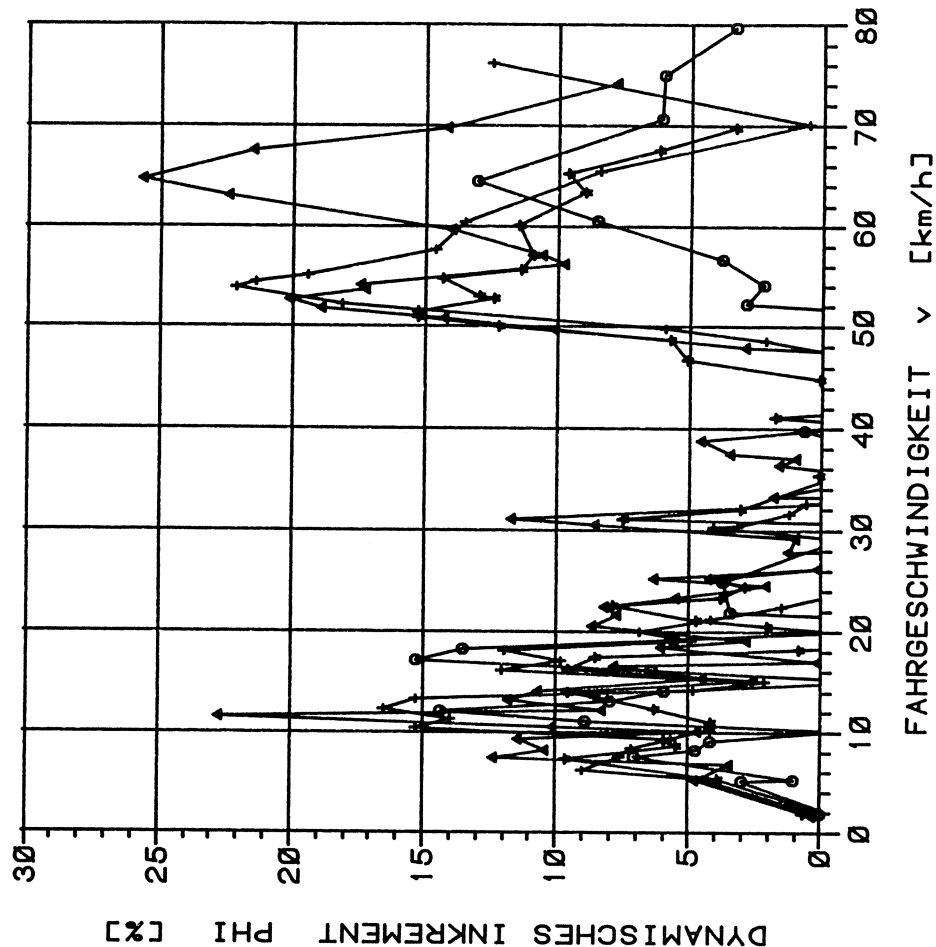
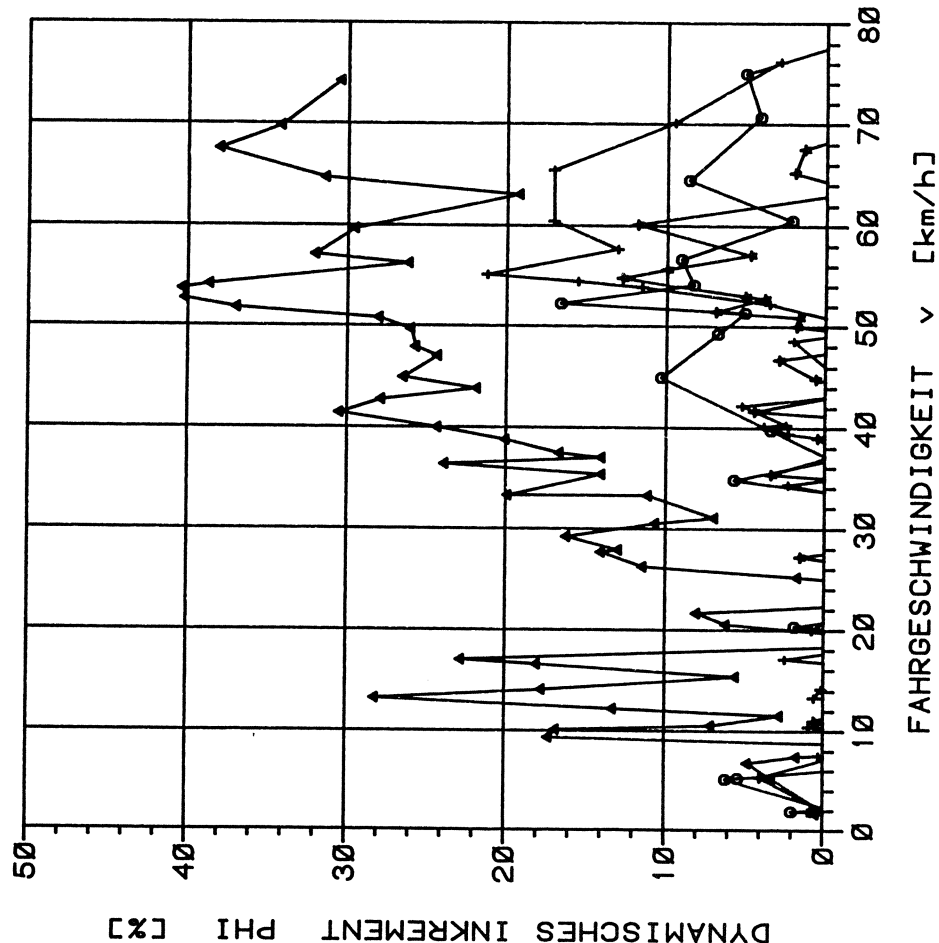


ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52+

ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52-

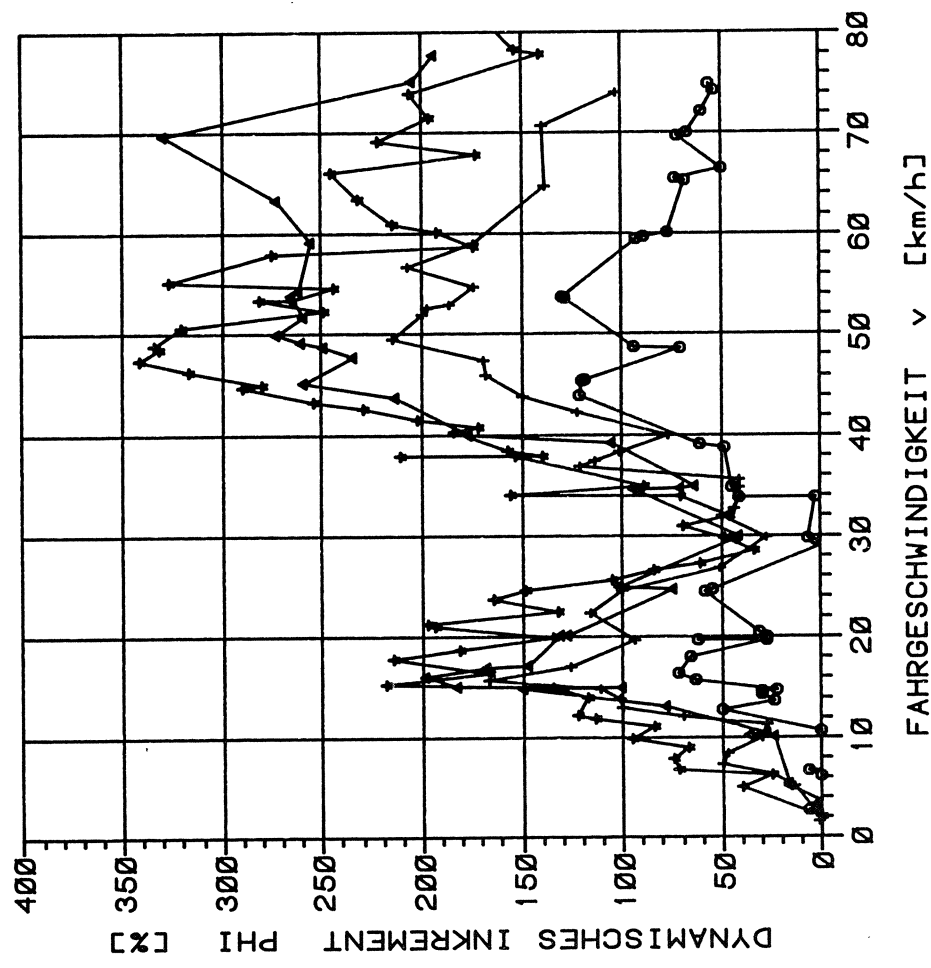
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AoA	13.19 MI	16.68	52.2
↑—↑	12R 10 AoA	16.57 MI	12.81	54.7
↑—↑	13R 10 AoA	16.25 MI	21.27	55.0
↑—↑	14R 10 AoA	12.92 MI	40.26	53.6

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AoA	-17.16 MI	15.25	17.1
↑—↑	12R 10 AoA	-16.78 MI	15.21	51.4
↑—↑	13R 10 AoA	-16.18 MI	22.07	53.9
↑—↑	14R 10 AoA	-15.98 MI	25.60	64.7



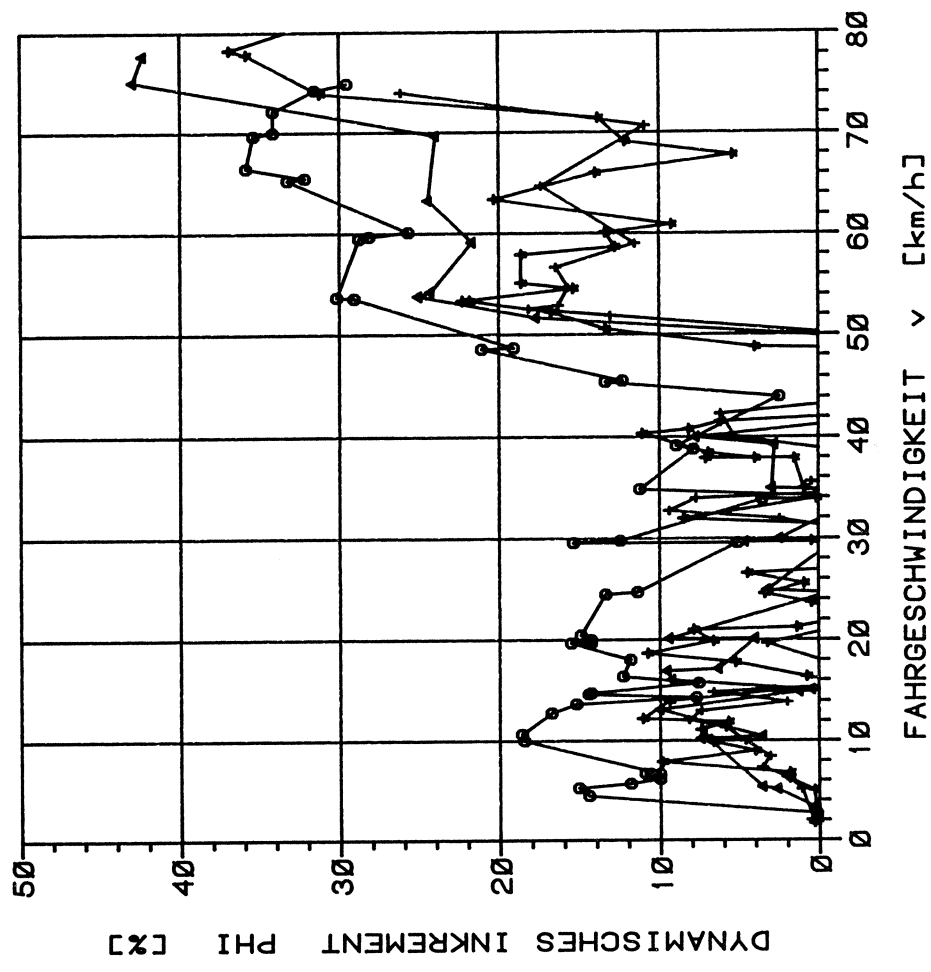
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	20R 10 AoA	3.60 MI	128.77	53.7
↑—↑	21R 10 AoA	3.34 MI	341.29	47.4
↑—↑	24R 10 AoA	3.85 MI	214.30	49.4
▲—▲	25R 10 AoA	2.74 MI	329.13	69.6



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52-

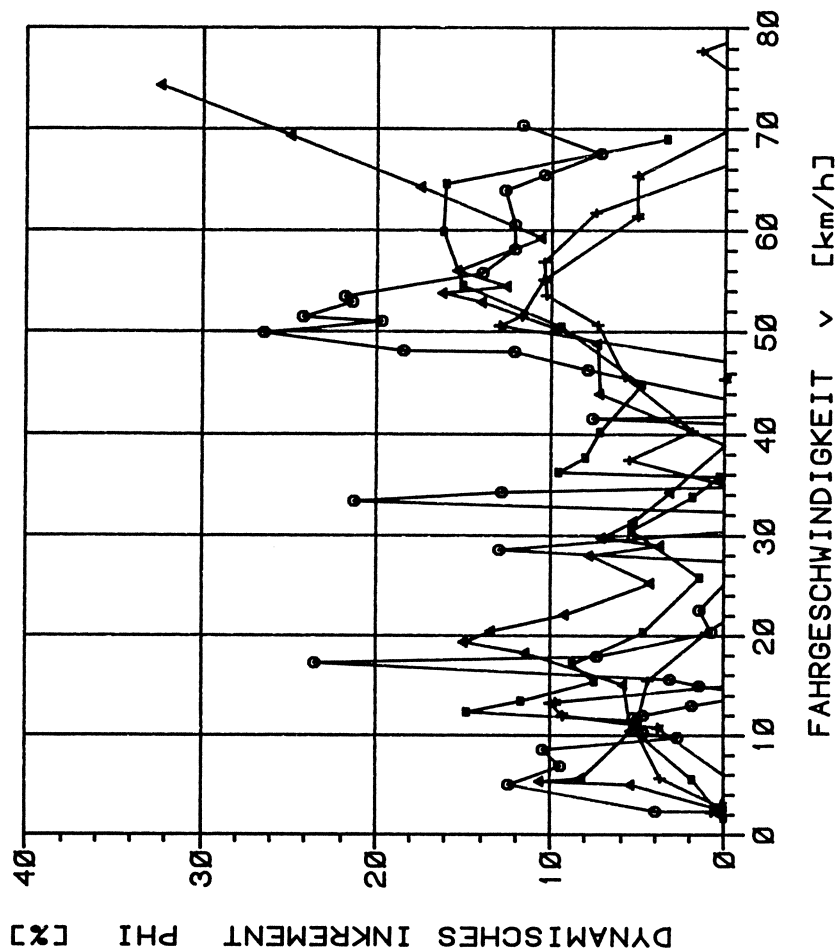
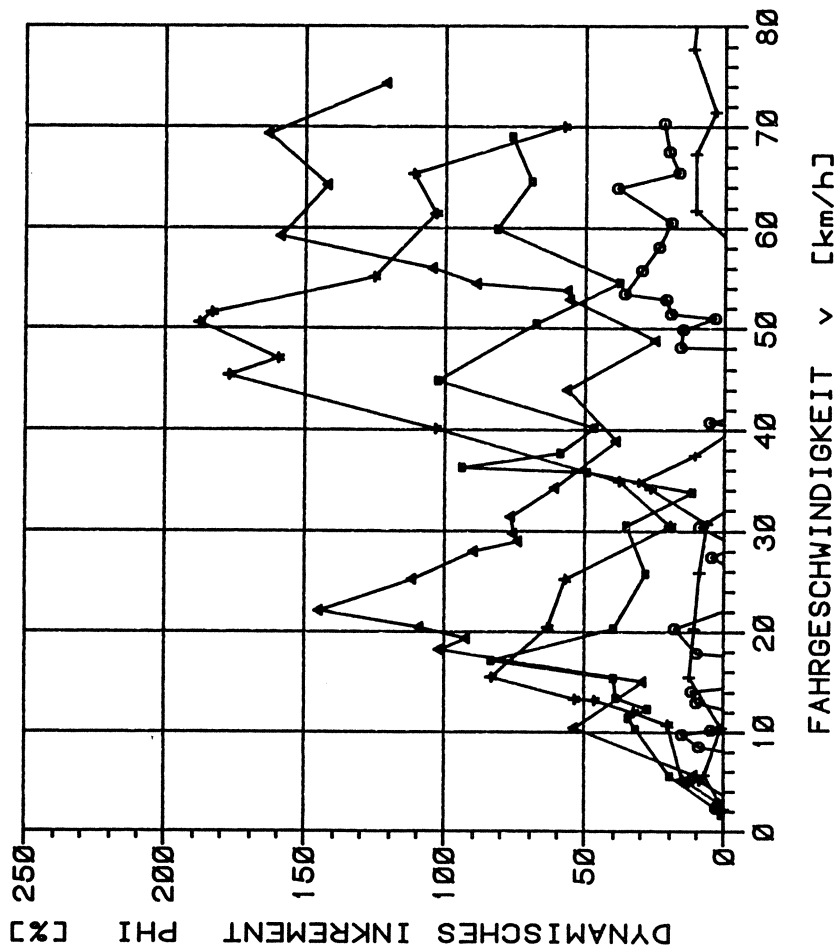
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	20R 10 AoA	-22.07 MI	35.85	66.5
↑—↑	21R 10 AoA	-23.58 MI	36.97	78.2
↑—↑	24R 10 AoA	-24.42 MI	26.12	73.9
▲—▲	25R 10 AoA	-24.16 MI	42.92	75.0



ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52+ ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52-

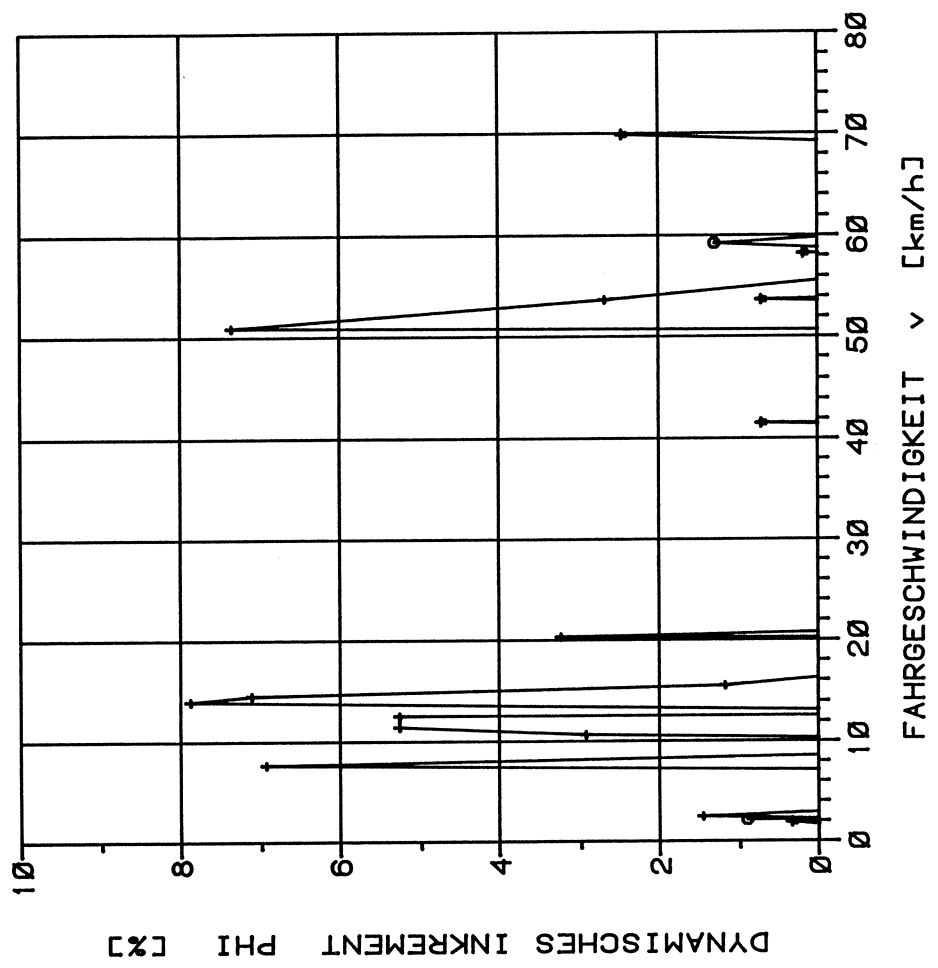
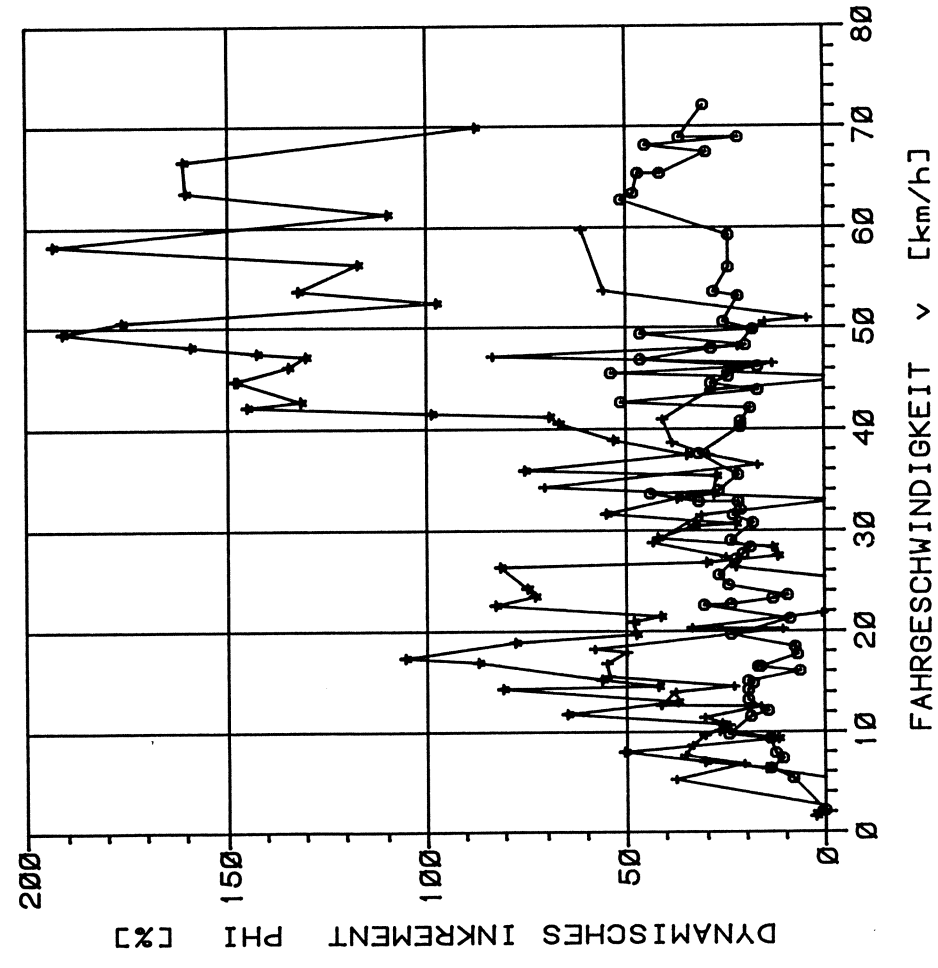
A6.55
A6.54

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]		
○	DMS 52	42R 10 AoA	10.96 MI	38.25	63.9	○	DMS 52	42R 10 AoA	-22.30 MI	26.42	49.9
+	DMS 52	52R 10 AoA	4.18 MI	188.09	50.5	+	DMS 52	52R 10 AoA	-33.69 MI	12.94	50.5
+	DMS 52	71R 10 AoA	10.83 MI	30.36	34.7	+	DMS 52	71R 10 AoA	-19.51 MI	10.36	56.8
+	DMS 52	74R 10 AoA	3.06 MI	163.51	69.3	+	DMS 52	74R 10 AoA	-20.61 MI	32.23	74.3
+	DMS 52	76R 10 AoA	3.63 MI	102.81	44.8	+	DMS 52	76R 10 AoA	-23.31 MI	16.12	59.8



MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 52+ MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	2LH 10 AoA	13.46 MI	45.4
+	DMS 52	2MH 10 AoA	5.24 MI	58.1
+	DMS 52	4MH 10 AoA	11.51 MI	47.1
		ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	2LH 10 AoA	-21.41 MI	59.1
+	DMS 52	2MH 10 AoA	-32.78 MI	69.9
+	DMS 52	4MH 10 AoA	-30.19 MI	13.9

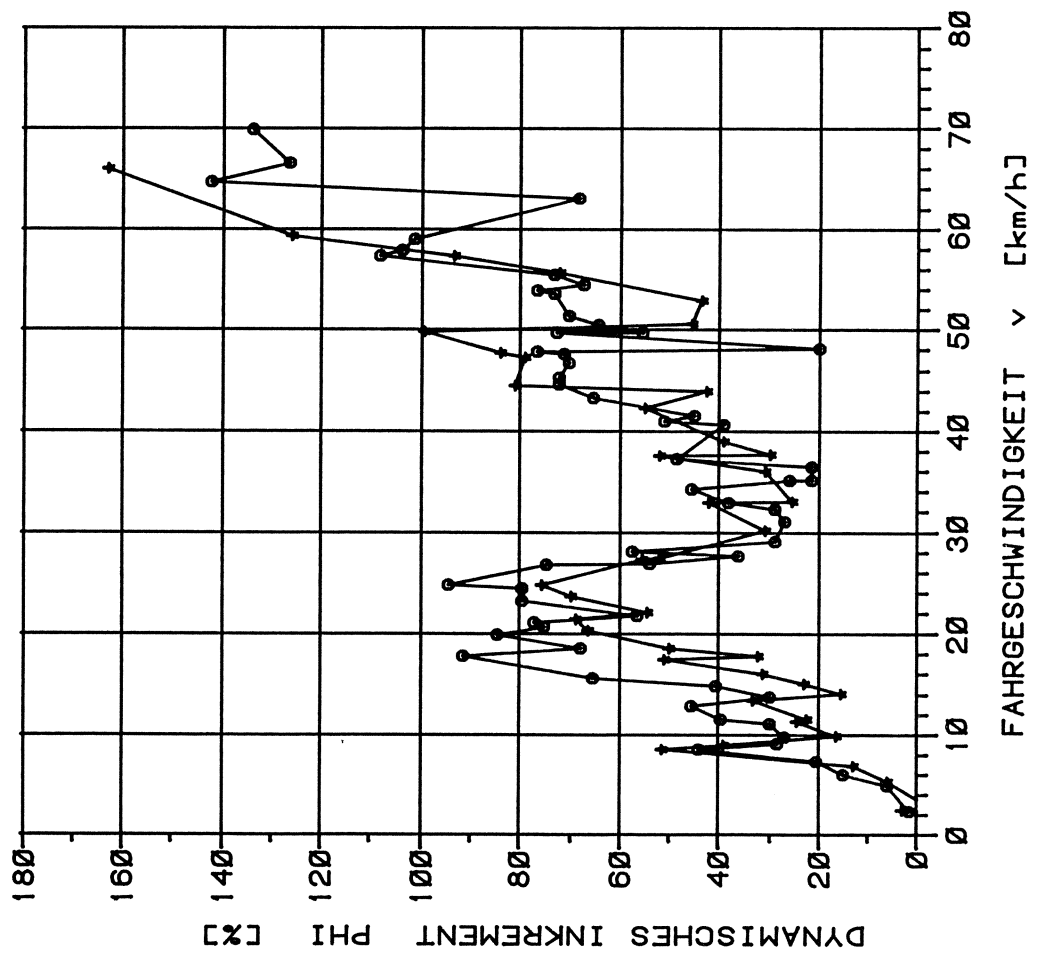


MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 52+

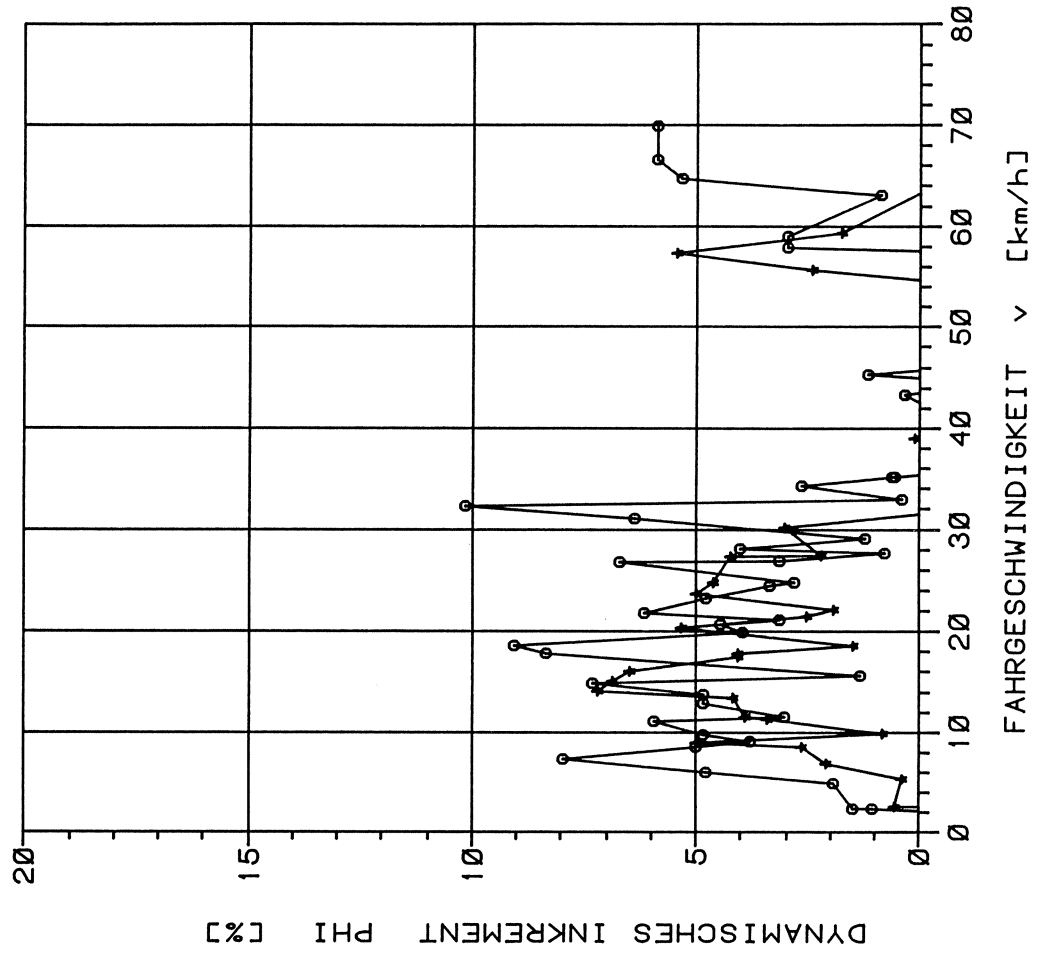
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 52-

A6.59
A6.58

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 2MN 10 oA	6.74 MI	142.16	64.7
+	DMS 52 4MN 10 oA	8.45 MI	162.95	66.0

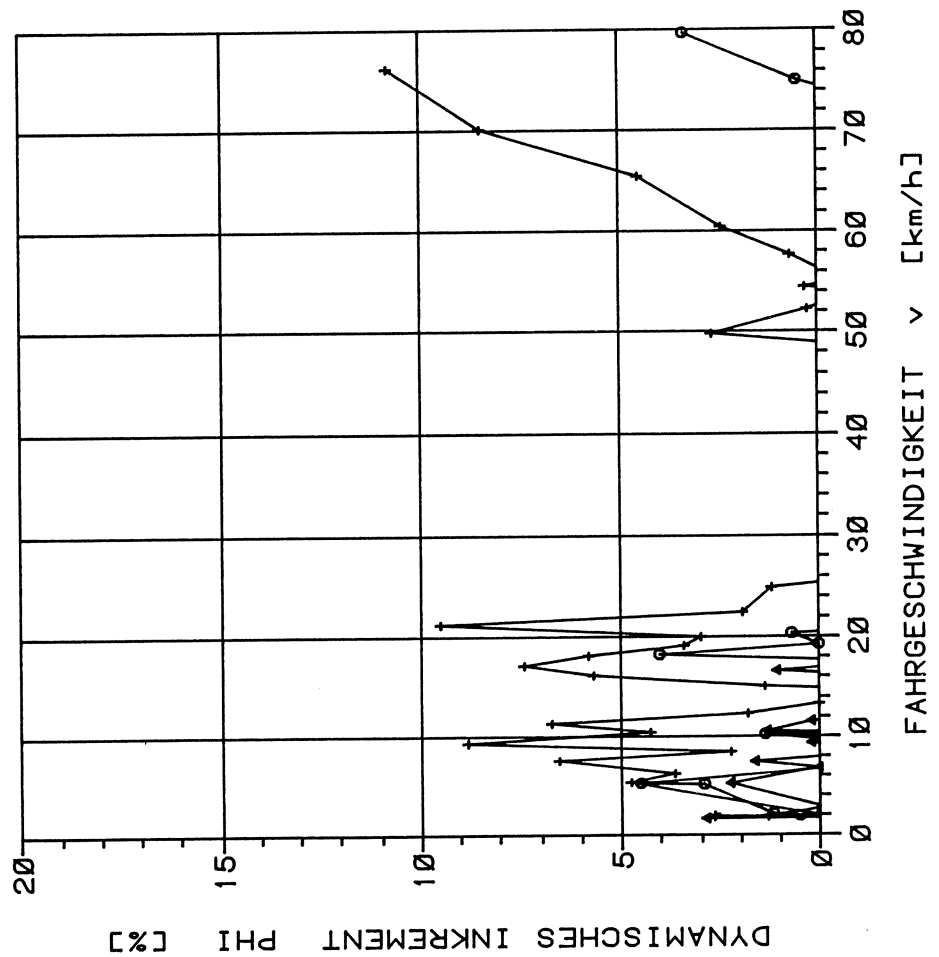


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 2MN 10 oA	-40.35 MI	10.13	32.2
+	DMS 52 4MN 10 oA	-47.27 MI	7.18	14.0



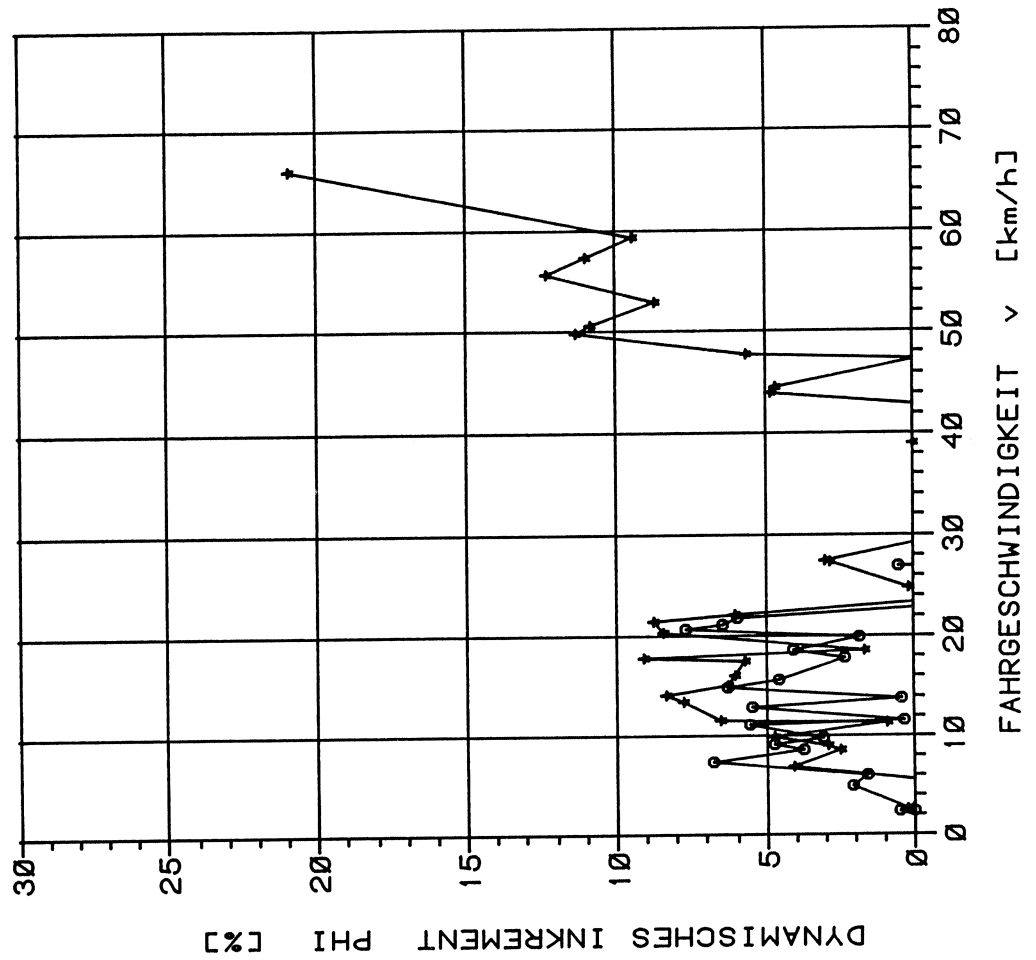
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 41

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	11R 10 AoA	18.53 MI	4.50	5.2
+	12R 10 AoA	19.91 MI	2.67	1.9
+	13R 10 AoA	17.09 MI	10.76	76.2
+	14R 10 AoA	17.67 MI	2.81	1.7



MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 41

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 41 2MN 10 oA	27.58 MI	7.67	20.7
+	DMS 41 4MN 10 oA	29.55 MI	20.86	66.0

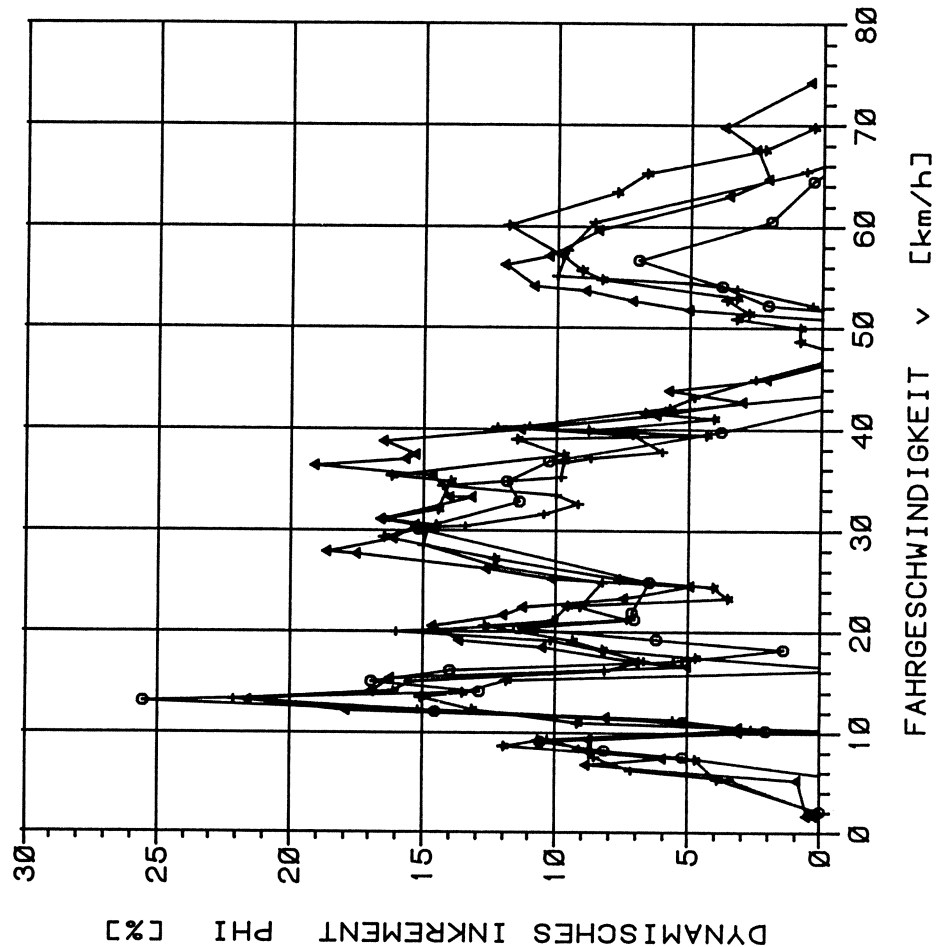
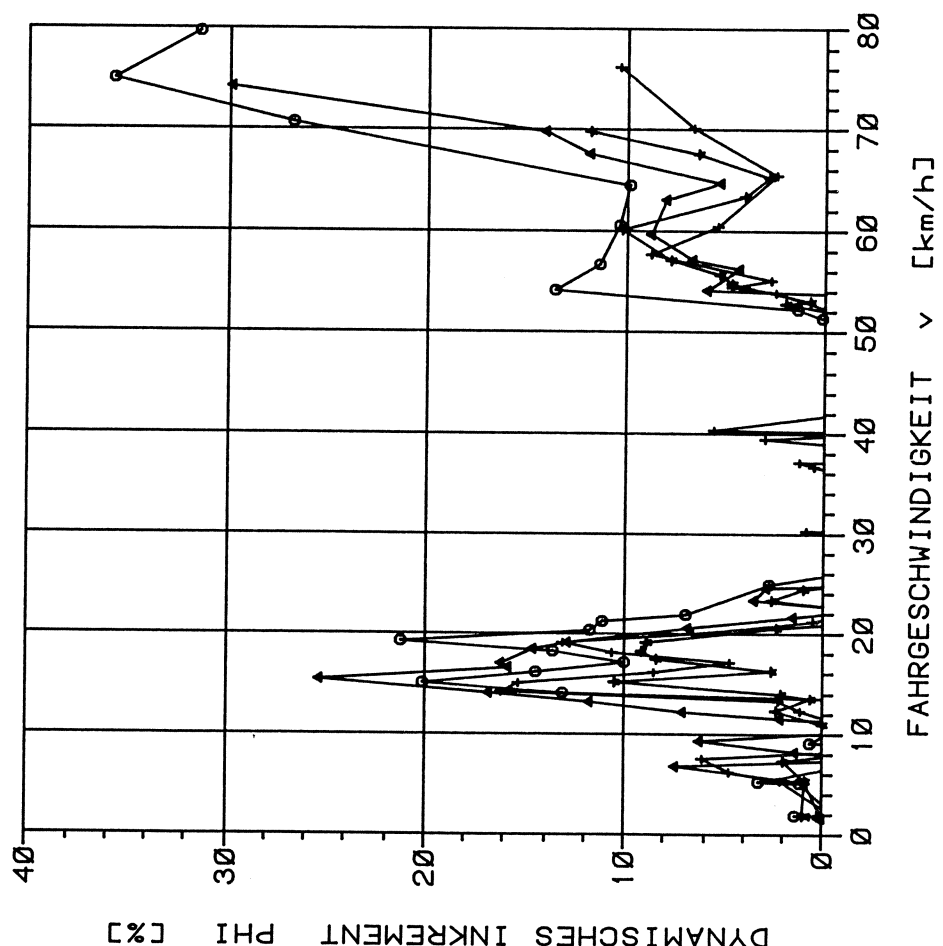


ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 51+ ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 51-

A6.63
A6.62

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
DMS 51	11R 10 AoA	17.54 MI	35.65	74.9
DMS 51	12R 10 AoA	21.52 MI	11.83	69.8
DMS 51	13R 10 AoA	20.83 MI	16.12	14.1
DMS 51	14R 10 AoA	19.47 MI	29.77	74.1

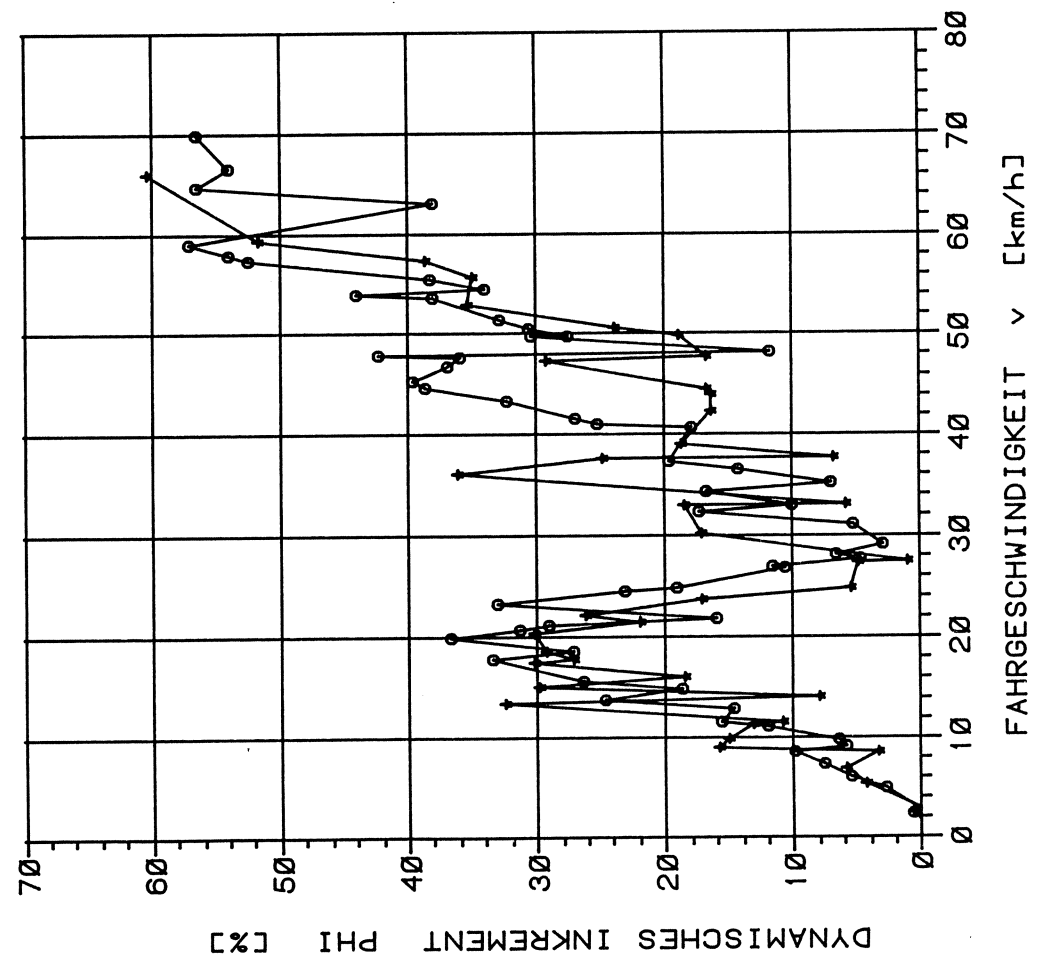
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
DMS 51	11R 10 AoA	-12.67 MI	25.45	13.0
DMS 51	12R 10 AoA	-12.74 MI	16.43	31.1
DMS 51	13R 10 AoA	-12.59 MI	22.07	13.3
DMS 51	14R 10 AoA	-12.47 MI	21.53	13.1



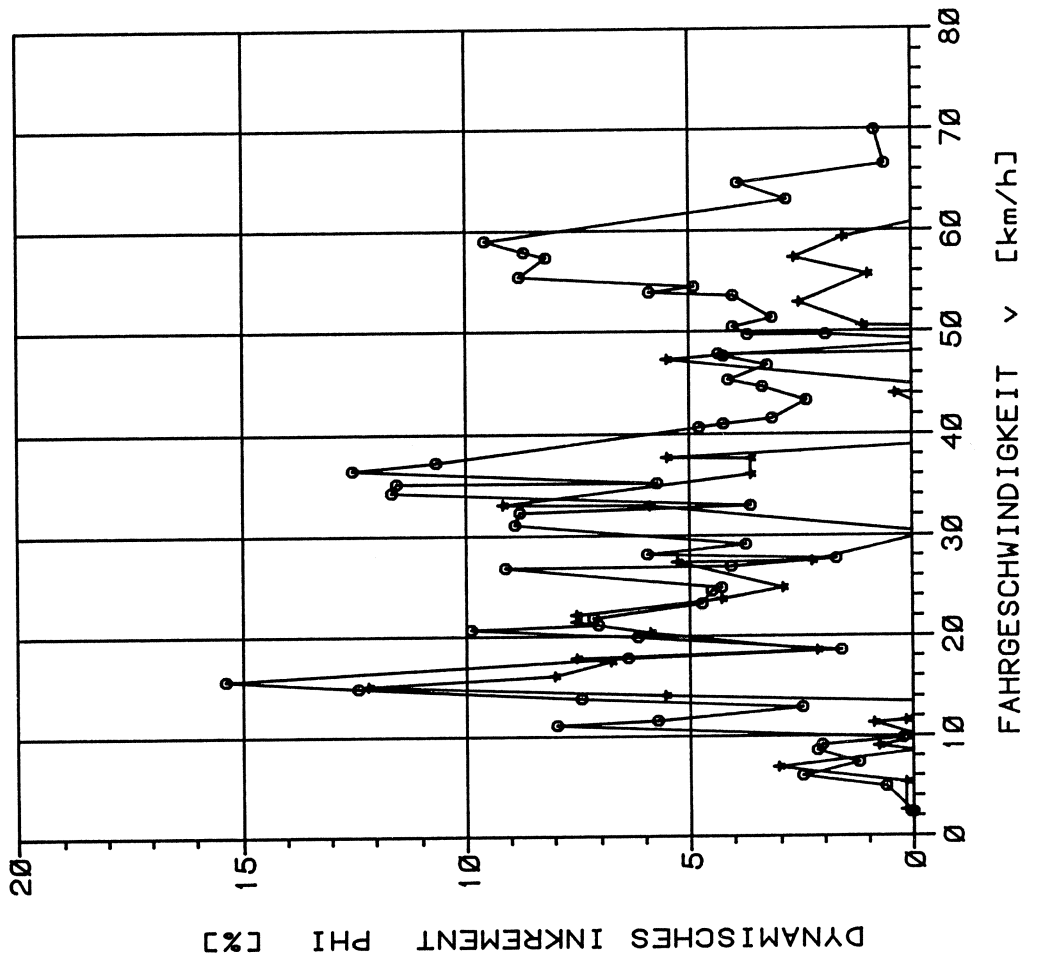
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 51+

MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 51-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	2MN 10 oA	8.91 MI	56.98	58.9
✚—	4MN 10 oA	18.58 MI	60.29	66.0

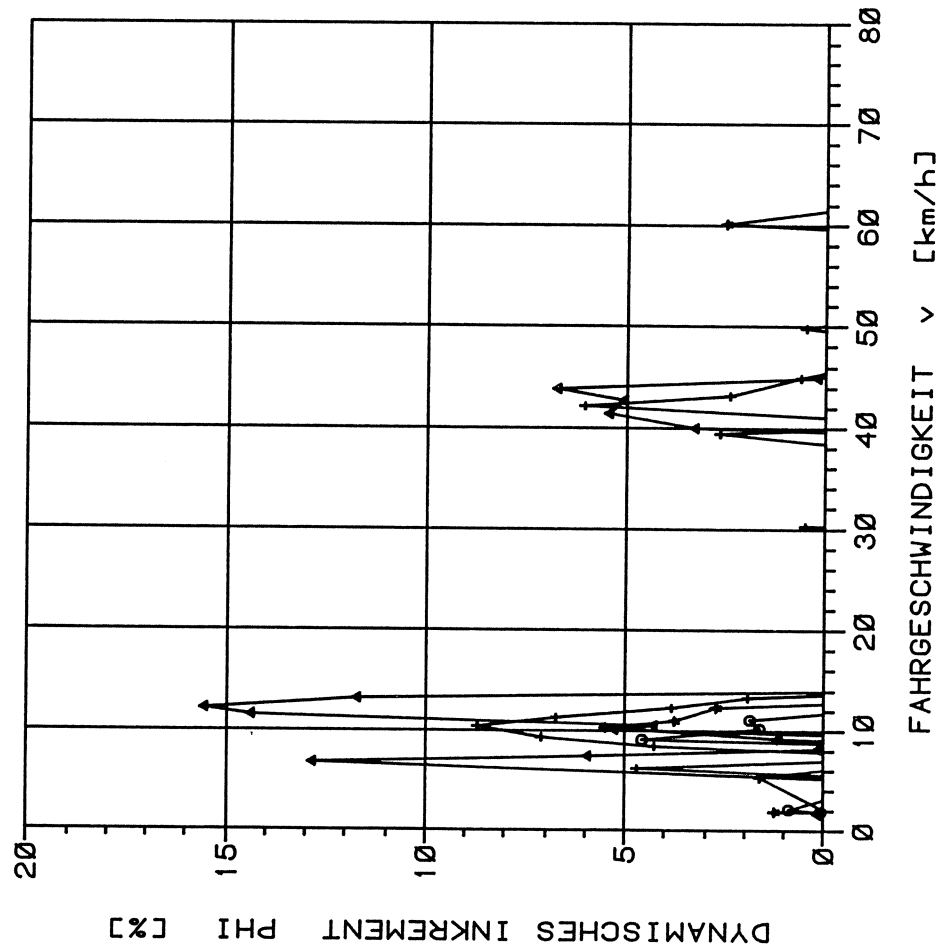


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	2MN 10 oA	-27.07 MI	15.36	15.5
✚—	4MN 10 oA	-30.53 MI	12.18	15.0



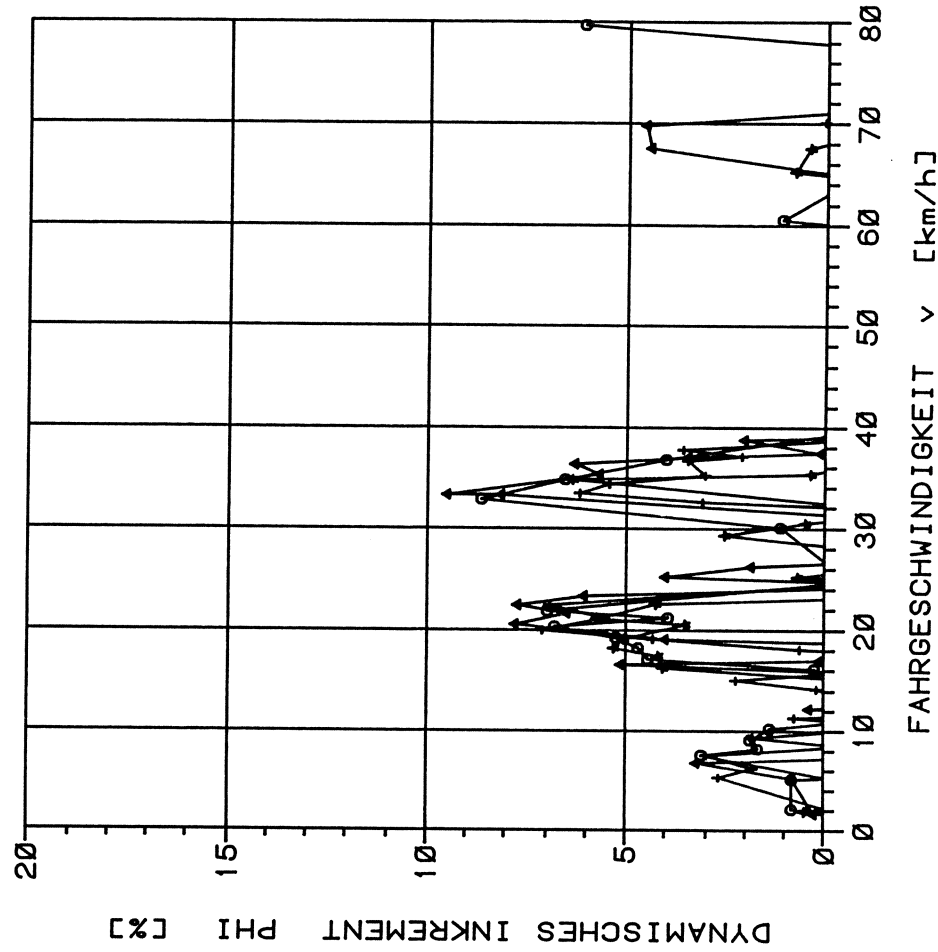
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 50+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	11R 10 AoA	12.43 MI	4.55	9.1
↑—	12R 10 AoA	13.91 MI	5.46	10.3
↑—	13R 10 AoA	13.70 MI	8.66	10.4
↑—	14R 10 AoA	12.29 MI	15.50	12.2



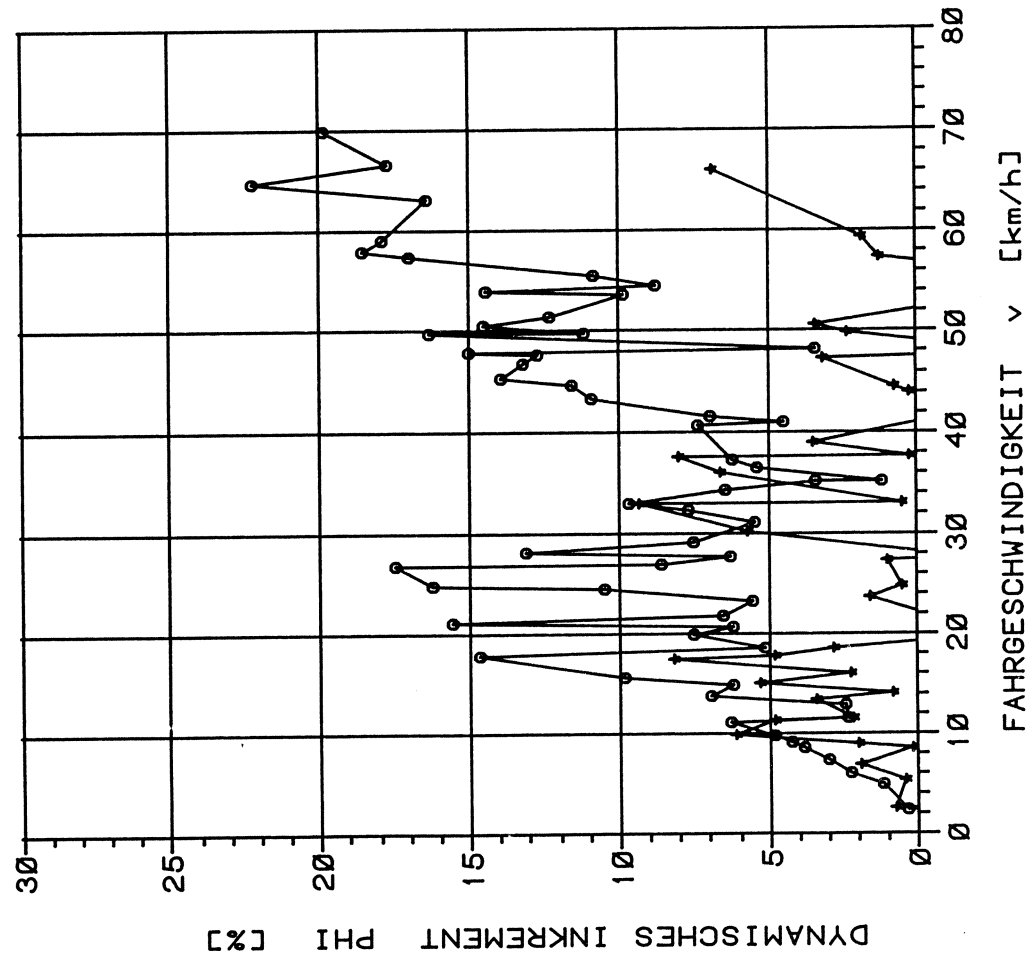
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 50-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	11R 10 AoA	-15.46 MI	8.59	32.8
↑—	12R 10 AoA	-17.07 MI	6.35	34.8
↑—	13R 10 AoA	-17.33 MI	7.05	20.0
↑—	14R 10 AoA	-15.81 MI	9.45	33.2

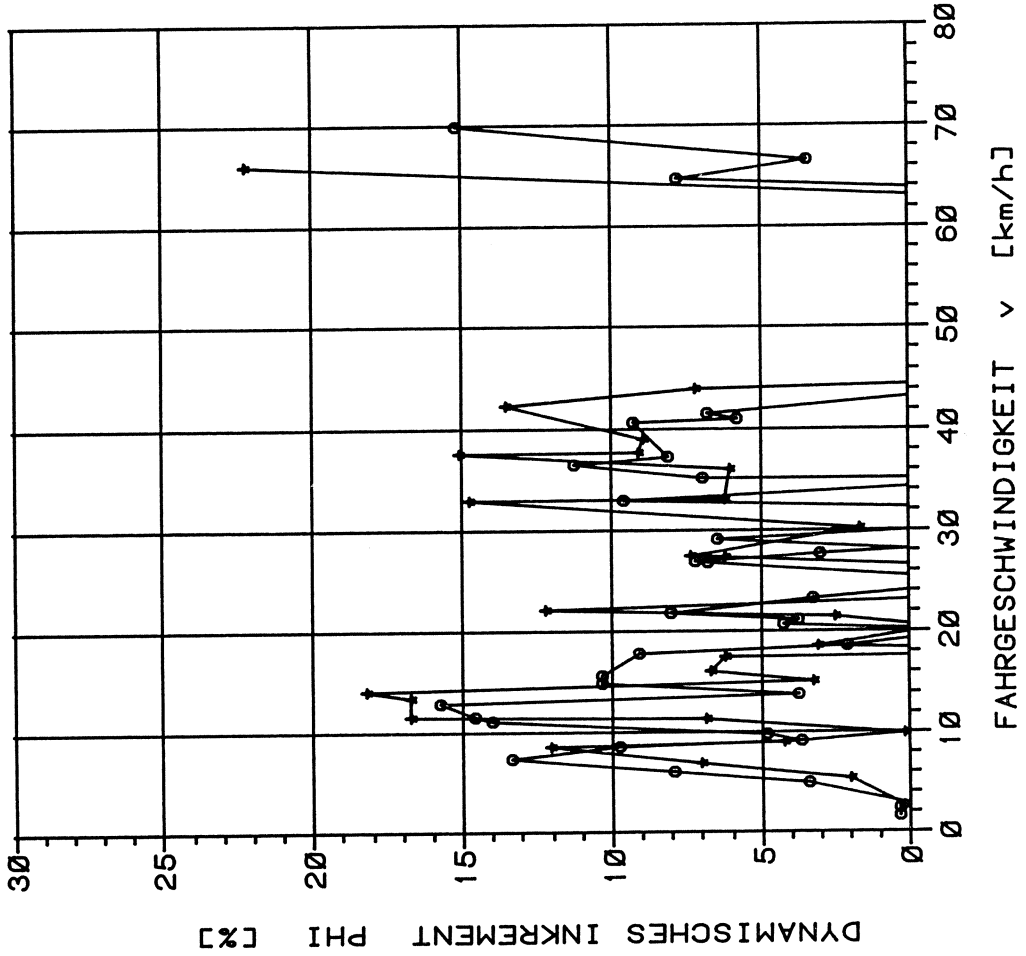


MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 50+ MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 50-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 50	2MN 10 oA	19.21 MI	64.7
+	DMS 50	4MN 10 oA	32.22 MI	32.9



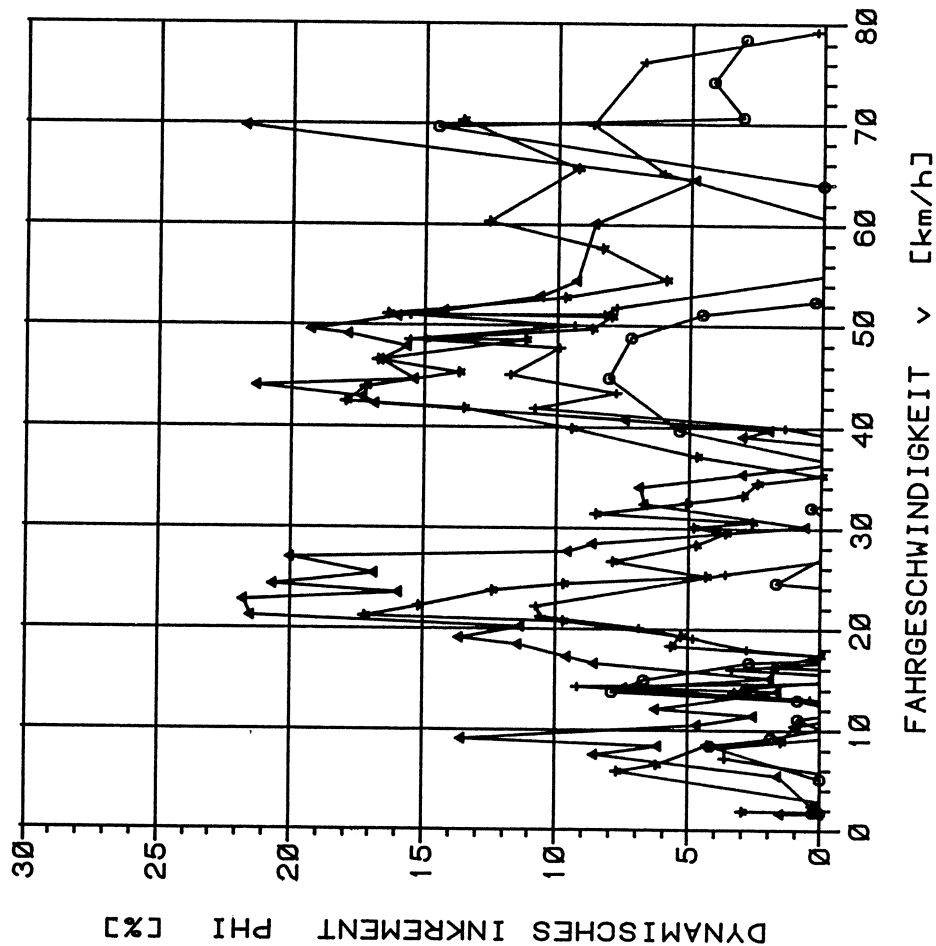
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 50	2MN 10 oA	-21.30 MI	12.8
+	DMS 50	4MN 10 oA	-17.48 MI	66.0



A6.71
A6.70

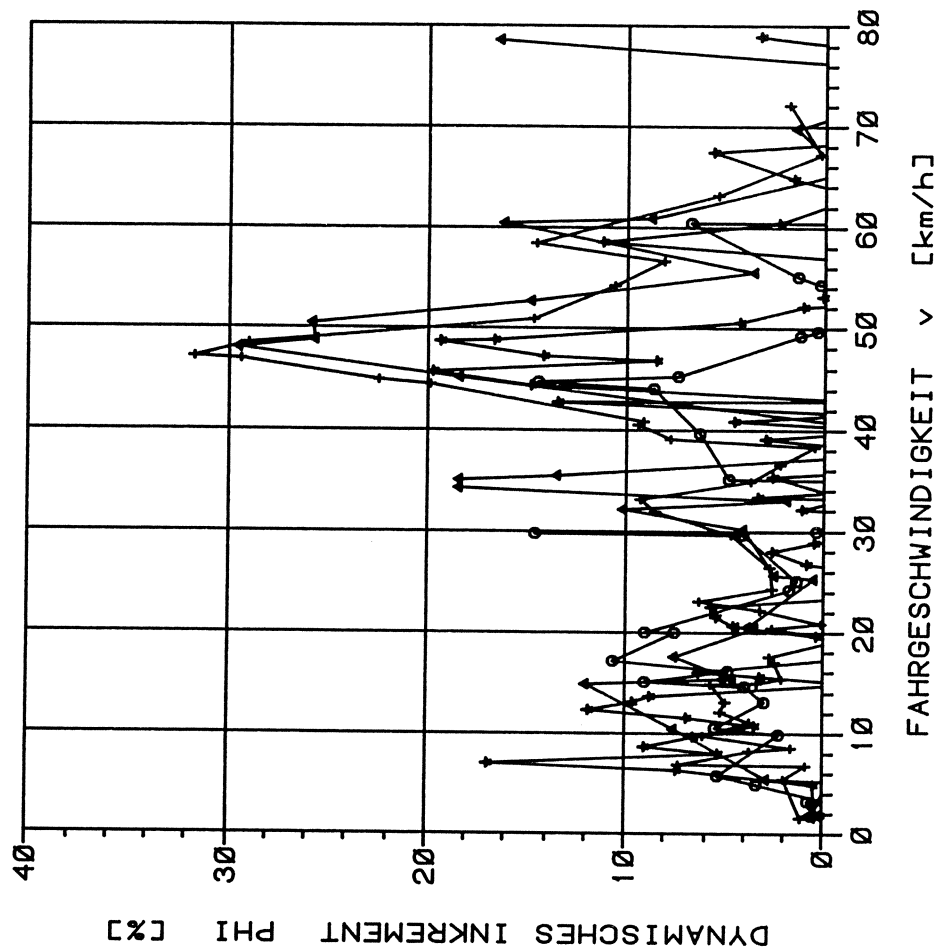
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	11R 10 KoA	16.38 MI	14.45	69.6
↑—	12R 10 KoA	16.67 MI	17.95	42.4
↑—	13R 10 KoA	17.04 MI	15.50	51.0
↑—	14R 10 KoA	14.68 MI	21.66	69.8



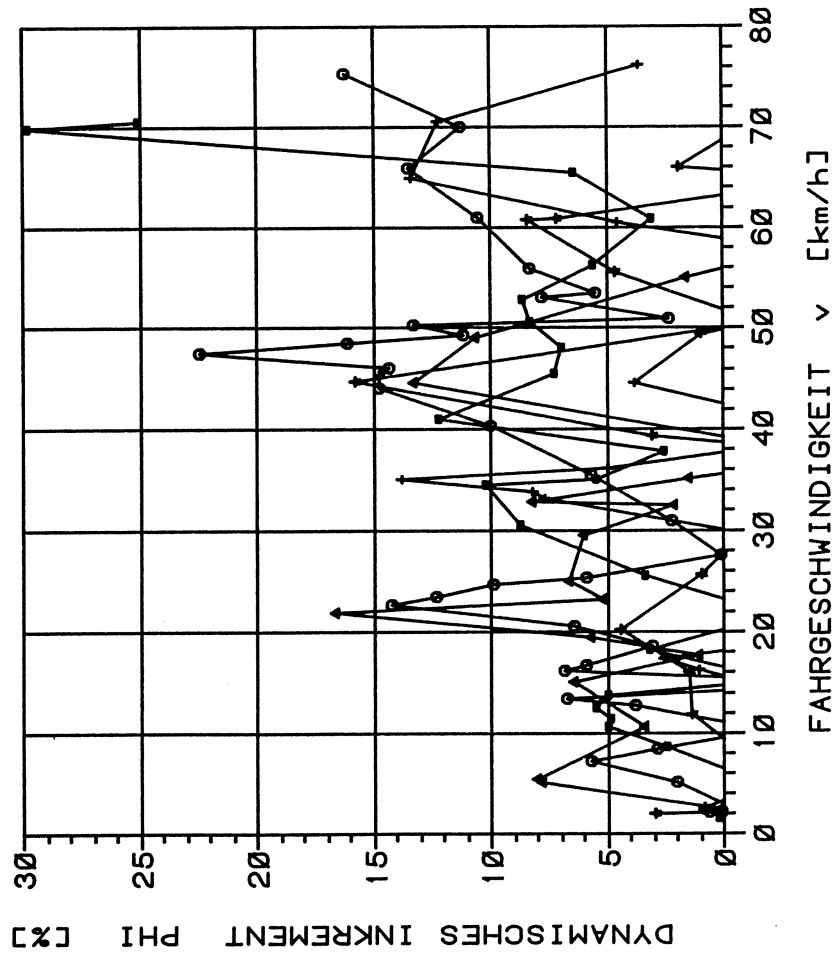
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	20R 10 KoA	26.69 MI	14.53	29.6
↑—	21R 10 KoA	25.91 MI	19.66	45.7
↑—	24R 10 KoA	26.01 MI	31.68	47.1
↑—	25R 10 KoA	22.04 MI	29.40	48.0

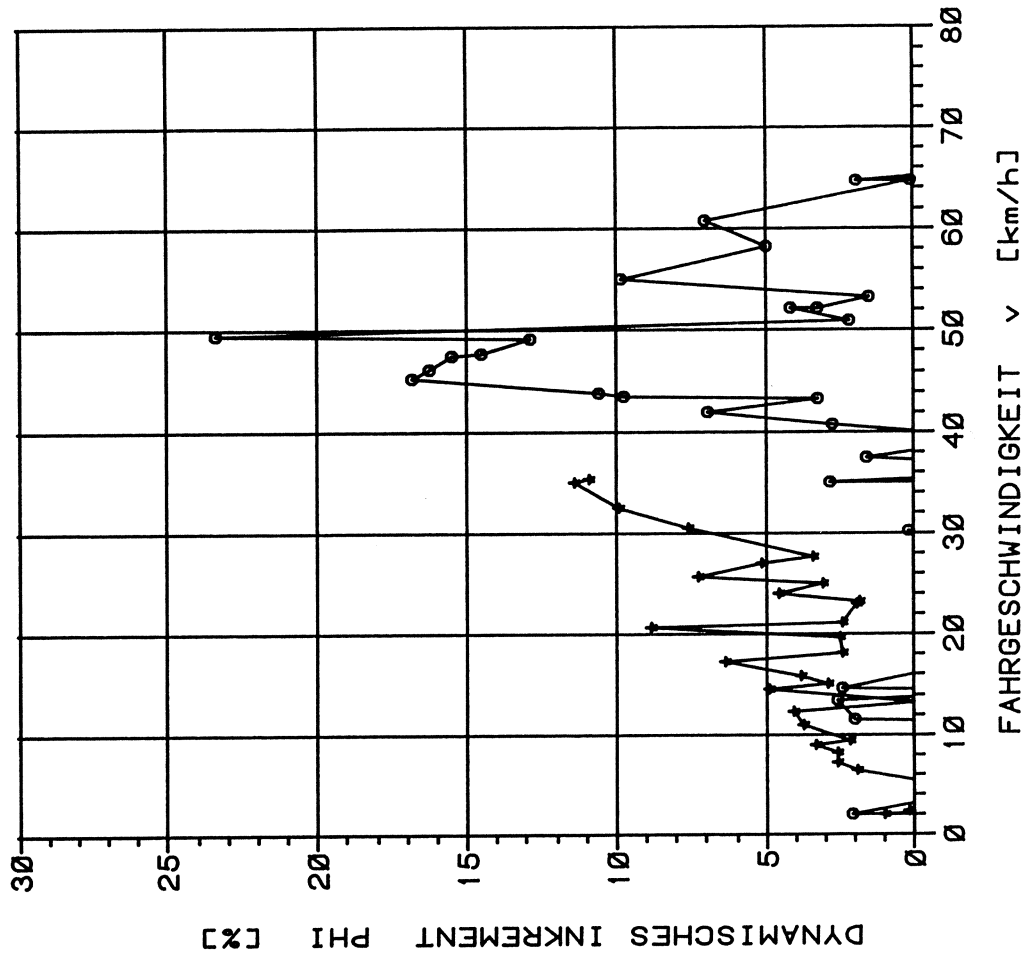


ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 22 MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	42R 10 KoA	18.52 MI	47.5
+	DMS 22	52R 10 KoA	28.45 MI	44.7
+	DMS 22	71R 10 KoA	16.84 MI	34.9
+	DMS 22	74R 10 KoA	19.22 MI	21.8
+	DMS 22	76R 10 KoA	24.65 MI	69.8

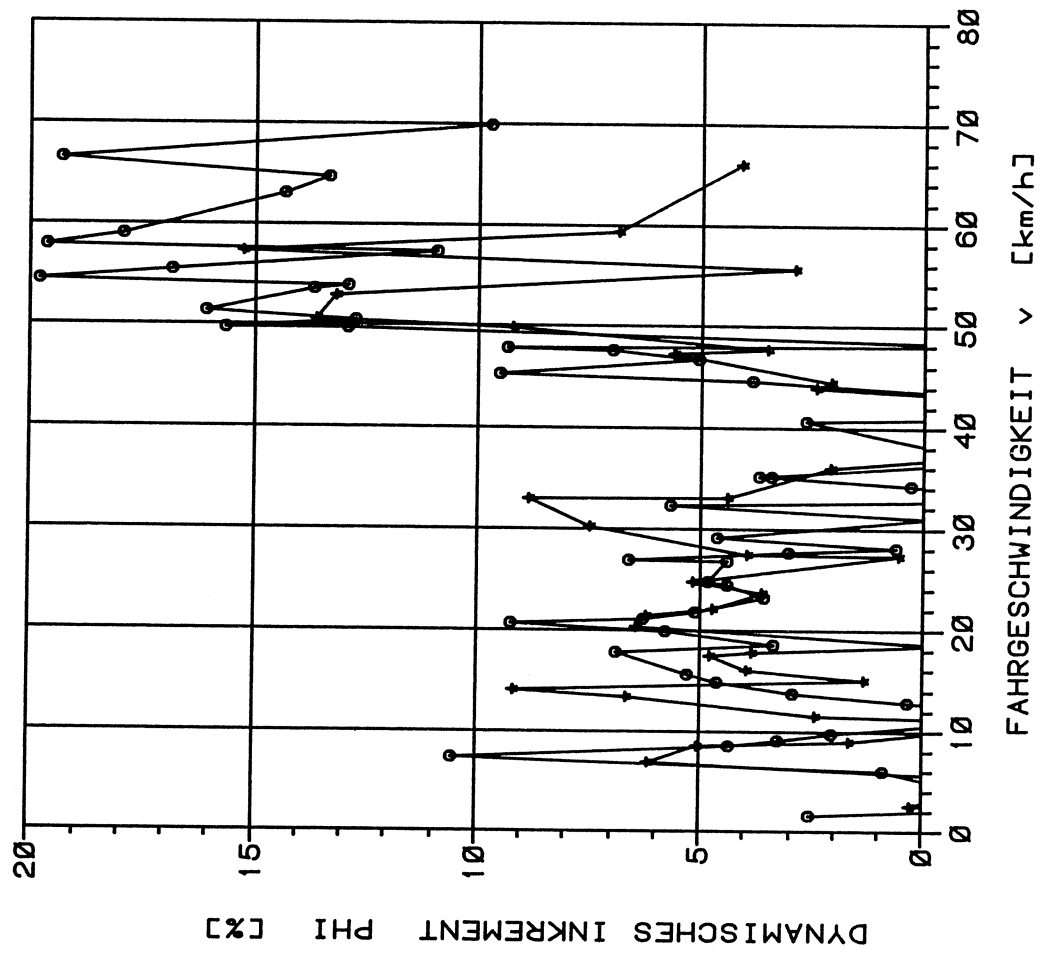


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	2MH 10 KoA	28.55 MI	49.4
+	DMS 22	4MH 10 KoA	26.24 MI	35.0



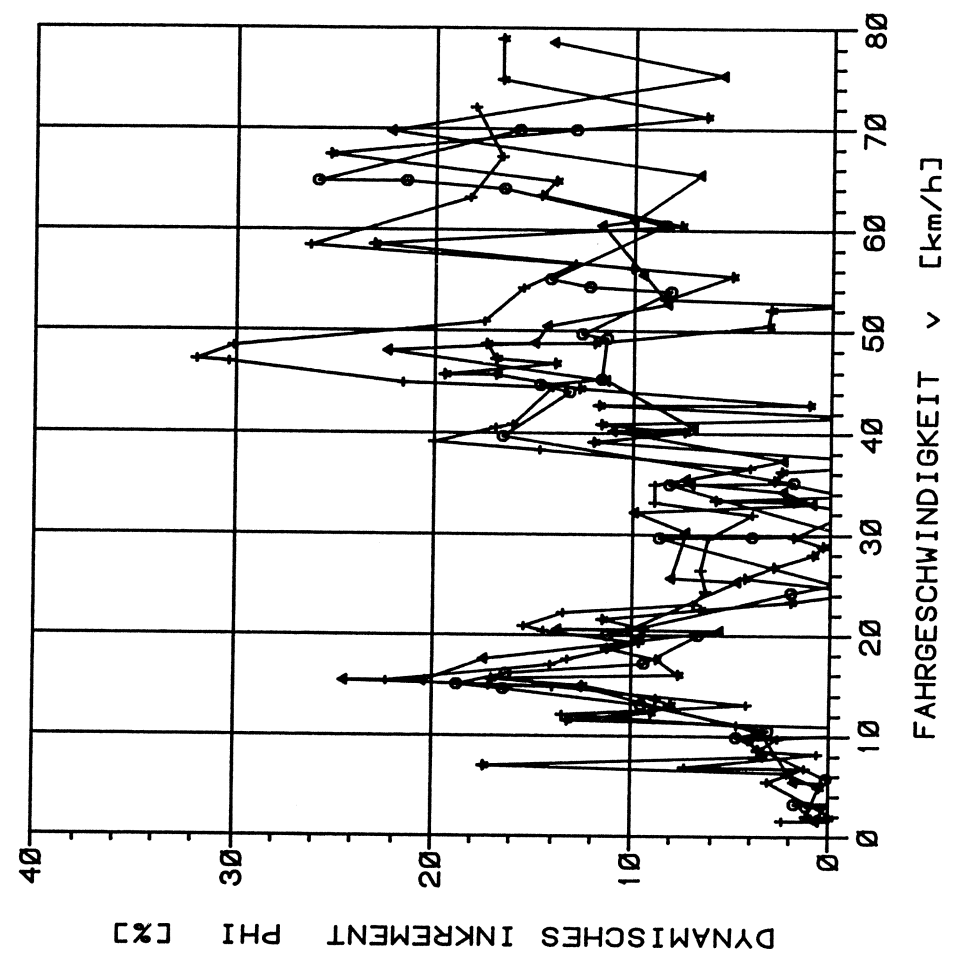
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22 2MN 10 oA	29.69 MI	19.76	54.5
+	DMS 22 4MN 10 oA	31.13 MI	15.22	57.3



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 21

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 21 20R 10 KoA	23.82 MI	25.80	64.7
+	DMS 21 21R 10 KoA	23.83 MI	25.27	67.4
+	DMS 21 24R 10 KoA	23.73 MI	31.92	47.1
+	DMS 21 25R 10 KoA	20.37 MI	24.34	15.4

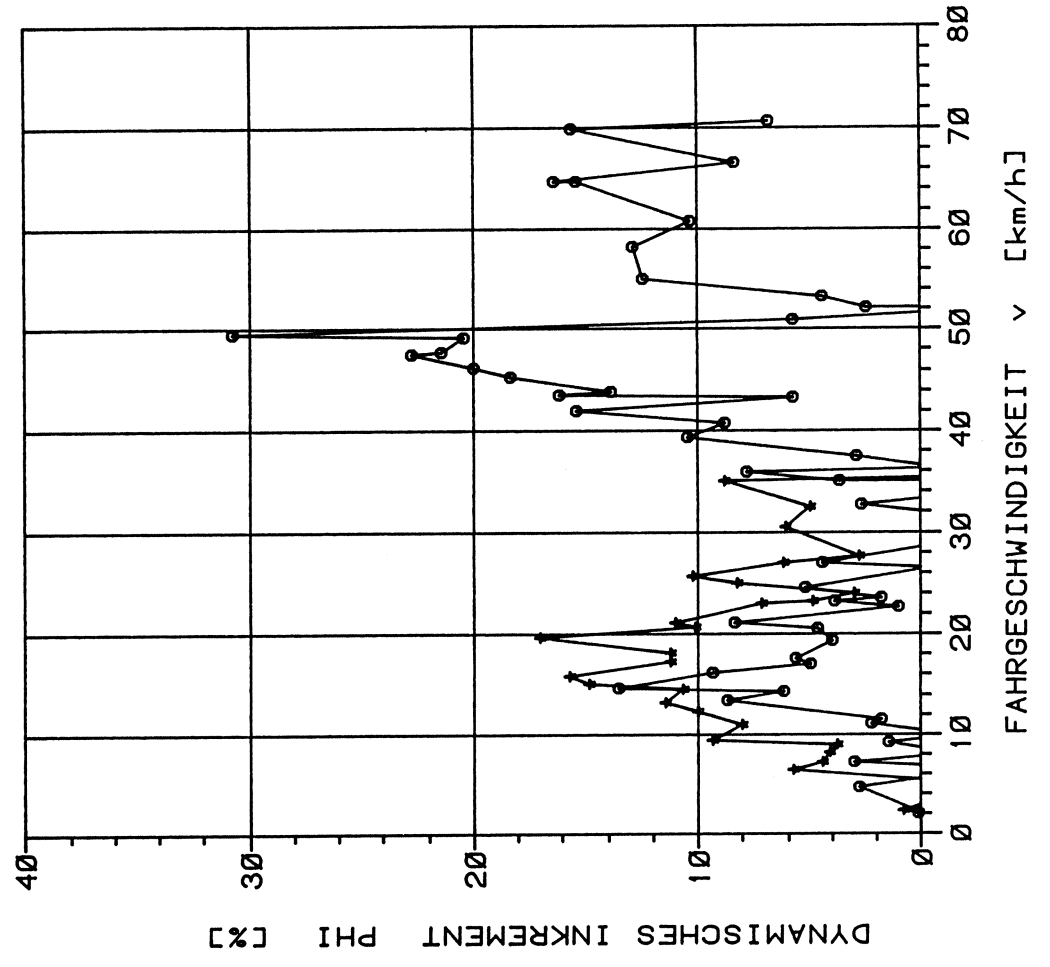
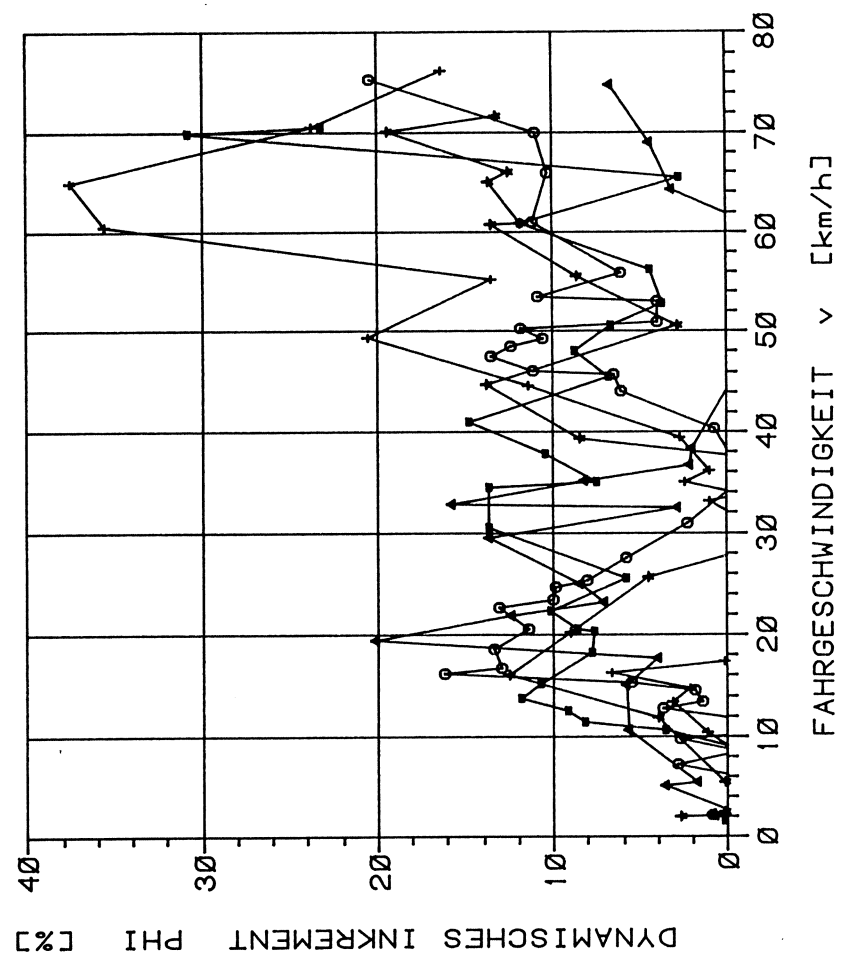


ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 21

MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 21

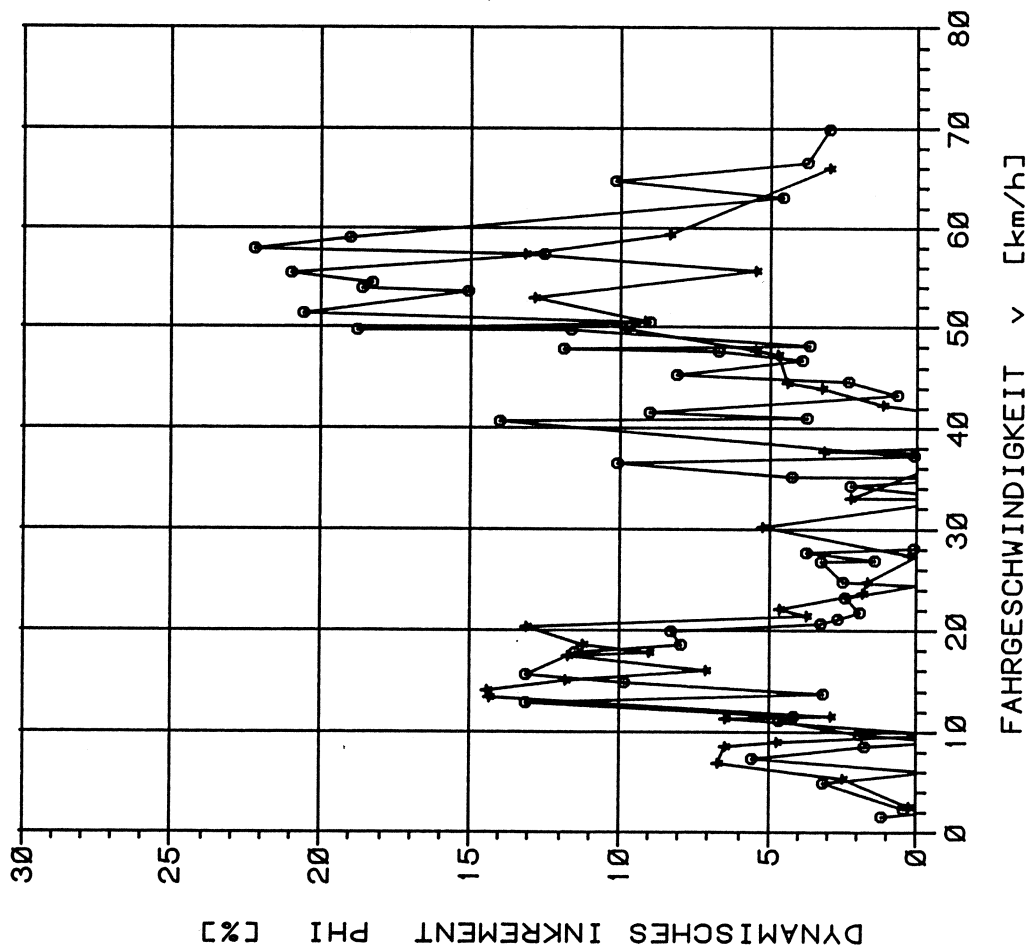
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 21	42R 10 KoA	16.91 MI	75.2
+	DMS 21	52R 10 KoA	27.05 MI	70.0
+	DMS 21	71R 10 KoA	15.20 MI	64.8
+	DMS 21	74R 10 KoA	17.07 MI	19.5
+	DMS 21	76R 10 KoA	21.60 MI	69.8

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 21	2MH 10 KoA	25.77 MI	49.4
+	DMS 21	4MH 10 KoA	25.17 MI	19.6



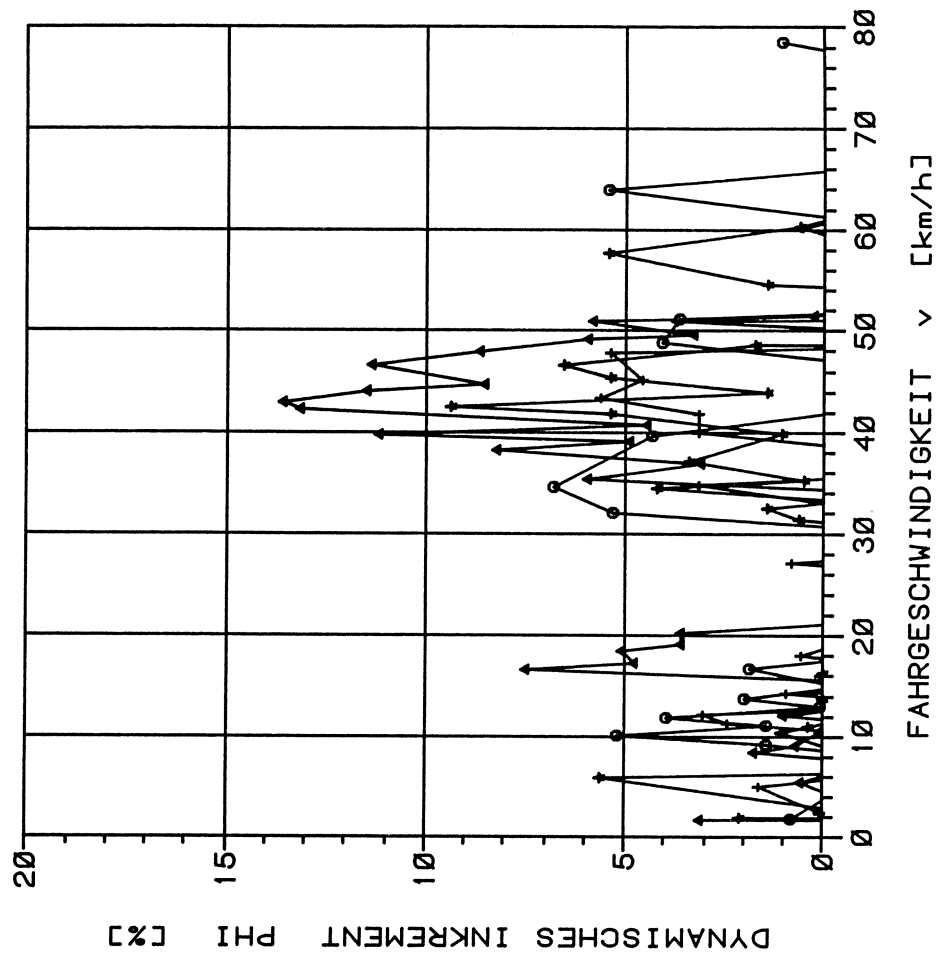
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 21

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 21	2MN 10 oA	26.74 MI	57.9
+	DMS 21	4MN 10 oA	28.26 MI	14.0



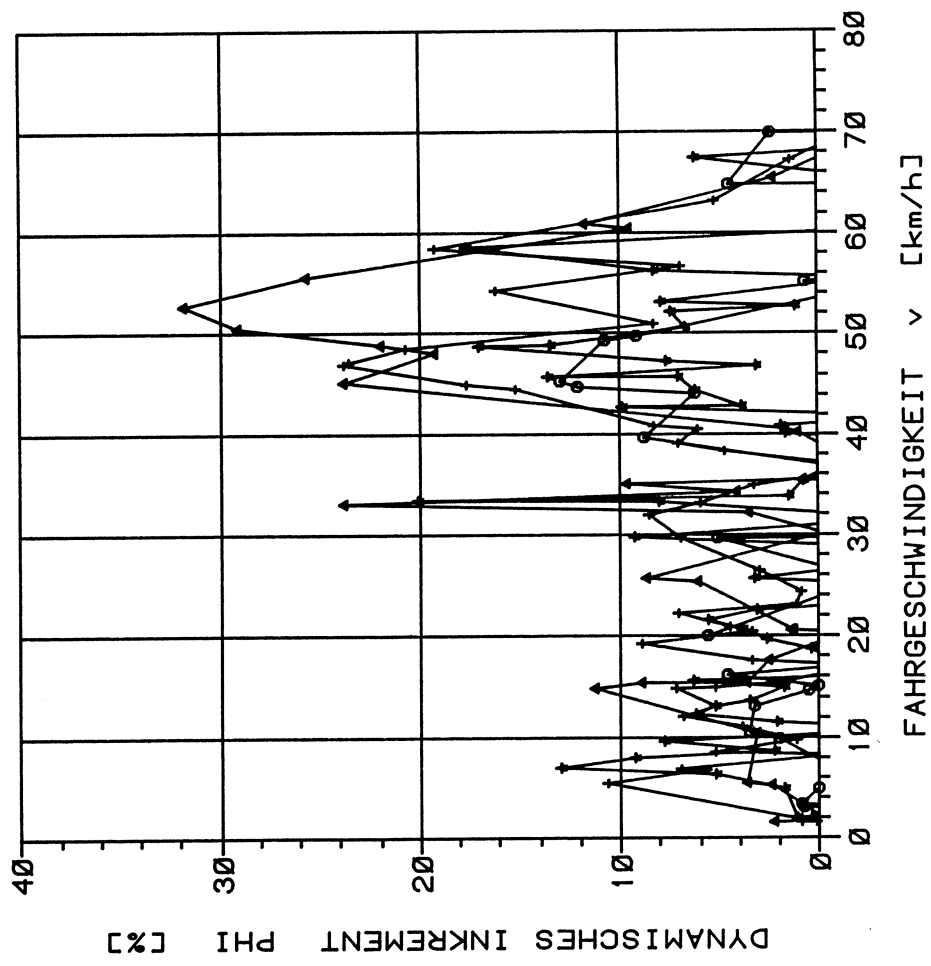
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 20

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 20	11R 10 KoA	14.49 MI	34.6
+	DMS 20	12R 10 KoA	15.16 MI	42.4
+	DMS 20	13R 10 KoA	15.31 MI	43.4
+	DMS 20	14R 10 KoA	13.37 MI	42.9



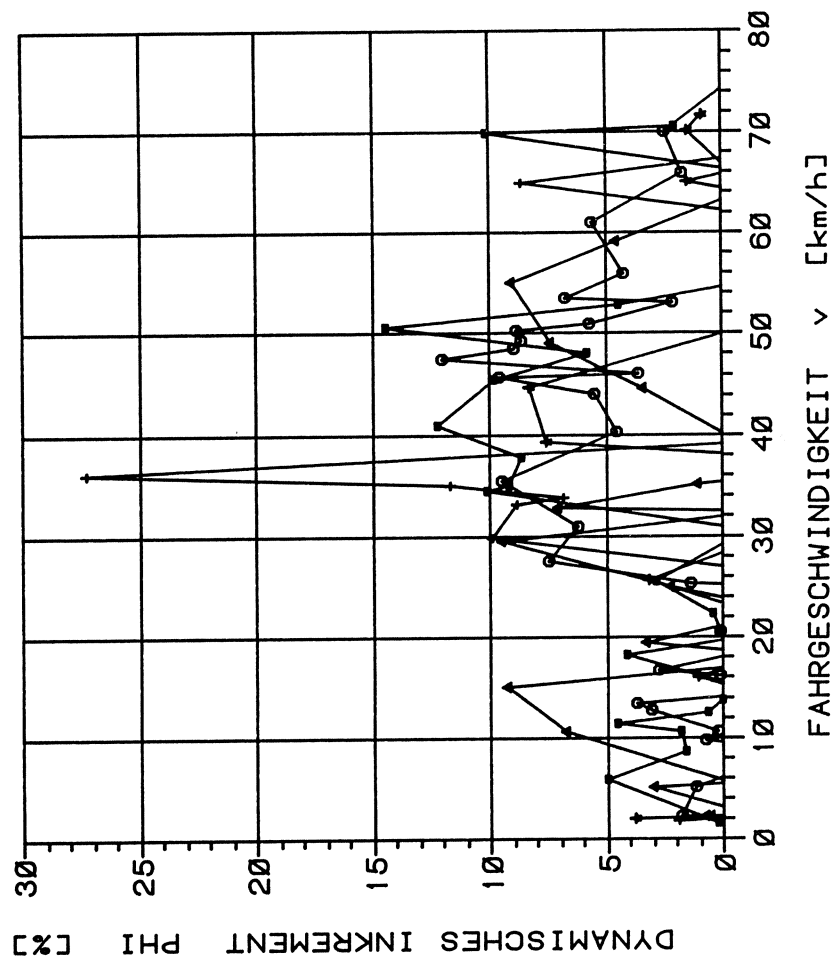
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 20

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	20R 10 KoA	25.17 MI	12.96	45.2
↑—↑	21R 10 KoA	23.81 MI	20.11	33.4
↑—↑	24R 10 KoA	23.99 MI	23.80	46.9
▲—▲	25R 10 KoA	19.78 MI	31.73	52.6



ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 20

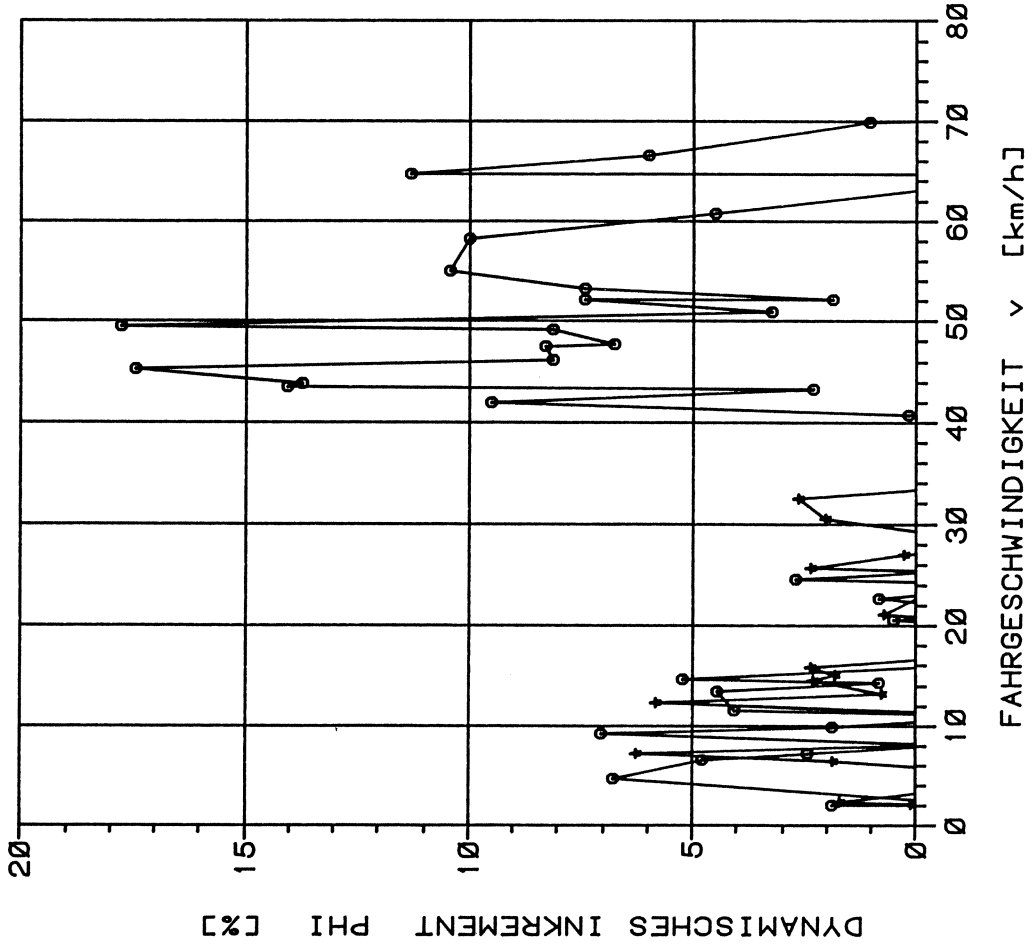
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	42R 10 KoA	15.82 MI	12.04	47.5
↑—↑	52R 10 KoA	26.56 MI	8.30	44.7
↑—↑	71R 10 KoA	14.55 MI	27.27	36.0
▲—▲	74R 10 KoA	16.20 MI	9.49	29.5
—	76R 10 KoA	21.58 MI	14.47	50.6



A6.83
A6.82

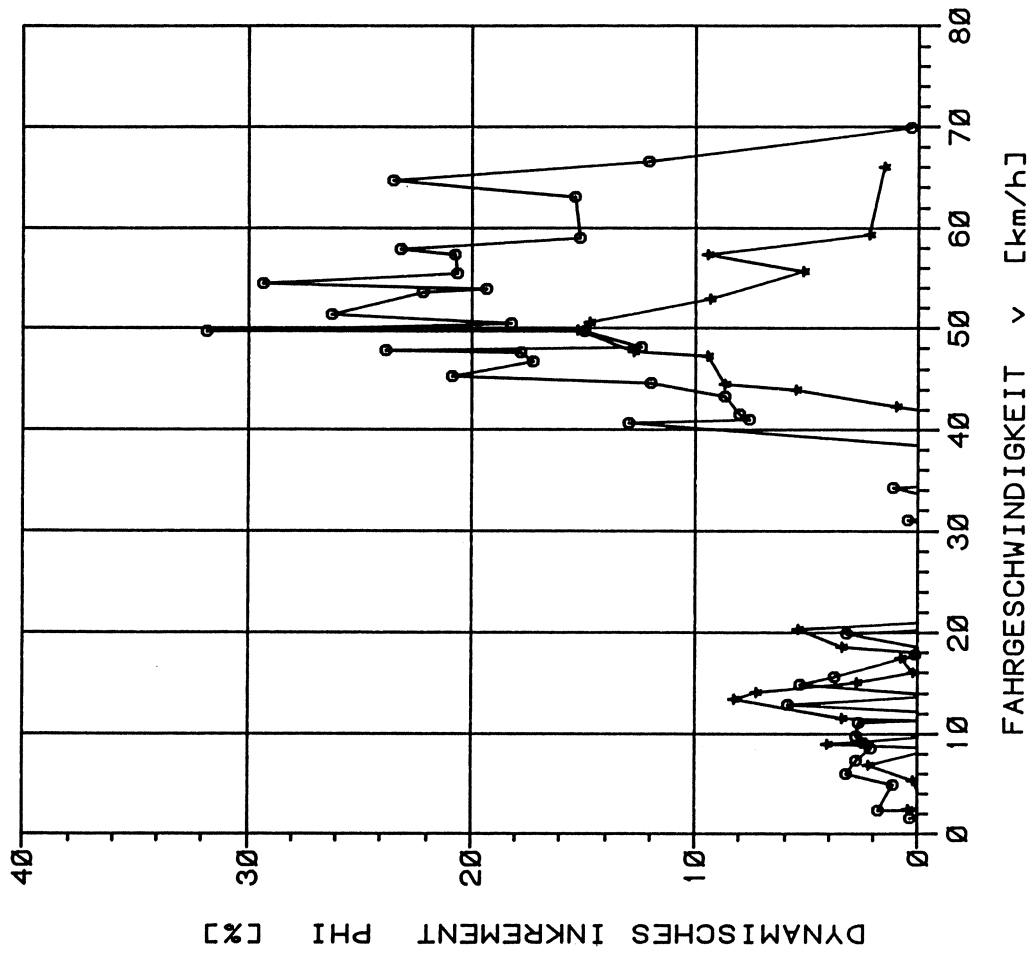
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 20
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 20

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	
○—○	DMS 20	2MH 10 KoA	24.56 MI	17.73	49.4
—+—	DMS 20	4MH 10 KoA	24.48 MI	6.23	7.2



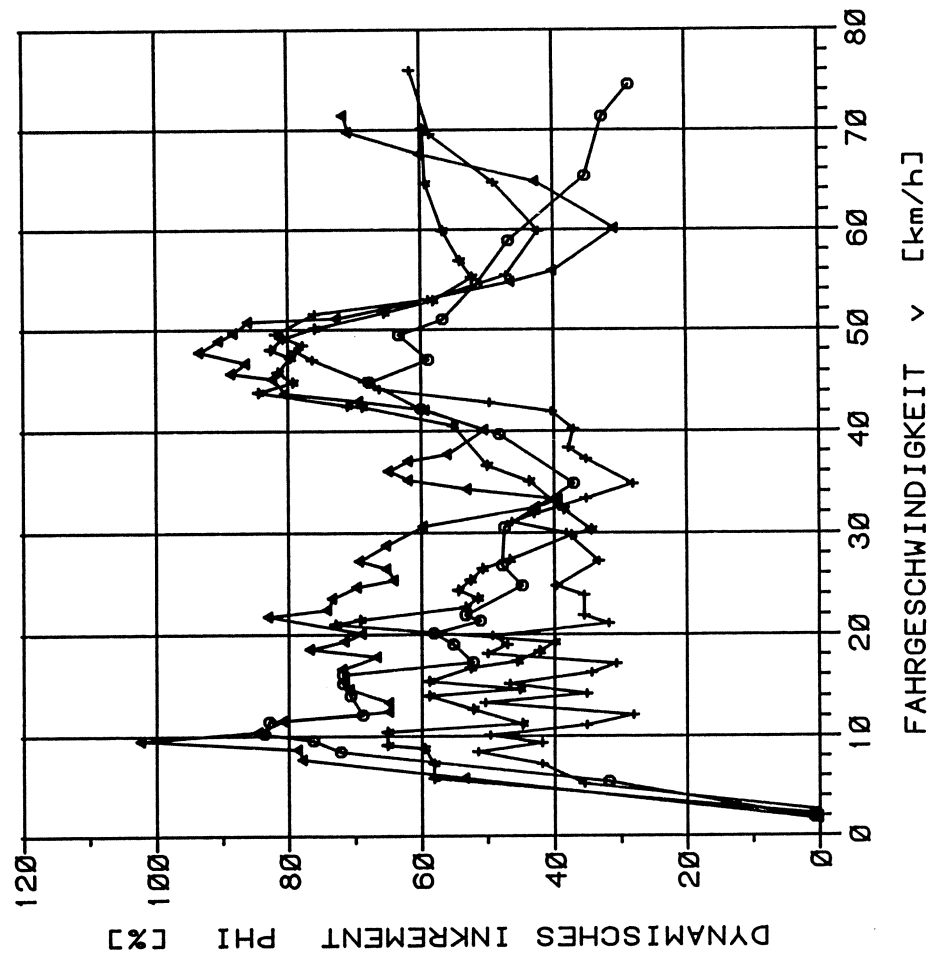
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 20
MEHRERE FZ. NEBENEINANDER, 10 BAR, DMS 20

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	
○—○	DMS 20	2MN 10 oA	24.40 MI	31.79	49.6
—+—	DMS 20	4MN 10 oA	24.96 MI	15.20	49.8



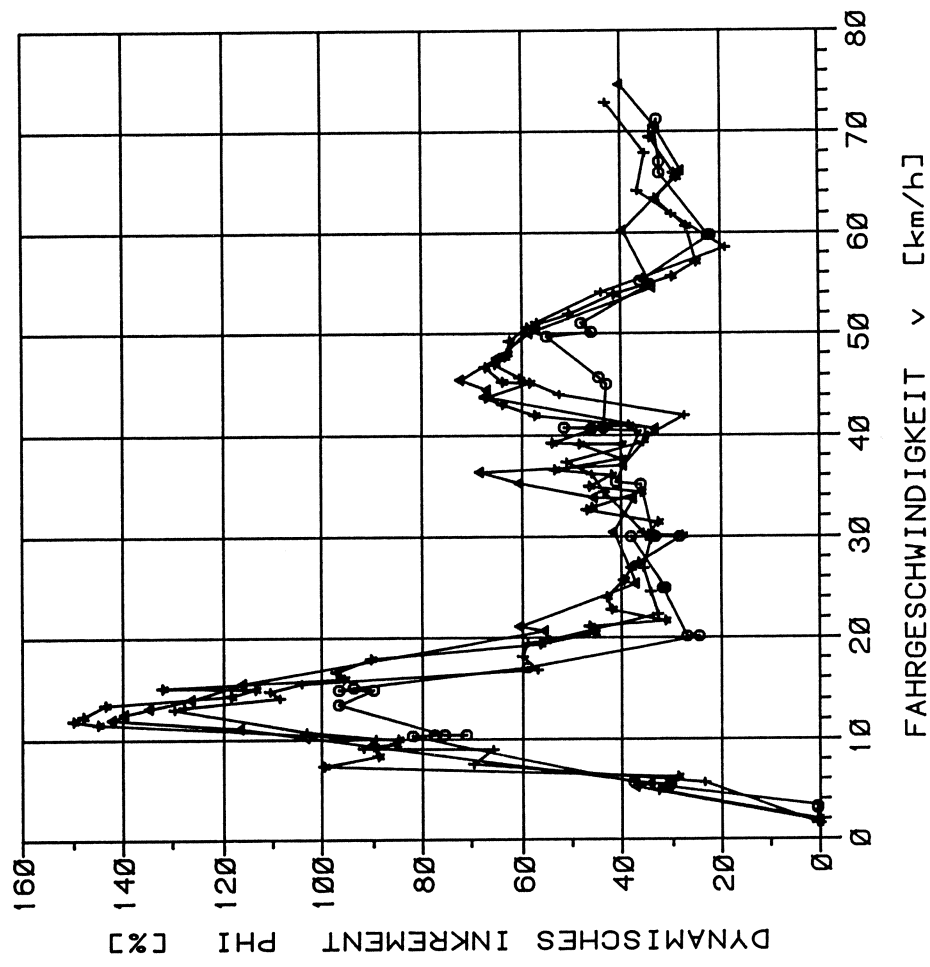
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 01

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	11R 10 KmA	-1.80 MM	83.52	10.2
→—	12R 10 KmA	-1.74 MM	84.27	43.8
↑—	13R 10 KmA	-1.79 MM	81.56	49.6
▲—	14R 10 KmA	-1.68 MM	102.03	9.5



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG 01

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	20R 10 KmA	-2.94 MM	96.26	14.8
→—	21R 10 KmA	-2.84 MM	149.61	11.8
↑—	24R 10 KmA	-3.20 MM	129.45	12.9
▲—	25R 10 KmA	-2.89 MM	141.59	11.9

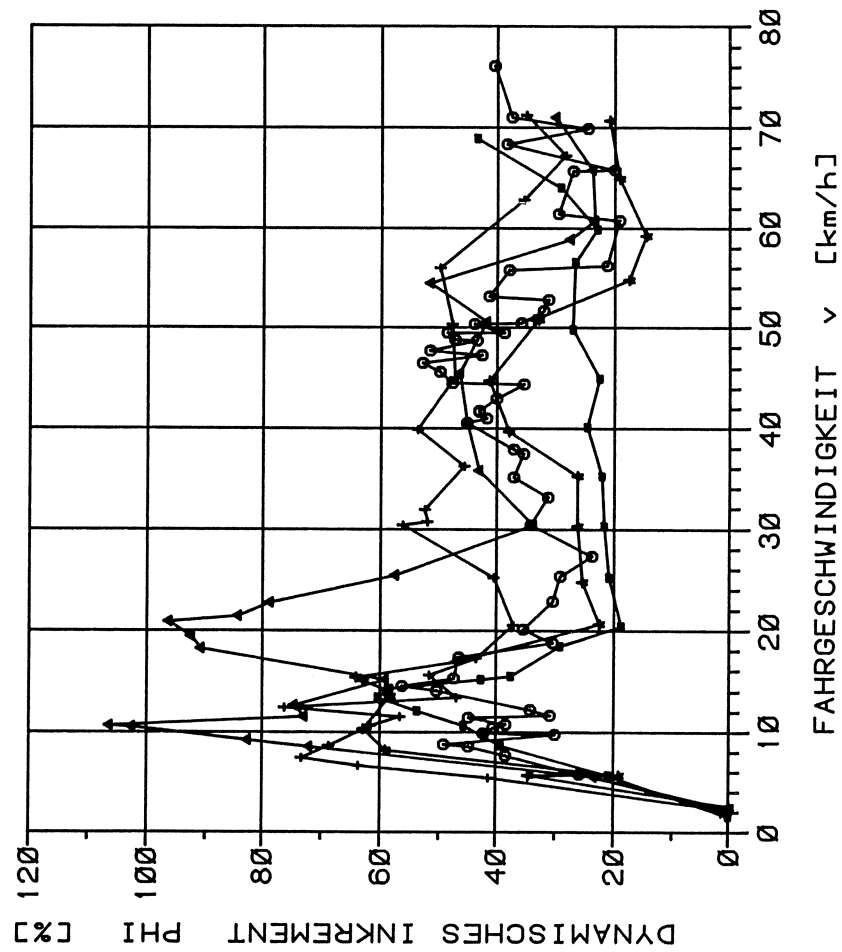


ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø1

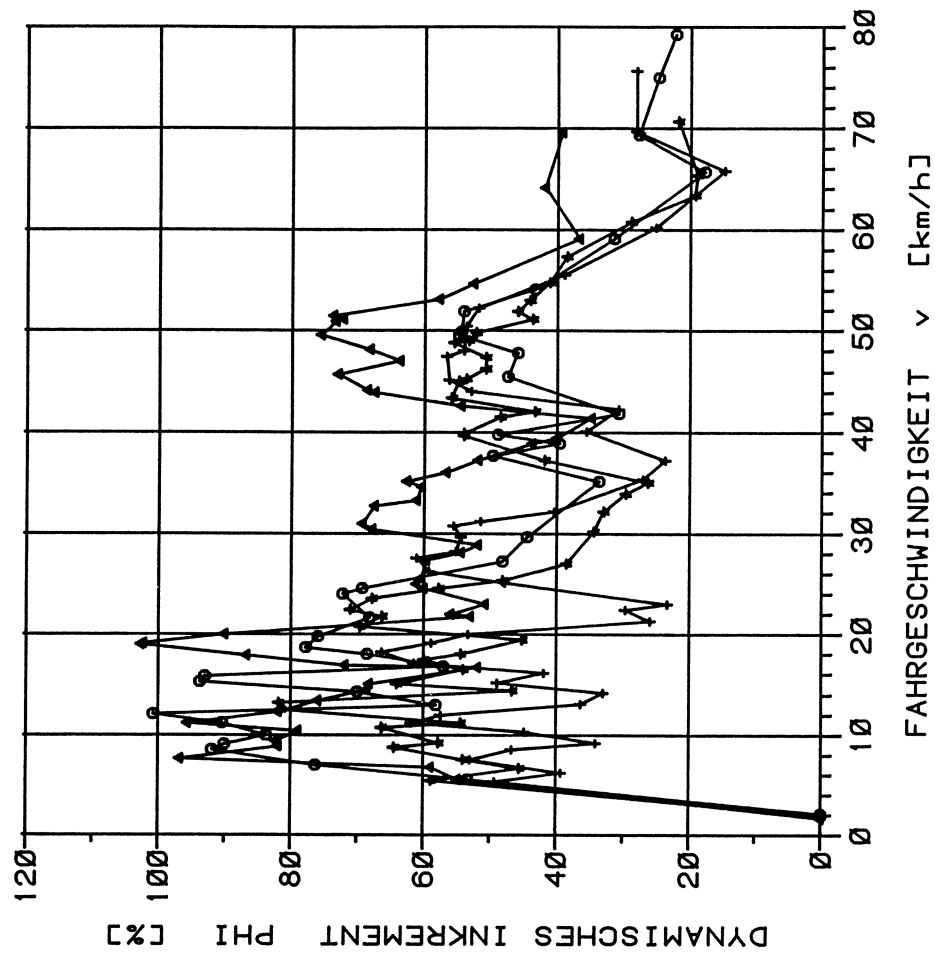
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø2

A6.87
A6.86

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	42R 10 KmA	-2.75 MM	55.79
+	WG Ø1	52R 10 KmA	-4.07 MM	64.21
+	WG Ø1	71R 10 KmA	-2.46 MM	76.01
+	WG Ø1	74R 10 KmA	-2.98 MM	106.24
+	WG Ø1	76R 10 KmA	-3.68 MM	60.31

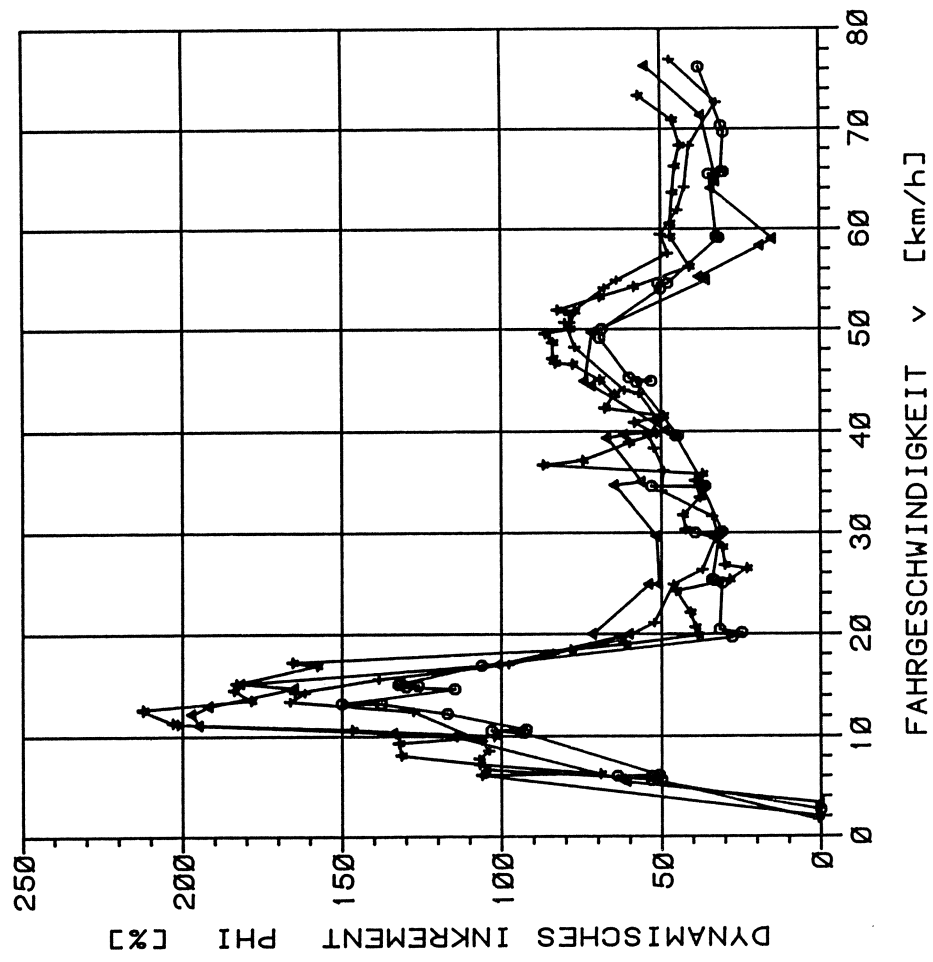


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	11R 10 AmA	-1.05 MM	100.57
+	WG Ø2	12R 10 AmA	-1.03 MM	81.65
+	WG Ø2	13R 10 AmA	-1.03 MM	66.04
+	WG Ø2	14R 10 AmA	-1.01 MM	102.17



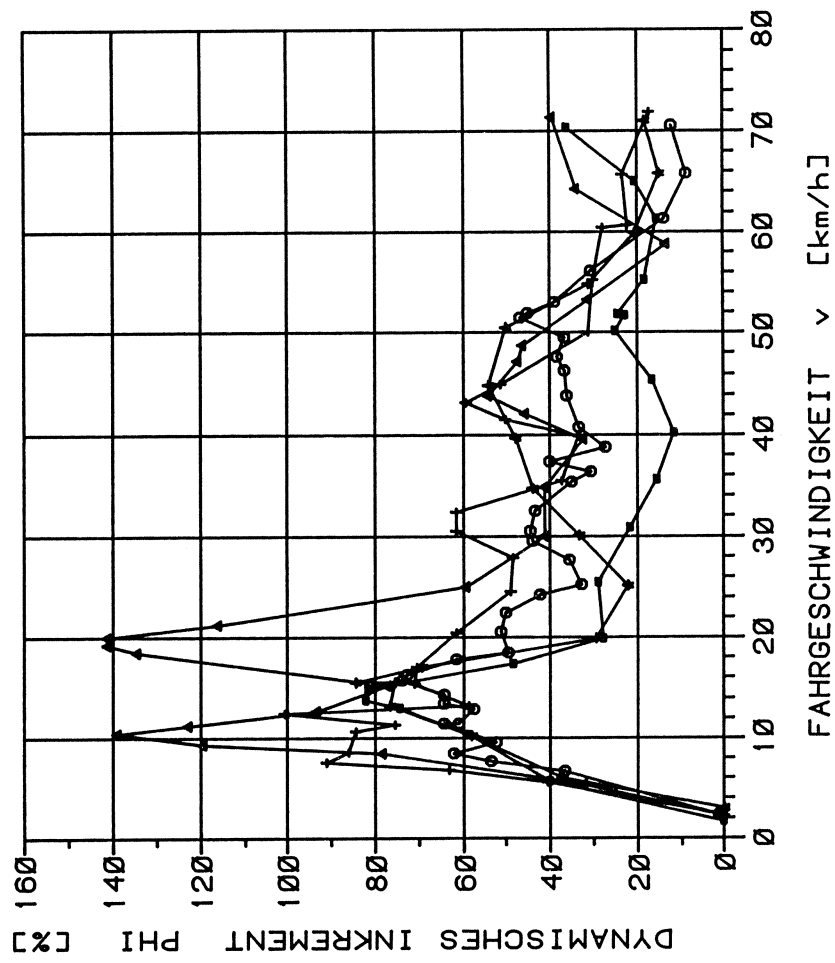
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	20R 10 AmA	-1.75 MM	149.80
+	WG Ø2	21R 10 AmA	-1.68 MM	212.47
+	WG Ø2	24R 10 AmA	-1.88 MM	166.24
▲	WG Ø2	25R 10 AmA	-1.76 MM	196.94



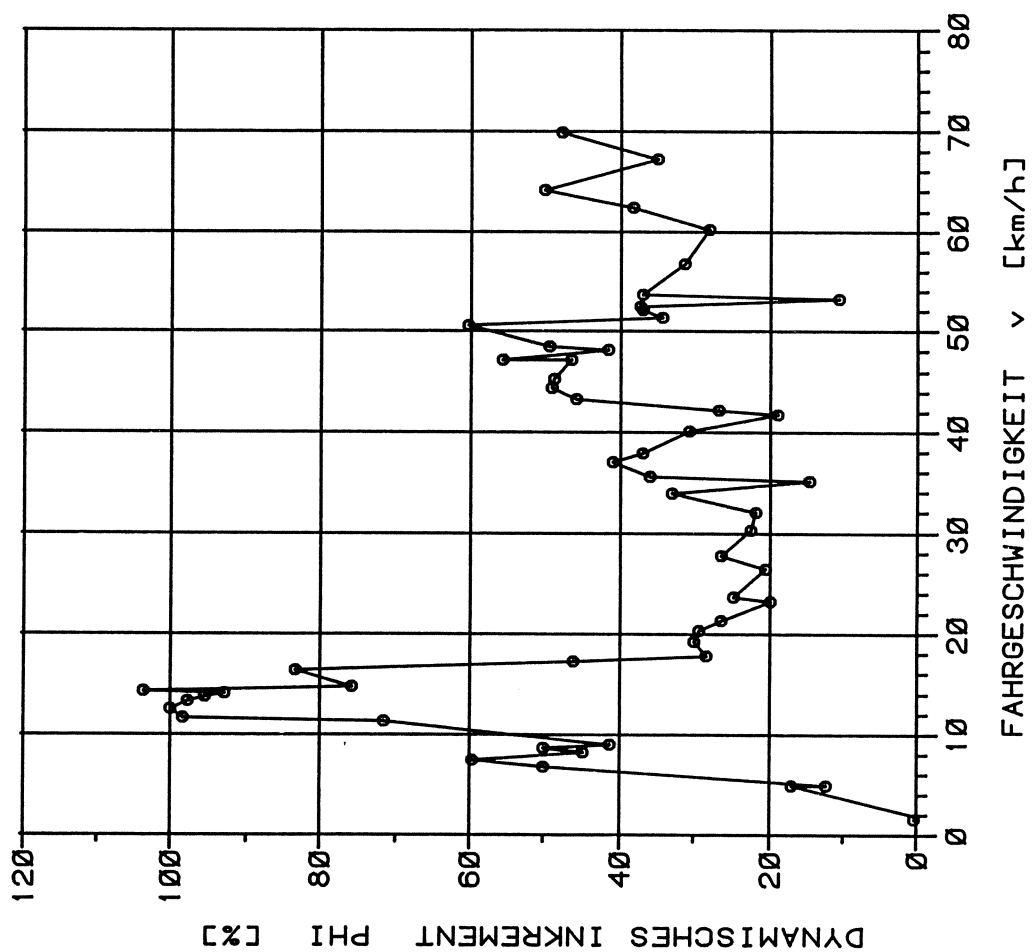
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	42R 10 AmA	-1.72 MM	73.79
+	WG Ø2	52R 10 AmA	-2.52 MM	84.38
+	WG Ø2	71R 10 AmA	-1.51 MM	100.55
▲	WG Ø2	74R 10 AmA	-1.83 MM	141.18
■	WG Ø2	76R 10 AmA	-2.22 MM	81.76



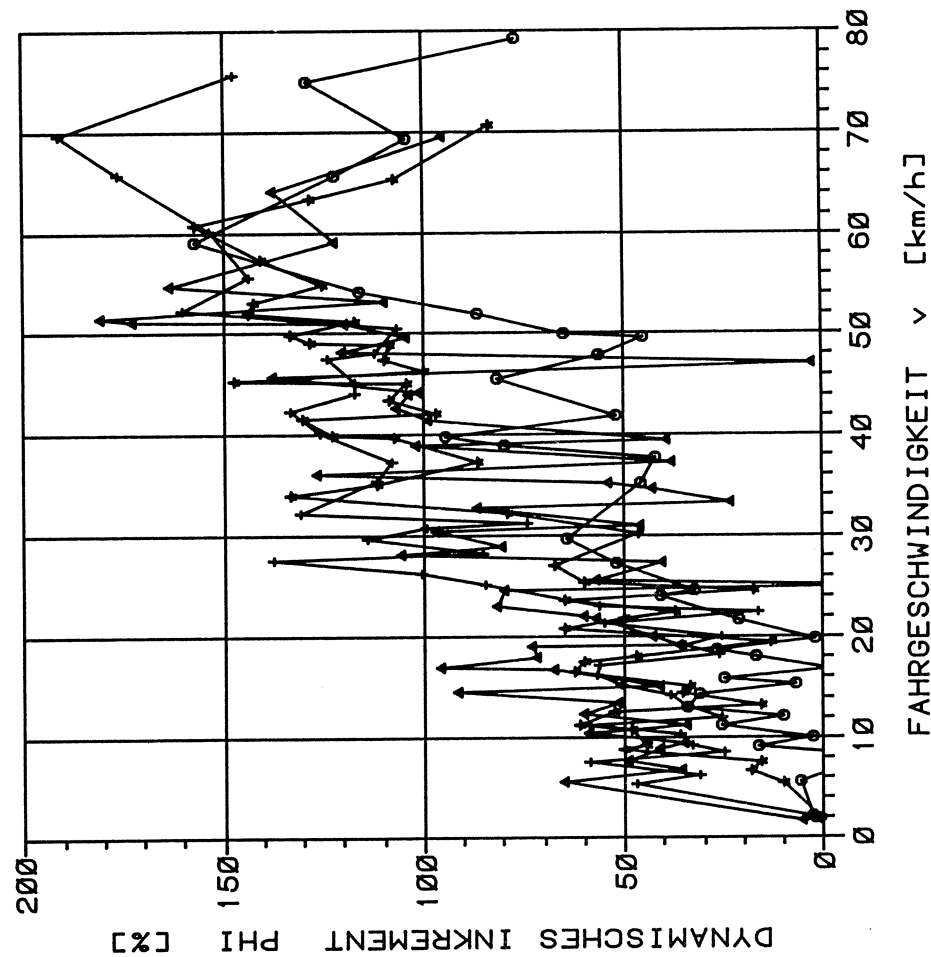
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, WG Ø2

INSTRUM. SERIE ASTAT PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
 ○ WG Ø2 2MH 10 A_{MA} -3.21 MM 103.65 14.2



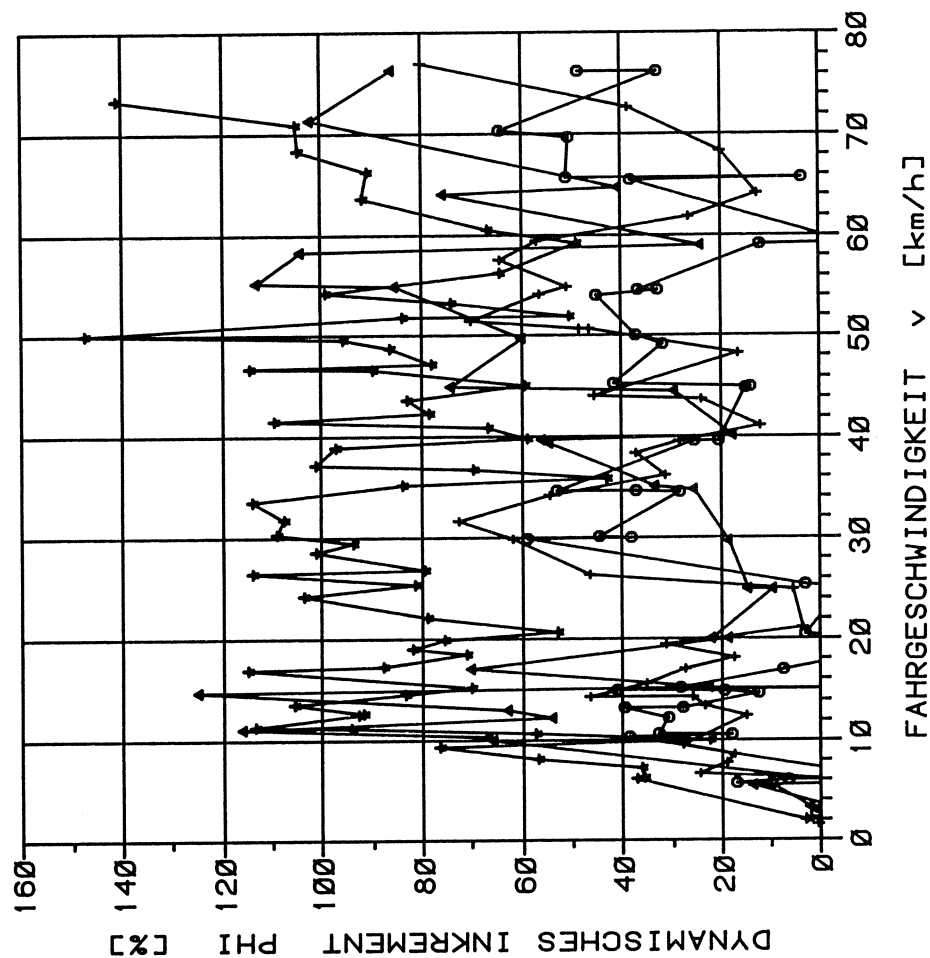
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 32

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AmA	7.75 MI	156.78	59.1
→—→	12R 10 AmA	6.47 MI	157.07	60.7
+—+	13R 10 AmA	5.93 MI	190.88	69.6
▲—▲	14R 10 AmA	6.62 MI	180.34	51.5



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 32

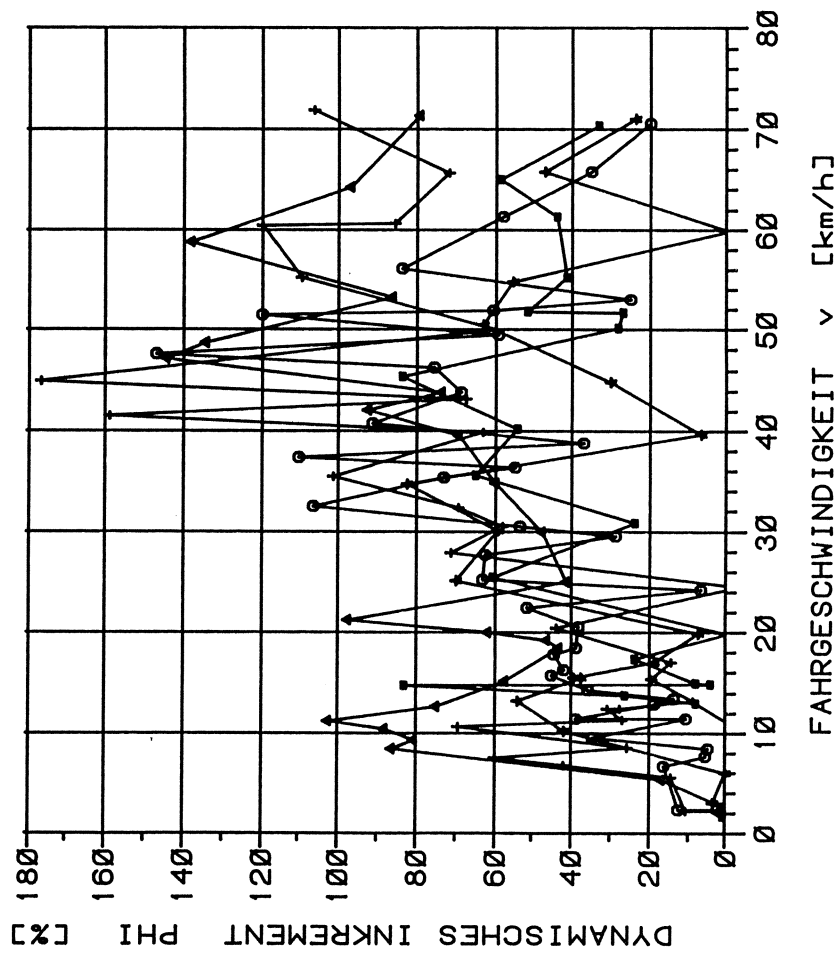
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	20R 10 AmA	13.29 MI	64.24	70.3
→—→	21R 10 AmA	8.96 MI	147.34	50.0
+—+	24R 10 AmA	10.34 MI	79.60	76.9
▲—▲	25R 10 AmA	10.97 MI	124.54	14.7



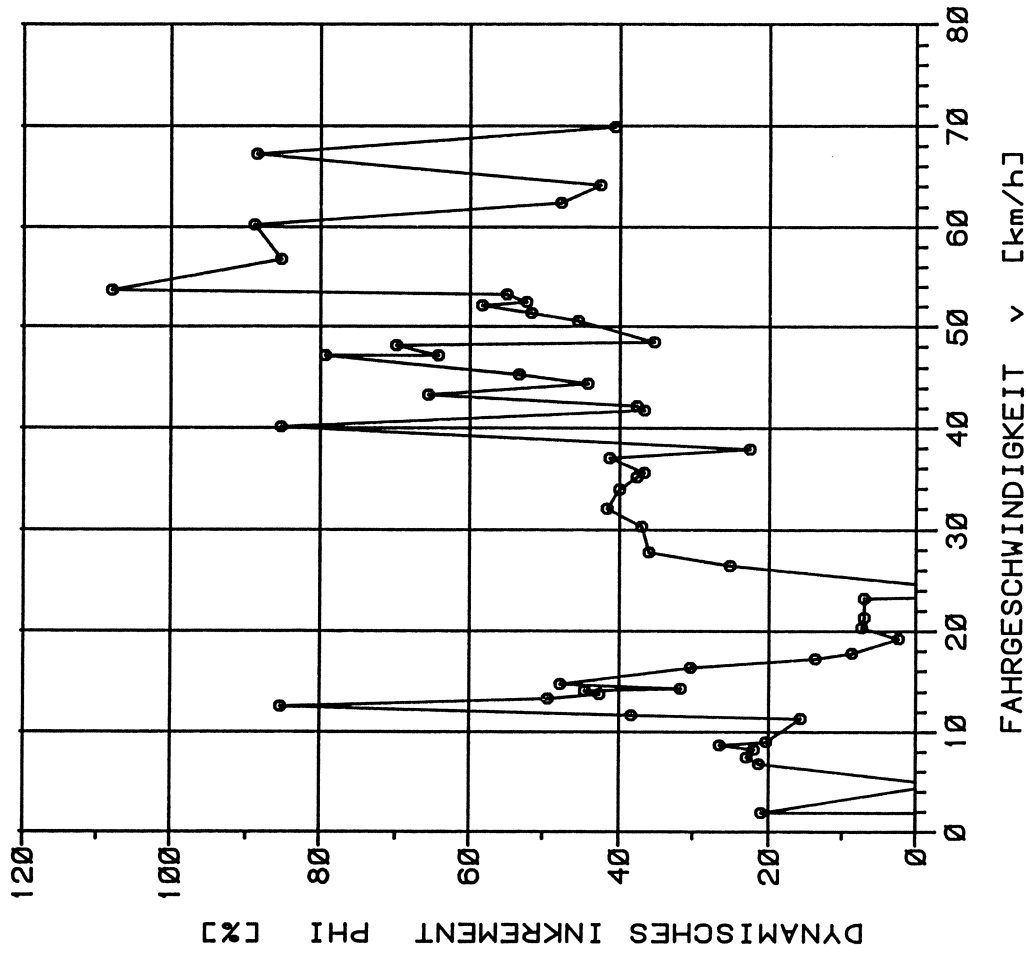
ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 32 MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 32

A6.94
A6.93

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	
○—○	DMS 32	42R 10 AmA	9.74 MI	146.45	47.6
↑—↑	DMS 32	52R 10 AmA	13.35 MI	82.31	34.6
↑—↑	DMS 32	71R 10 AmA	6.48 MI	176.33	44.9
▲—▲	DMS 32	74R 10 AmA	6.09 MI	144.02	47.1
■—■	DMS 32	76R 10 AmA	6.82 MI	83.56	45.4

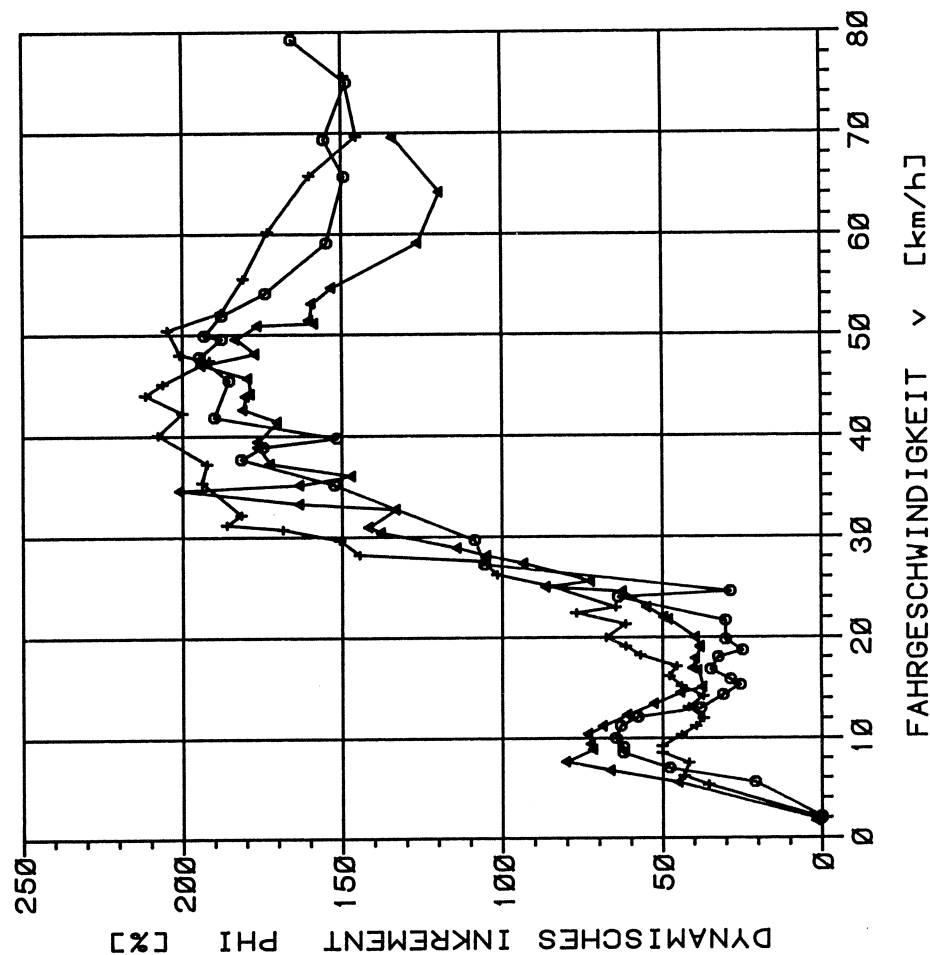


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	
○—○	DMS 32	2MH 10 AmA	13.21 MI	107.71	53.6



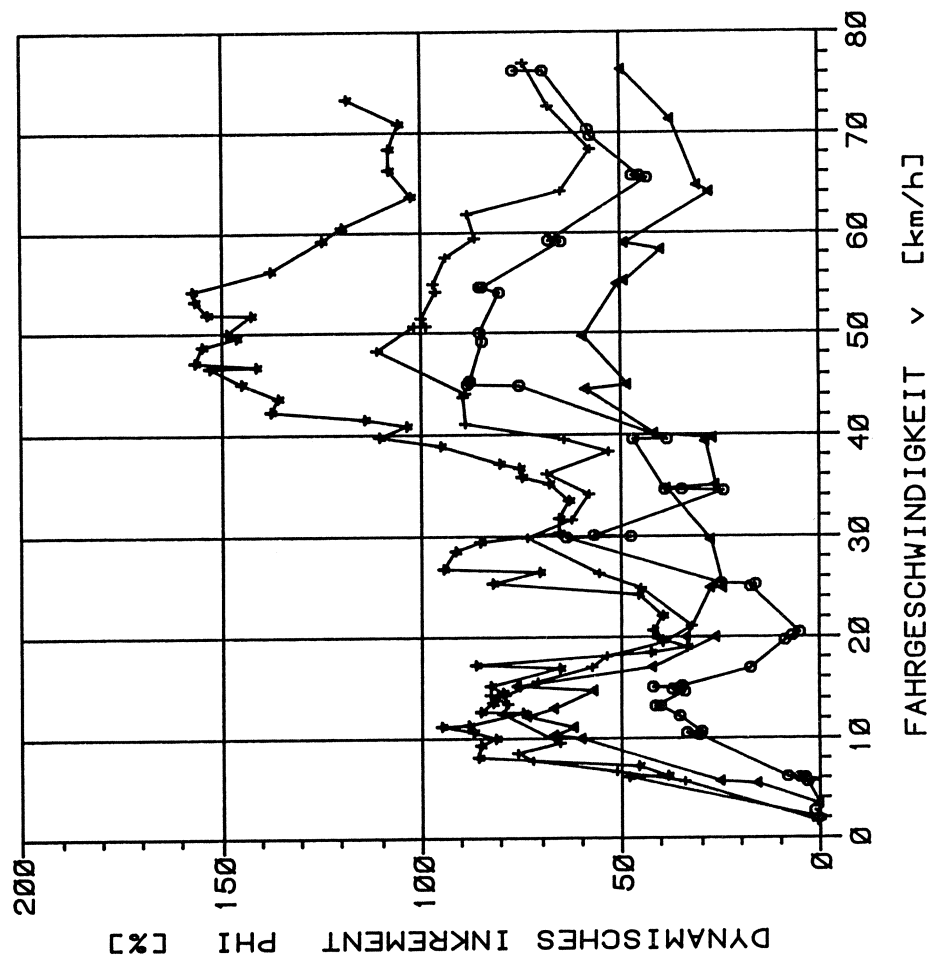
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	11R 10 AmA	9.05 MI	194.98
+	DMS 42	13R 10 AmA	8.94 MI	211.67
▲	DMS 42	14R 10 AmA	9.17 MI	200.82



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	20R 10 AmA	16.74 MI	88.01
+	DMS 42	21R 10 AmA	10.25 MI	156.85
+	DMS 42	24R 10 AmA	15.81 MI	110.80
▲	DMS 42	25R 10 AmA	14.63 MI	75.67

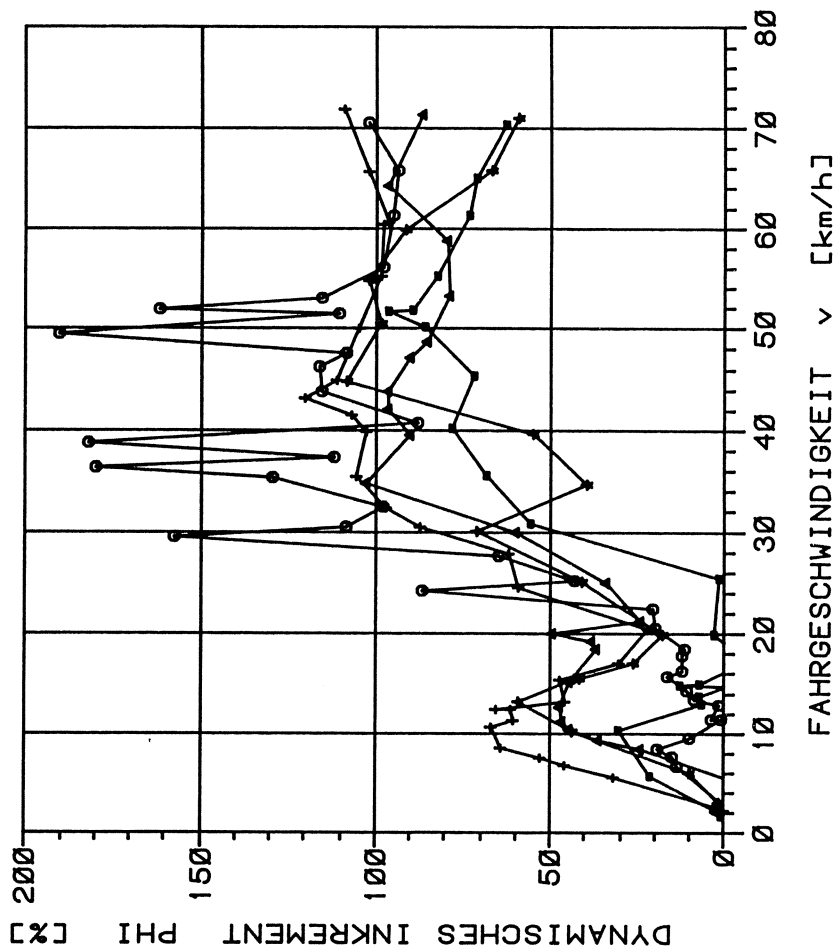


ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 42

MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 42

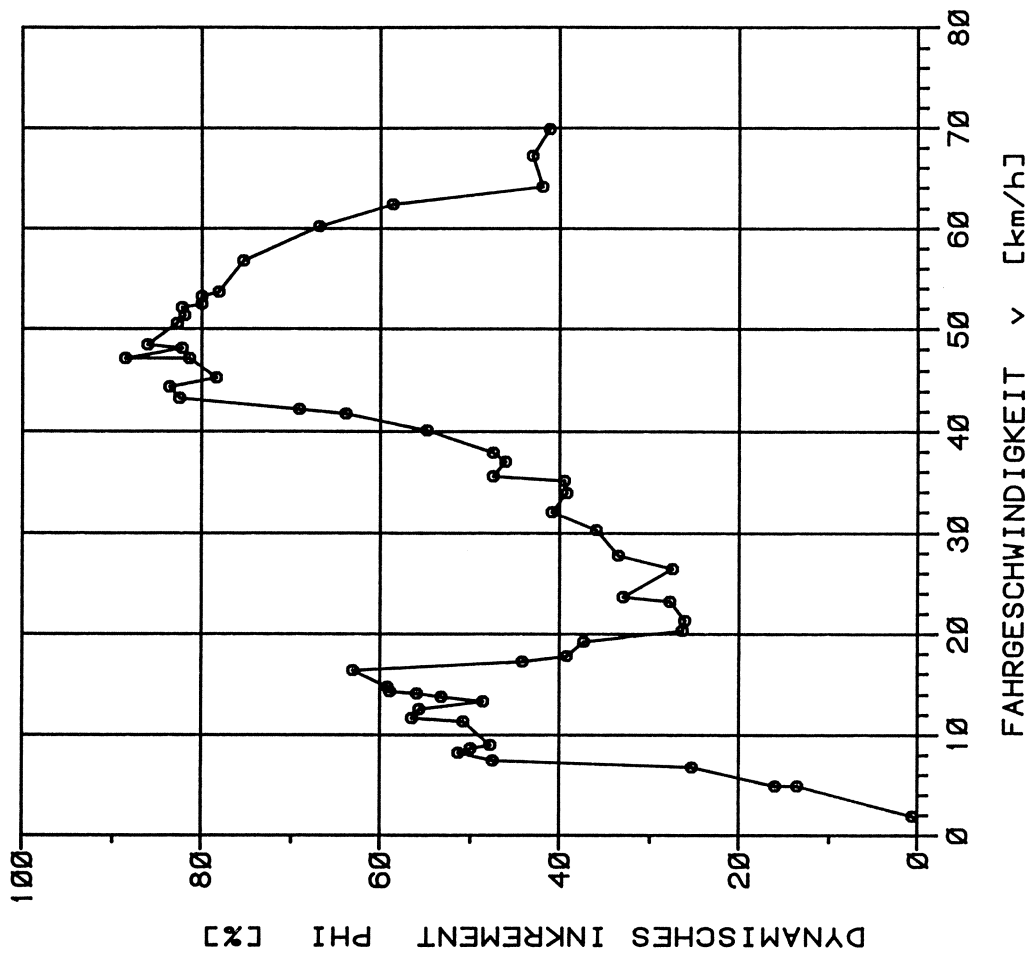
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
—○—	DMS 42	42R 10 AmA	7.32 MI	190.33
—+—	DMS 42	52R 10 AmA	15.05 MI	108.32
—+—	DMS 42	71R 10 AmA	9.72 MI	120.15
—▲—	DMS 42	74R 10 AmA	11.62 MI	102.27
—■—	DMS 42	76R 10 AmA	10.25 MI	96.48

49.4
44.8
43.1
34.7
51.7



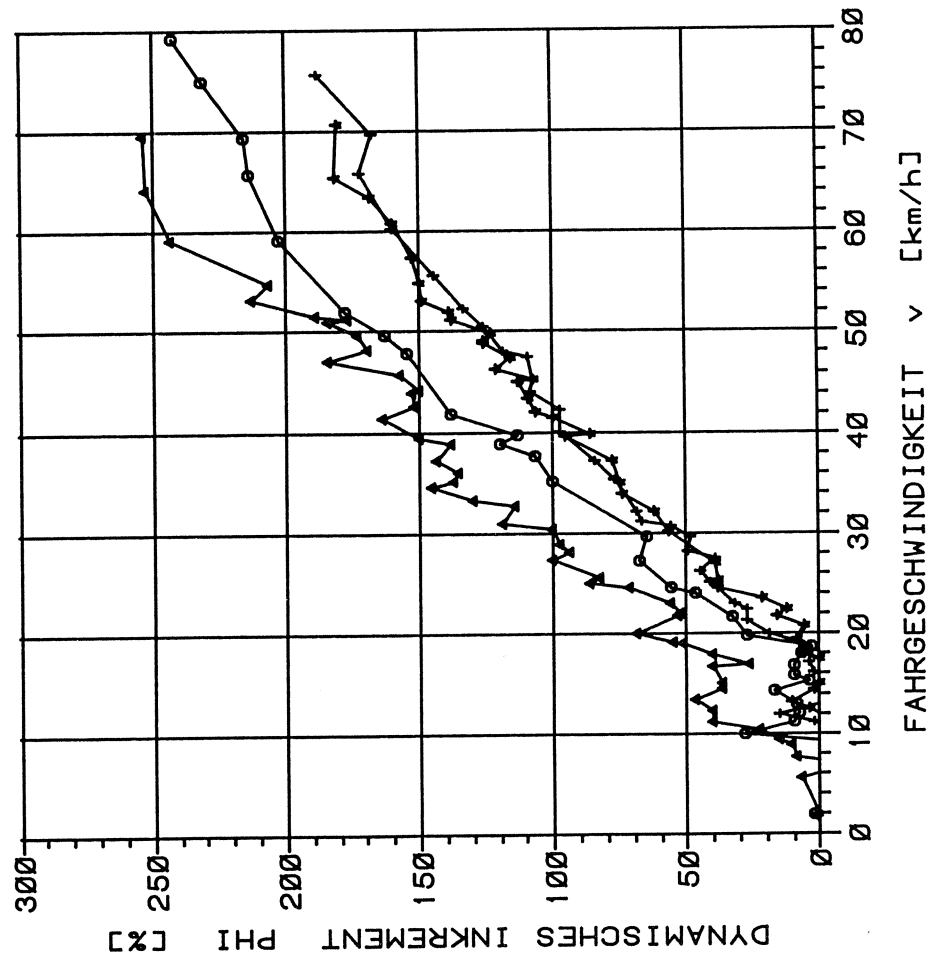
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
—○—	DMS 42	2MH 10 AmA	18.52 MI	88.45

47.1

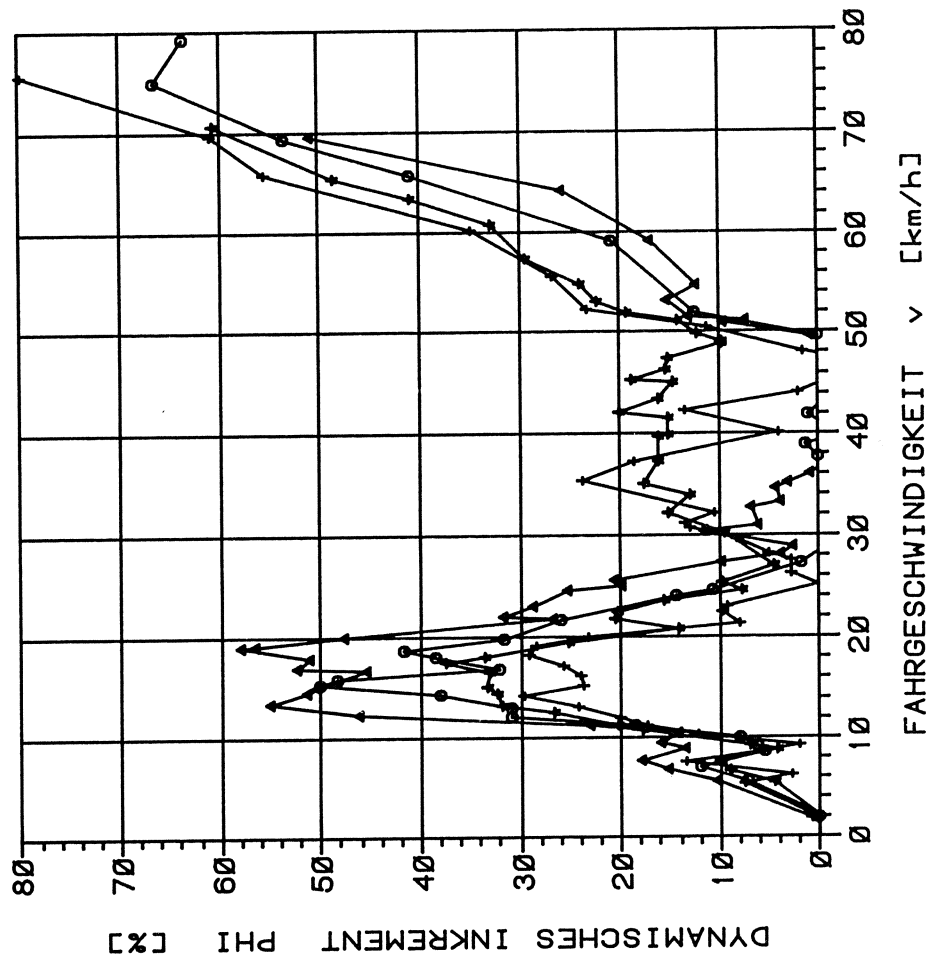


ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52+ ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AmA	13.19 MI	241.89	79.3
✚—✚	12R 10 AmA	16.57 MI	181.03	65.3
✚—✚	13R 10 AmA	16.25 MI	187.43	75.6
✚—✚	14R 10 AmA	12.92 MI	252.70	69.5



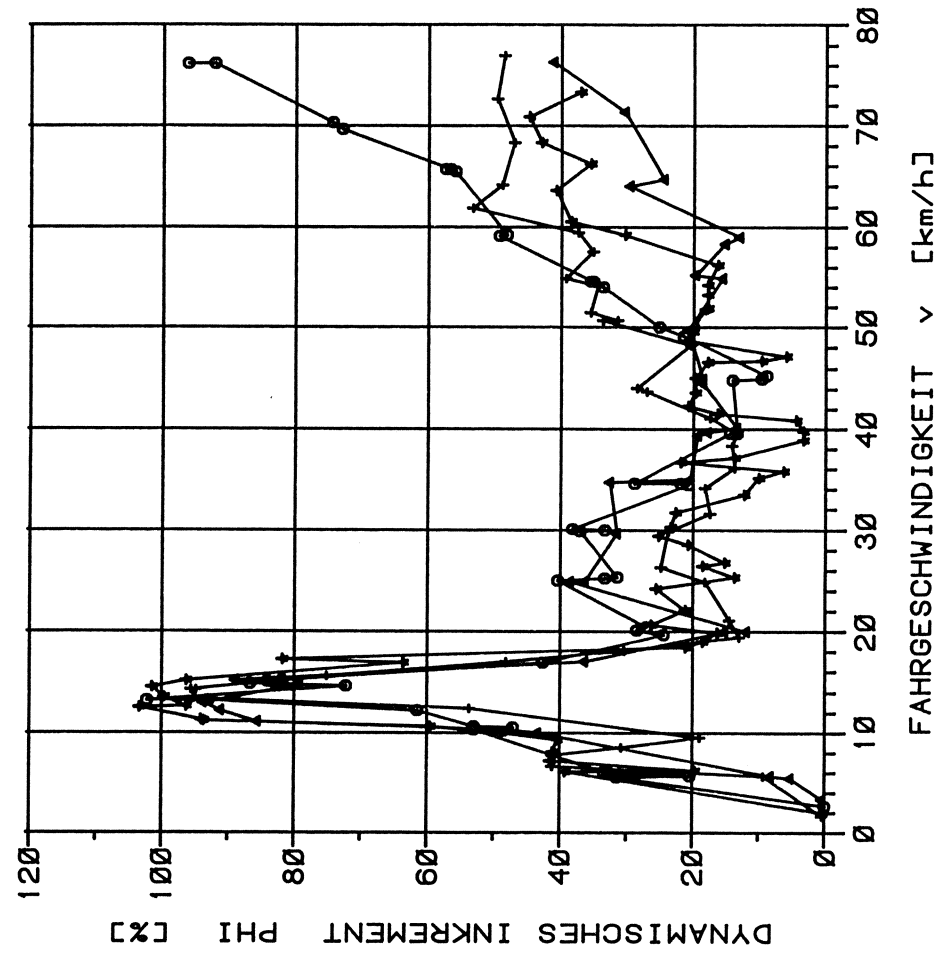
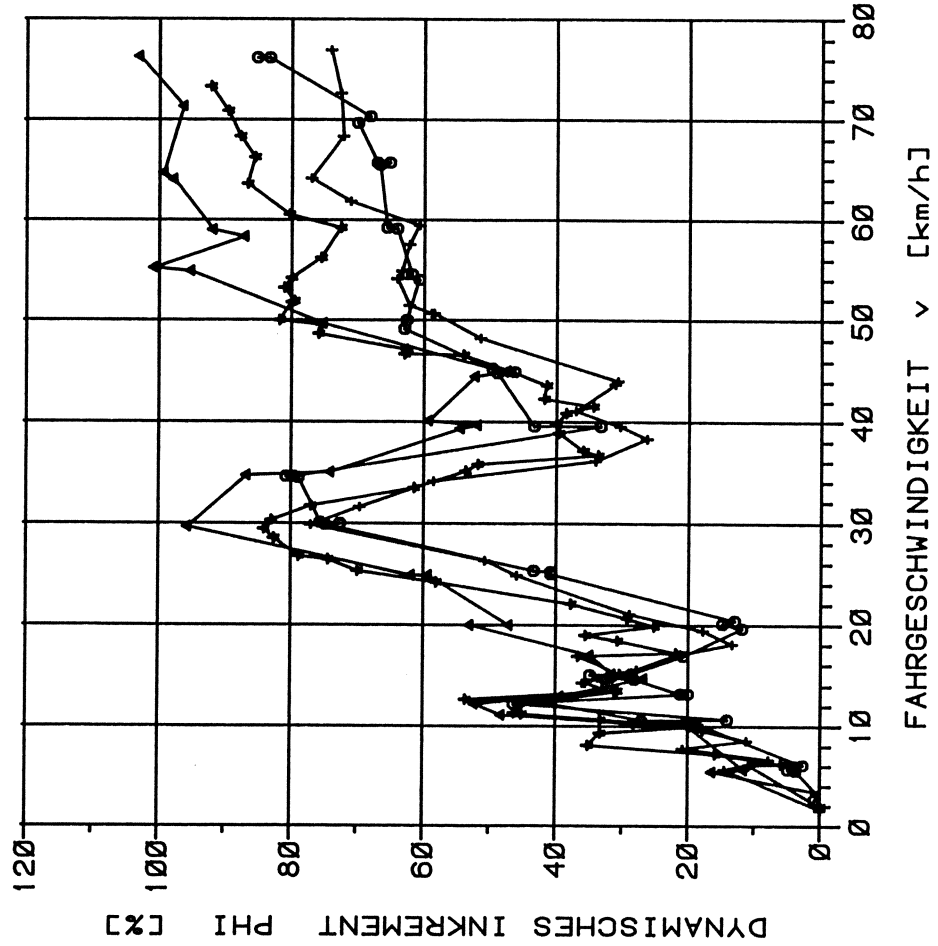
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AmA	-17.16 MI	66.34	74.9
✚—✚	12R 10 AmA	-16.78 MI	60.47	70.6
✚—✚	13R 10 AmA	-16.18 MI	79.84	75.6
✚—✚	14R 10 AmA	-15.98 MI	57.81	19.0



A6.102
A6.101

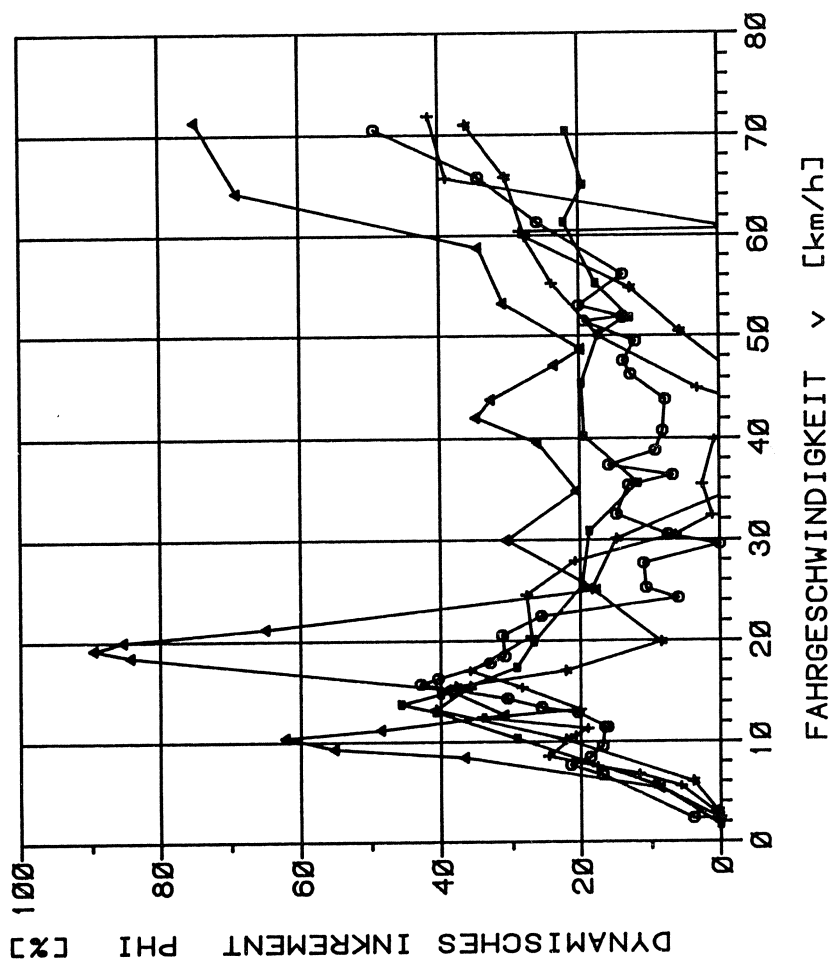
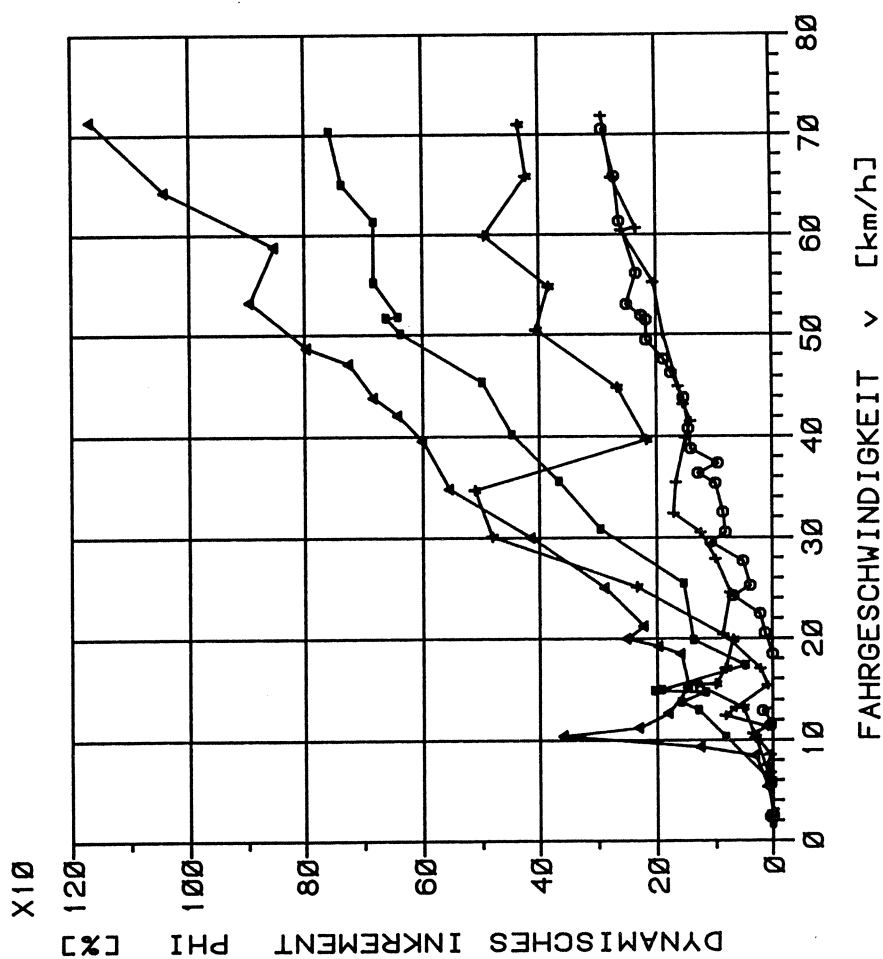
MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52+					MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52-				
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	DMS 52	20R 10 AmA	3.60 MI	849.99	○—	DMS 52	20R 10 AmA	-22.07 MI	102.05
→—	DMS 52	21R 10 AmA	3.34 MI	919.60	→—	DMS 52	21R 10 AmA	-23.58 MI	102.91
→—	DMS 52	24R 10 AmA	3.85 MI	768.17	→—	DMS 52	24R 10 AmA	-24.42 MI	95.19
→—	DMS 52	25R 10 AmA	2.74 MI	1027.60	→—	DMS 52	25R 10 AmA	-24.16 MI	93.27

X10



ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52+ ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 52-

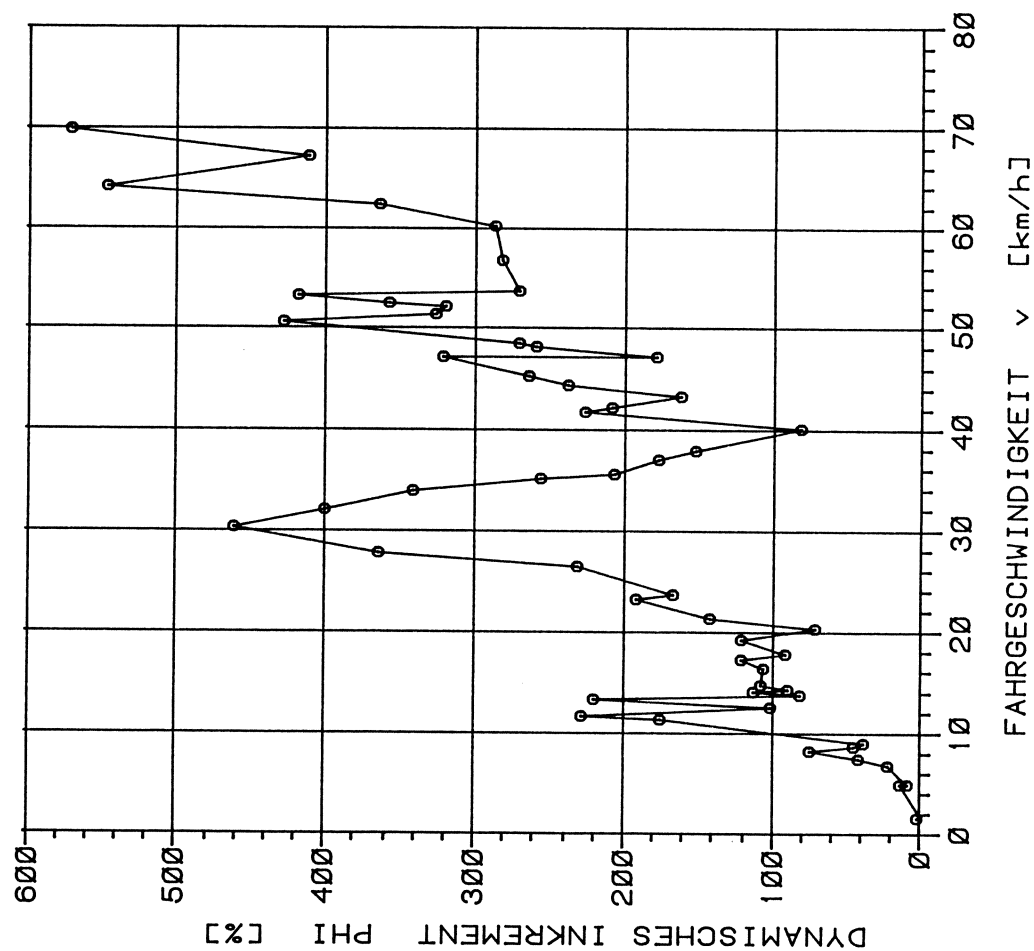
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]	INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
—●—	DMS 52	42R 10 AmA	10.96 MI	70.6	—●—	DMS 52	42R 10 AmA	-22.30 MI	49.21
—+—	DMS 52	52R 10 AmA	4.18 MI	34.6	—+—	DMS 52	52R 10 AmA	-33.69 MI	40.71
—+—	DMS 52	71R 10 AmA	10.83 MI	71.8	—+—	DMS 52	71R 10 AmA	-19.51 MI	41.25
—▲—	DMS 52	74R 10 AmA	3.06 MI	71.3	—▲—	DMS 52	74R 10 AmA	-20.61 MI	89.56
—■—	DMS 52	76R 10 AmA	3.63 MI	70.3	—■—	DMS 52	76R 10 AmA	-23.31 MI	45.50



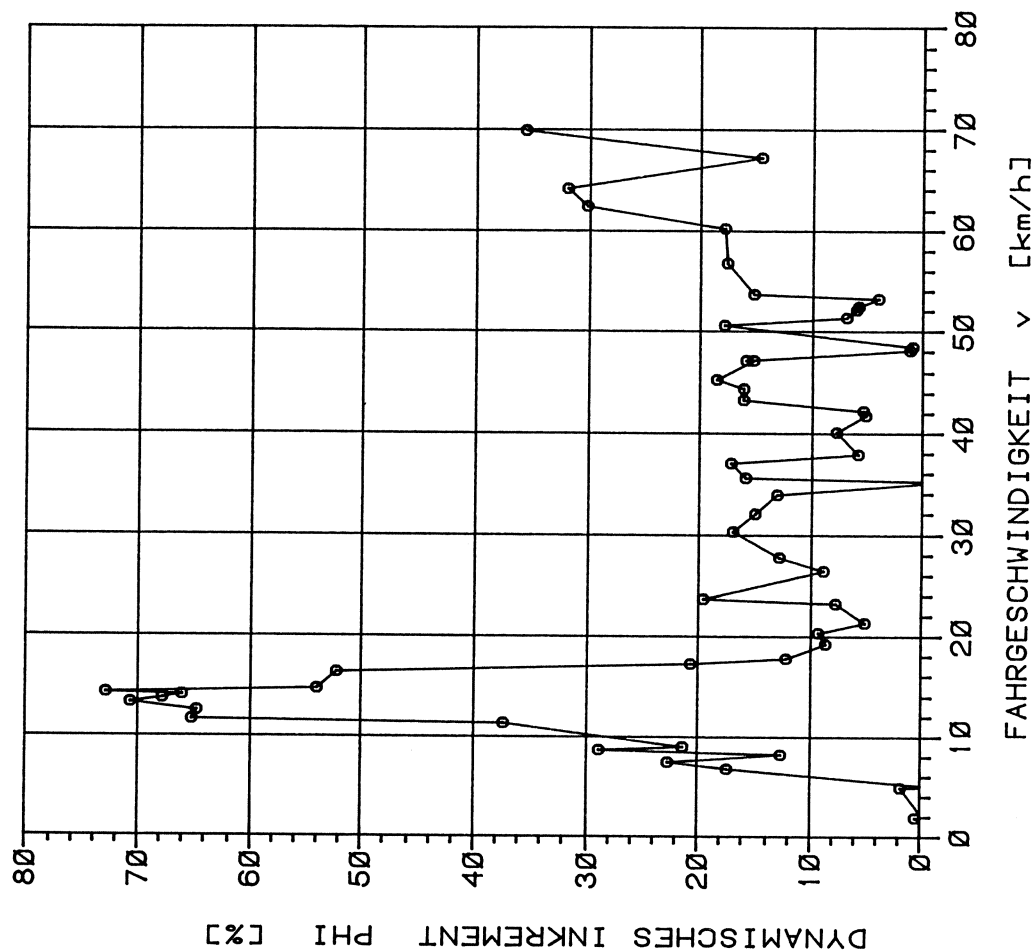
MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 52+ MEHRERE FZ. HINTEREINANDER, 10 BAR, DMS 52-

A6.106
A6.105

INSTRUM. SERIE ASTAT PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
DMS 52 2MH 10 AmA 5.24 MI 570.26 69.9

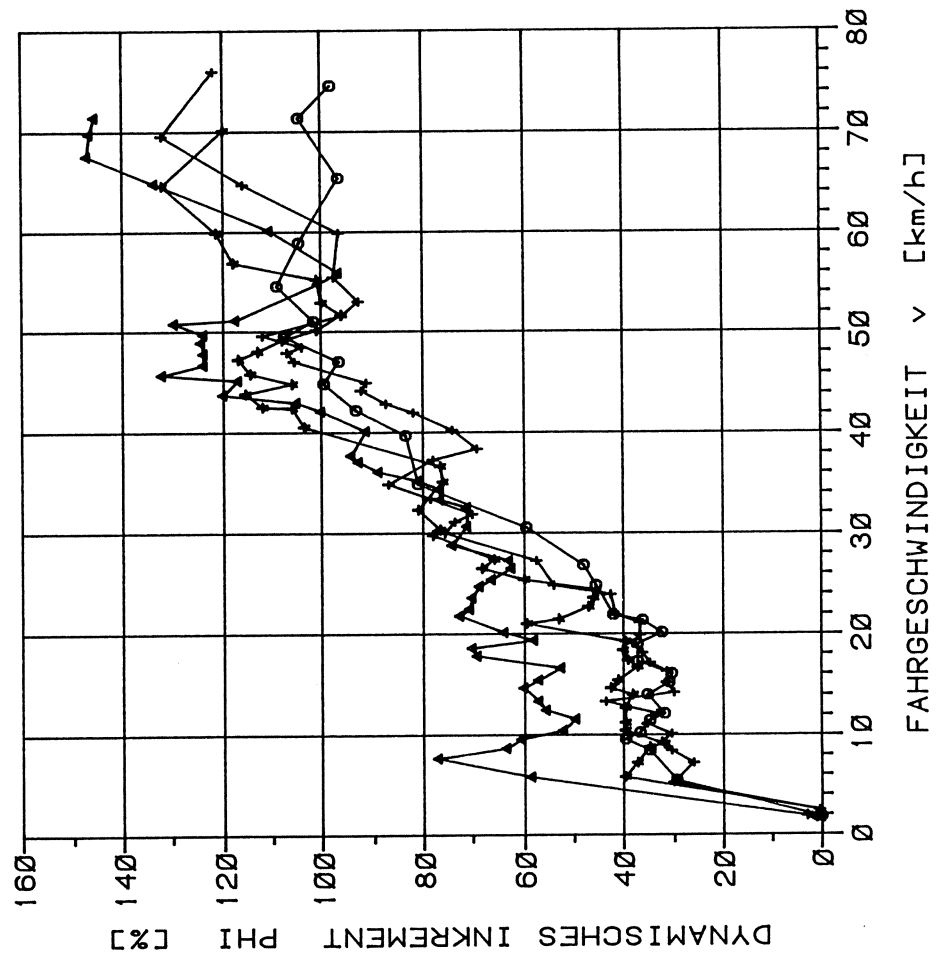


INSTRUM. SERIE ASTAT PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
DMS 52 2MH 10 AmA -32.78 MI 72.70 14.2



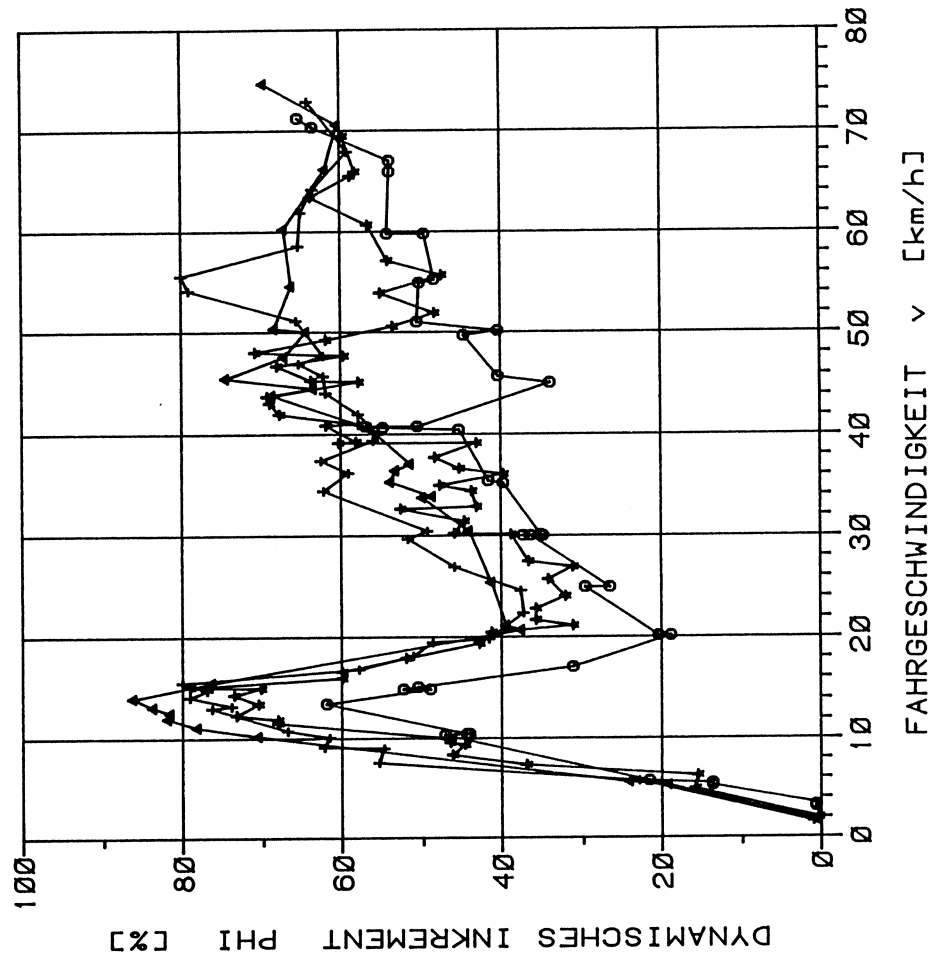
ZWEIACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	11R 10 KmA	16.38 MI	108.63	54.5
+	12R 10 KmA	16.67 MI	132.17	64.5
+	13R 10 KmA	17.04 MI	131.78	69.6
+	14R 10 KmA	14.68 MI	146.53	67.5



MEHRACHSIGE SOLOFAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 22

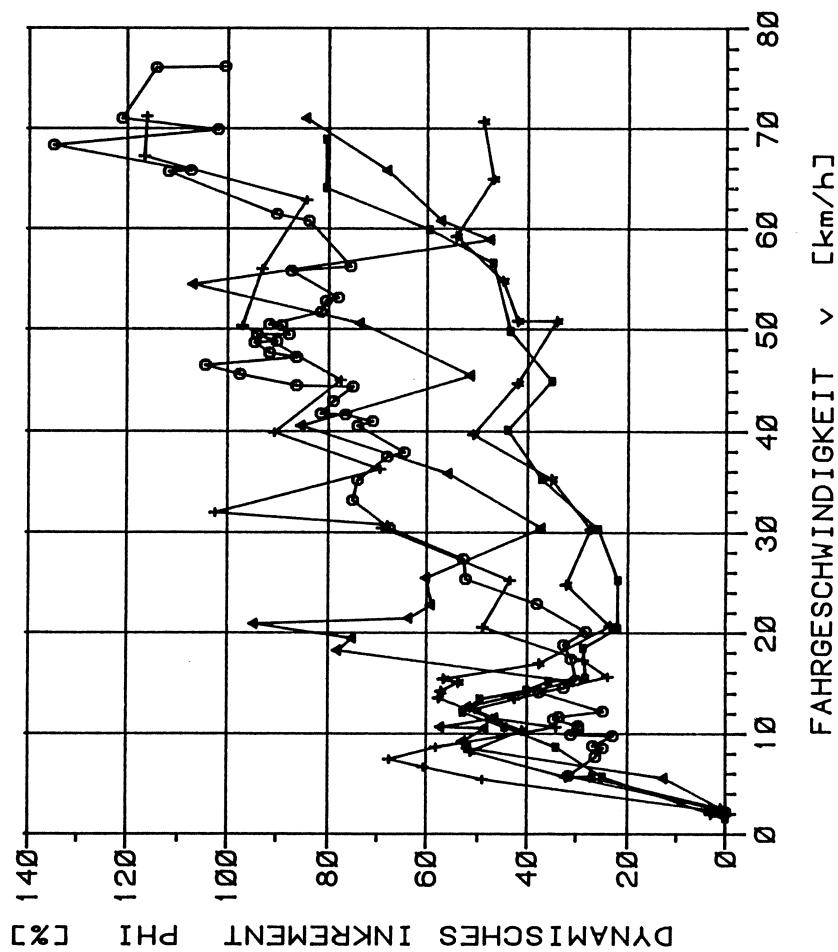
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	20R 10 KmA	26.69 MI	65.20	71.1
+	21R 10 KmA	25.91 MI	79.19	15.0
+	24R 10 KmA	26.01 MI	79.86	55.5
+	25R 10 KmA	22.04 MI	86.22	13.9



ZUSAMMENGESETZTE FAHRZEUGE, 10 BAR, DMS 22

A6.109

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	42R 10 KmA	18.52 MI	134.54
+	DMS 22	52R 10 KmA	28.45 MI	57.28
+	DMS 22	71R 10 KmA	16.84 MI	116.35
+	DMS 22	74R 10 KmA	19.22 MI	106.70
+	DMS 22	76R 10 KmA	24.65 MI	79.96



Anhang 7

Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen in Abhängigkeit vom Reifendruck (Belag A)

Anhang zum Berichtteil A, Seite 143 ff,
Abschnitt 3.76,
"Der Einfluss des Reifendruckes".

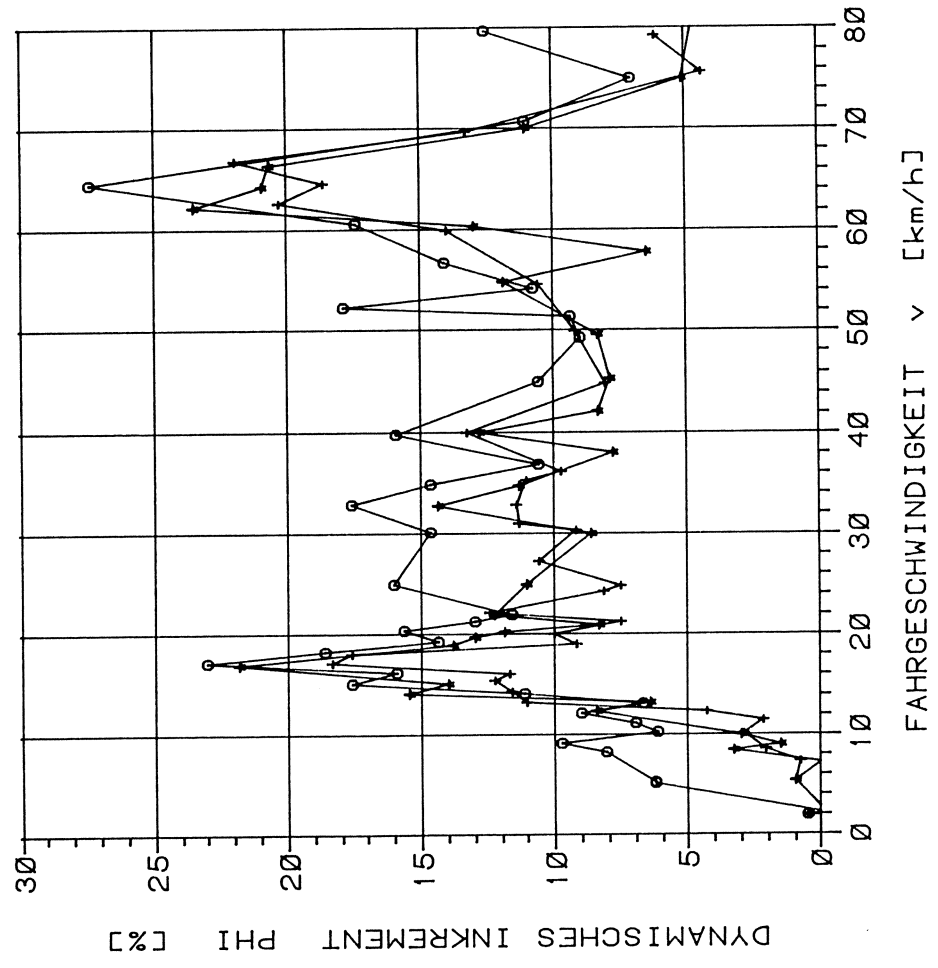
Der Verlauf des dynamischen Inkrementes über die Fahrgeschwindigkeit ist für zehn Versuchsfahrzeuge und die Reifendrücke 6 bar und 10 bar, in einigen Fällen auch für 8 bar, grafisch dargestellt. Zudem sind der statische Vergleichswert (ASTAT) sowie das maximale dynamische Inkrement (PHIMAX) und die zugehörige Fahrgeschwindigkeit v für jede dargestellte Versuchsserie angegeben.

Die Seiten A7.1 bis A7.40 enthalten die Resultate für Durchbiegungen, A7.41 bis A7.80 jene für Dehnungen, in beiden Fällen für Fahrten ohne Brett. Die Resultate für Fahrten mit Brett sind für Durchbiegungen auf den Seiten A7.81 bis A7.100, für Dehnungen auf den Seiten A7.101 bis A7.140 gegeben.

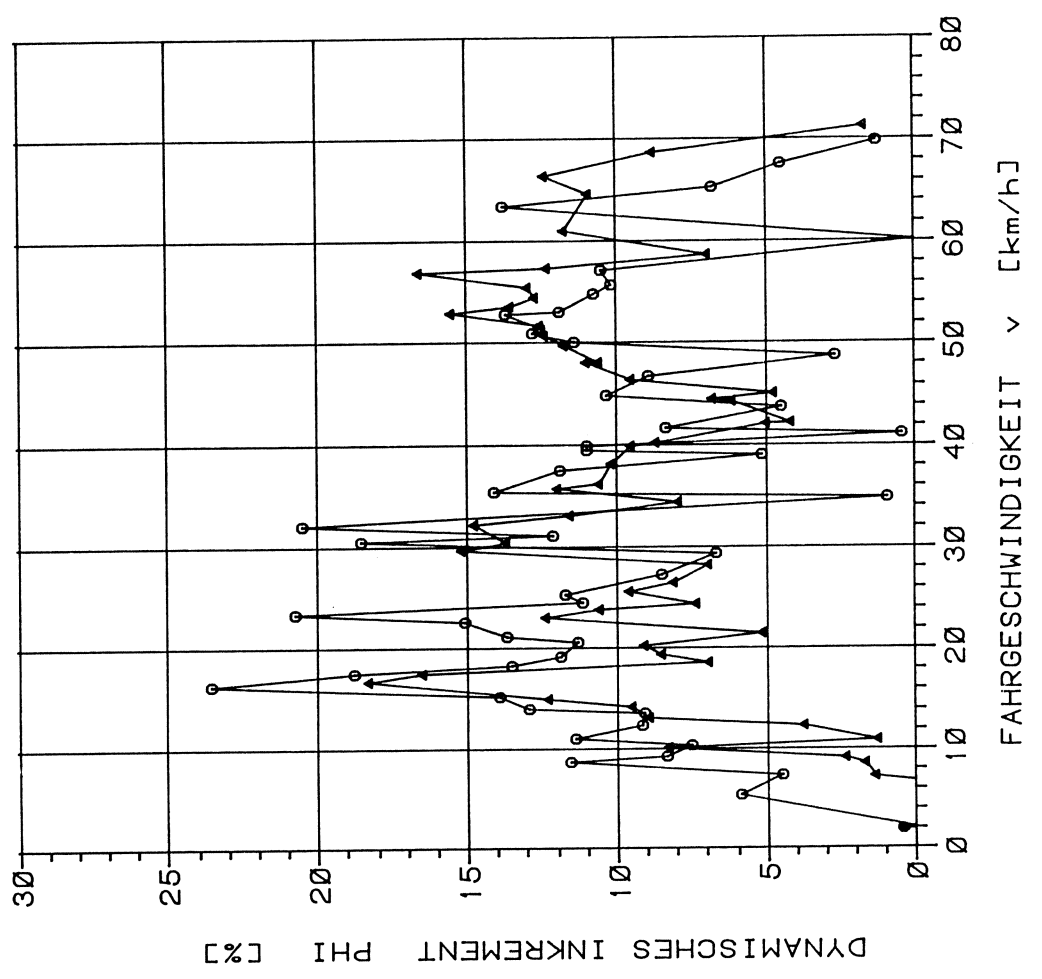
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, WG 82

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	11R 10 AoA	-7.71 MM	64.5
+	WG 82	11R 8 AoA	-7.71 MM	62.2
+	WG 82	11R 6 AoA	-7.71 MM	66.8



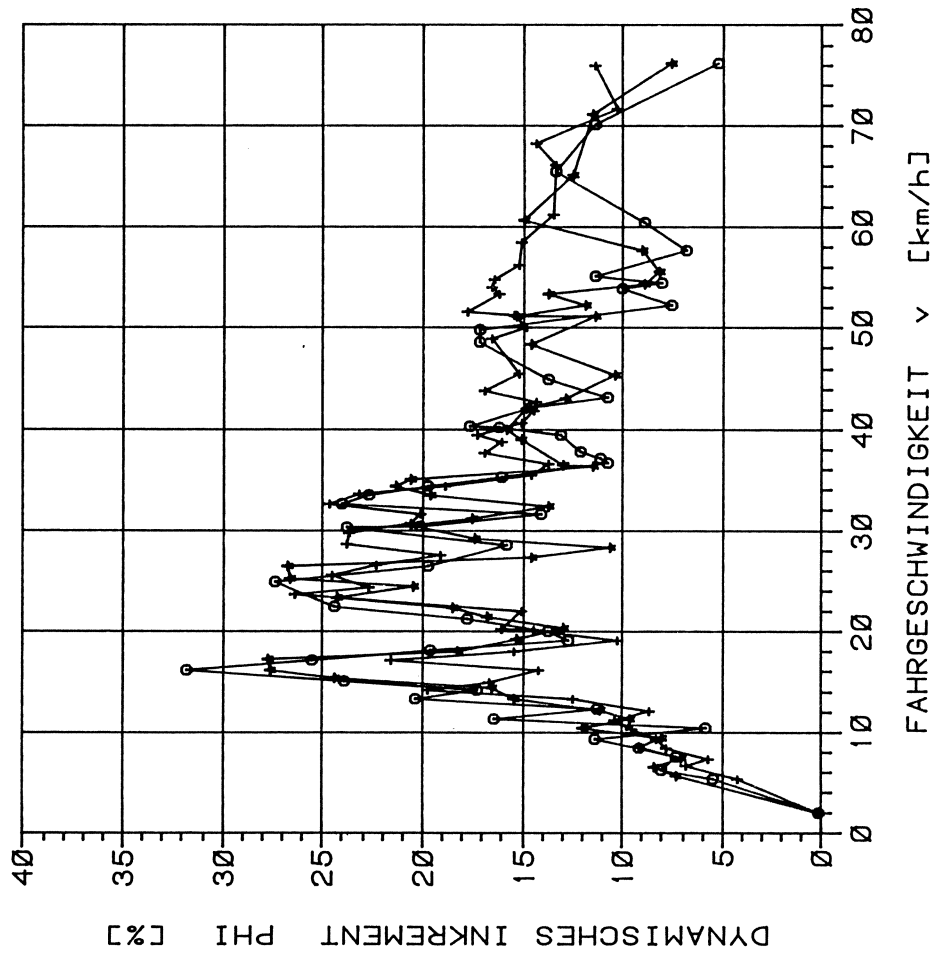
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	12R 10 AoA	-7.72 MM	23.51
+	WG 82	12R 6 AoA	-7.72 MM	18.22
+	WG 82	12R 6 AoA	-7.72 MM	16.6



A7.4
A7.3

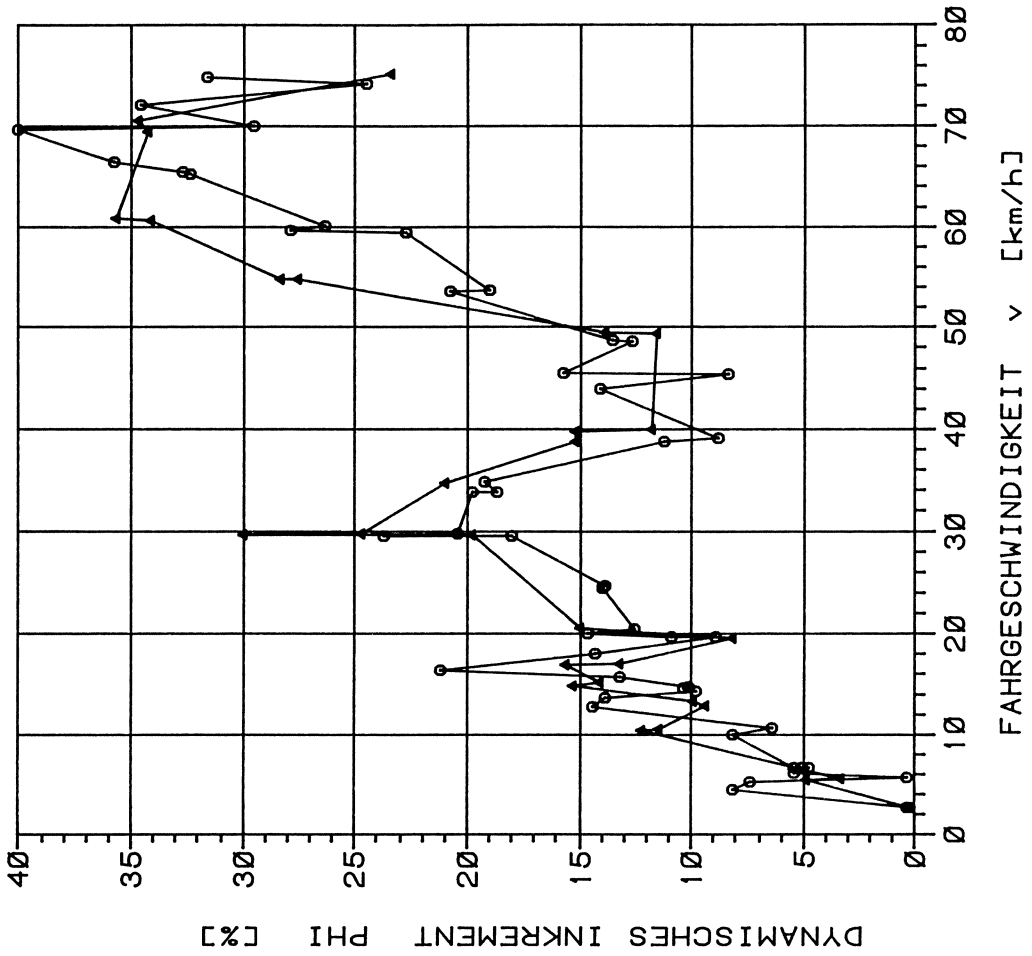
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	13R 10 AoA	-1.68 MM	31.81
+	WG 82	13R 8 AoA	-1.68 MM	27.72
+	WG 82	13R 6 AoA	-1.68 MM	26.40
				16.2
				17.2
				23.6



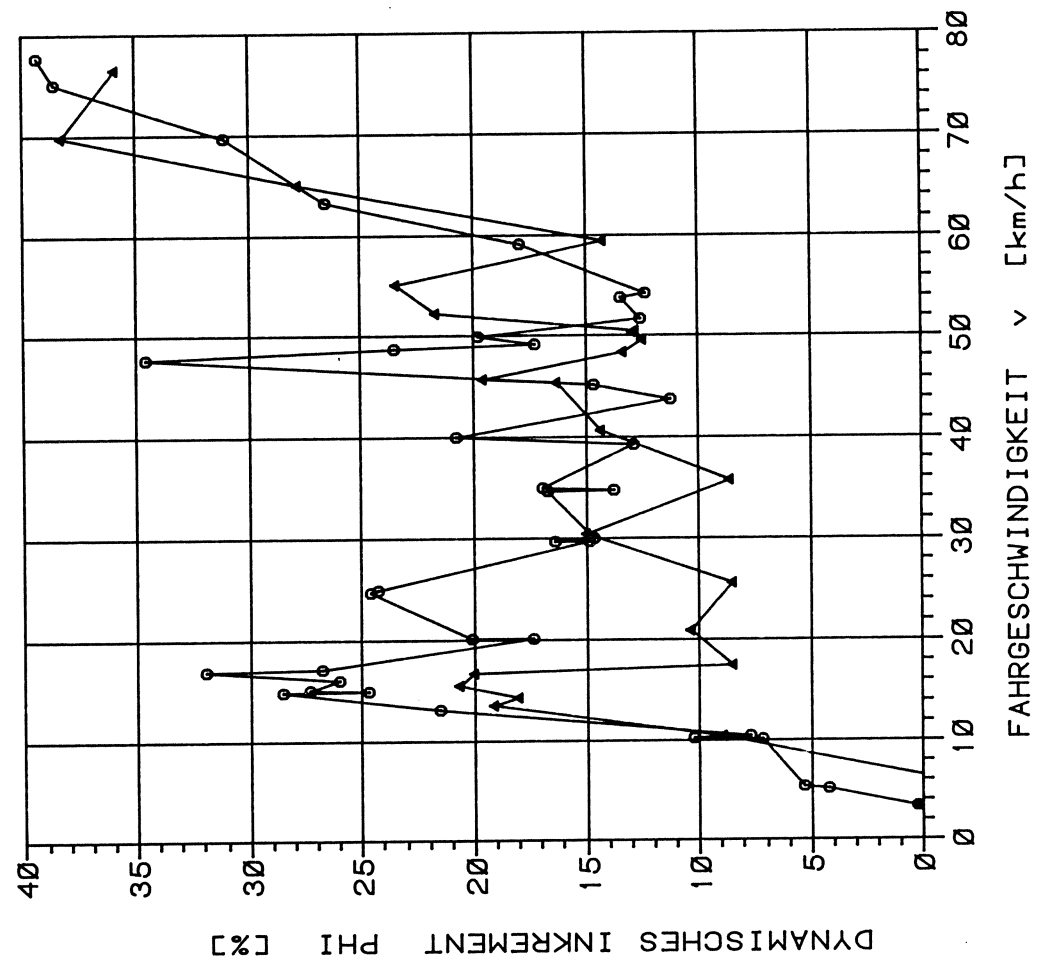
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	20R 10 AoA	-1.18 MM	40.00
+	WG 82	20R 6 AoA	-1.18 MM	35.59
				69.7
				60.9



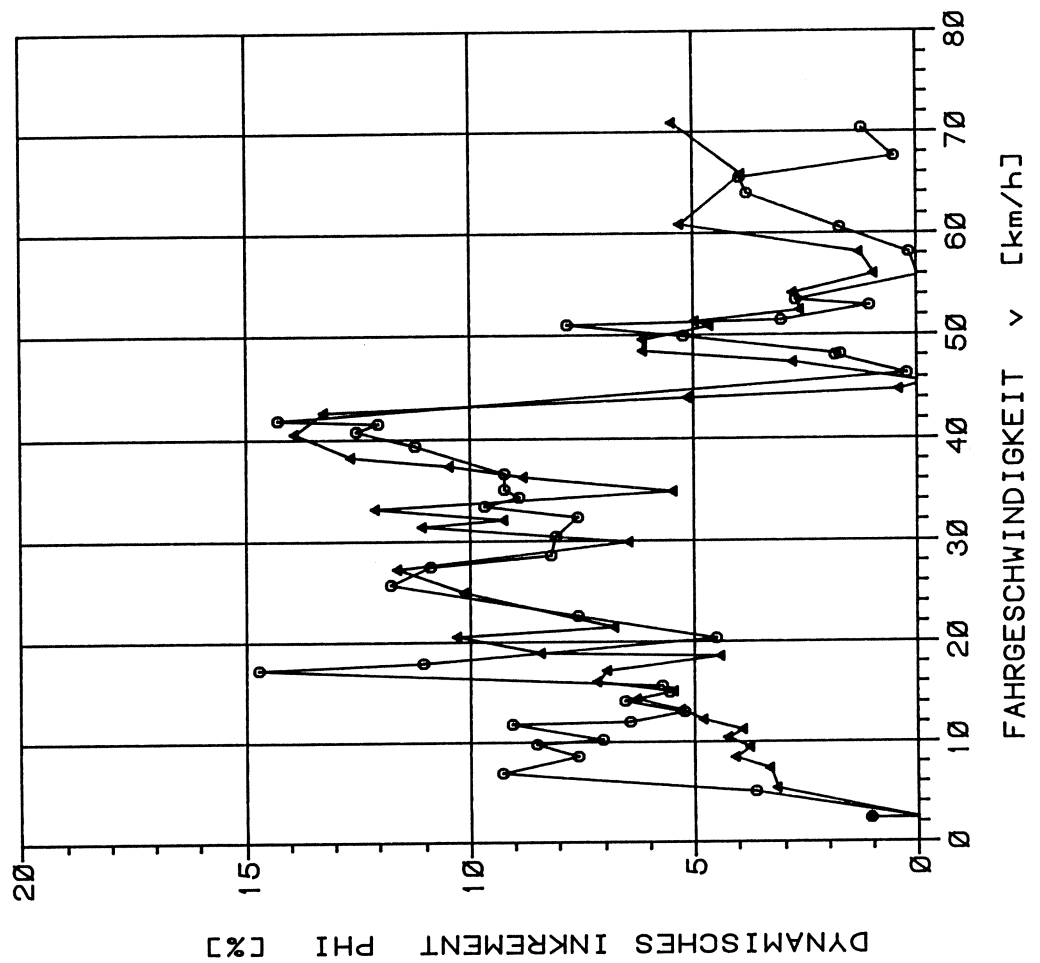
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	25R 10 AoA	-1.20 MM	39.37
○	WG 82	25R 6 AoA	-1.20 MM	77.6
△	WG 82	25R 6 AoA	-1.20 MM	38.21
△	WG 82	25R 6 AoA	-1.20 MM	69.8



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	42R 10 AoA	-1.15 MM	14.68
○	WG 82	42R 6 AoA	-1.15 MM	17.3
△	WG 82	42R 6 AoA	-1.15 MM	13.89
△	WG 82	42R 6 AoA	-1.15 MM	40.5

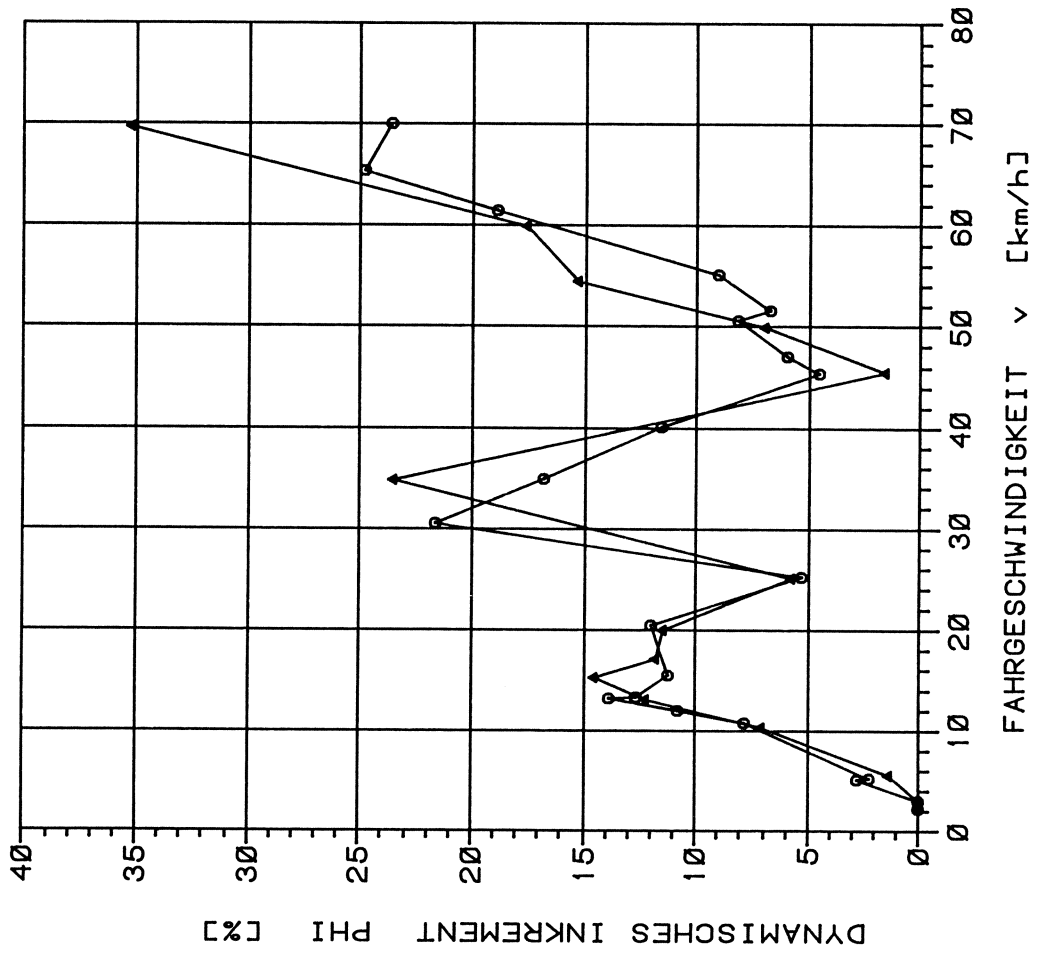


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, WG 82

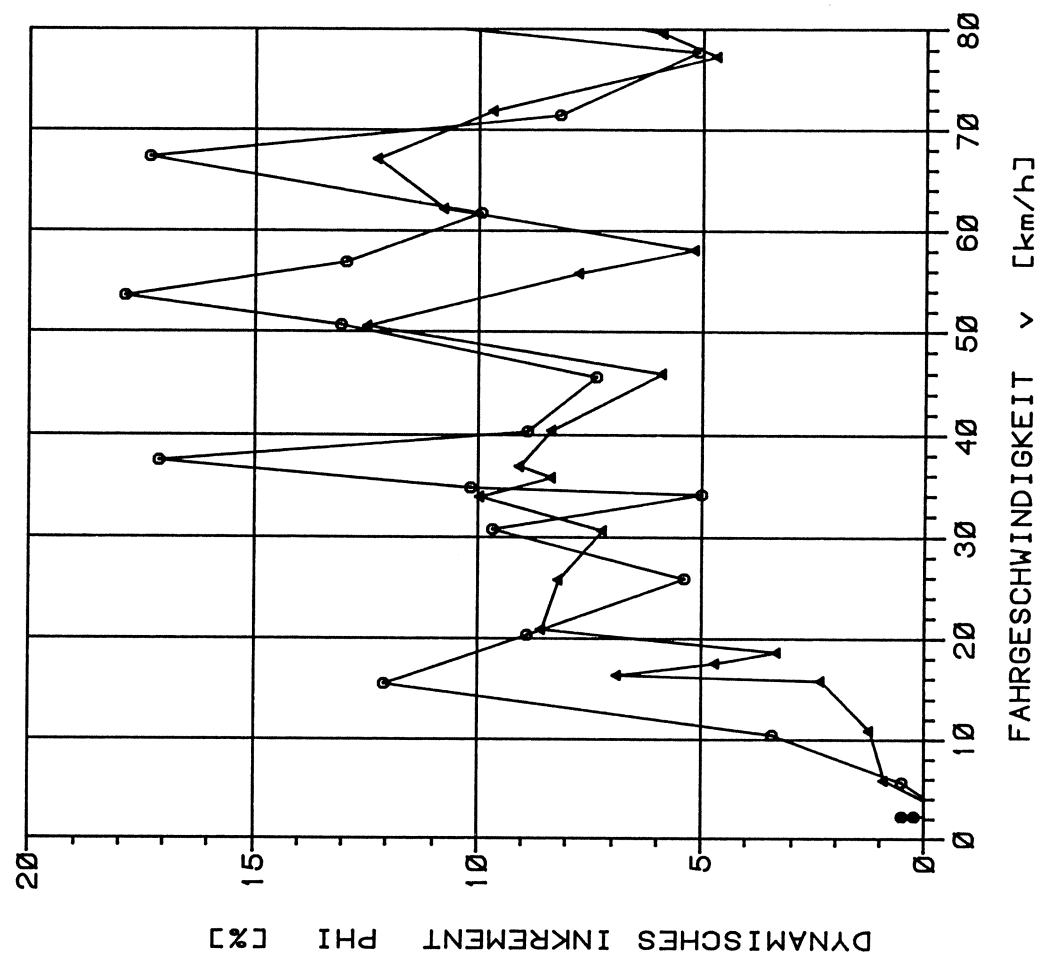
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, WG 82

A7.8
A7.7

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	52R 10 AoA	-1.69 MM	24.77
○	WG 82	52R 6 AoA	-1.69 MM	35.16
				65.4
				69.6

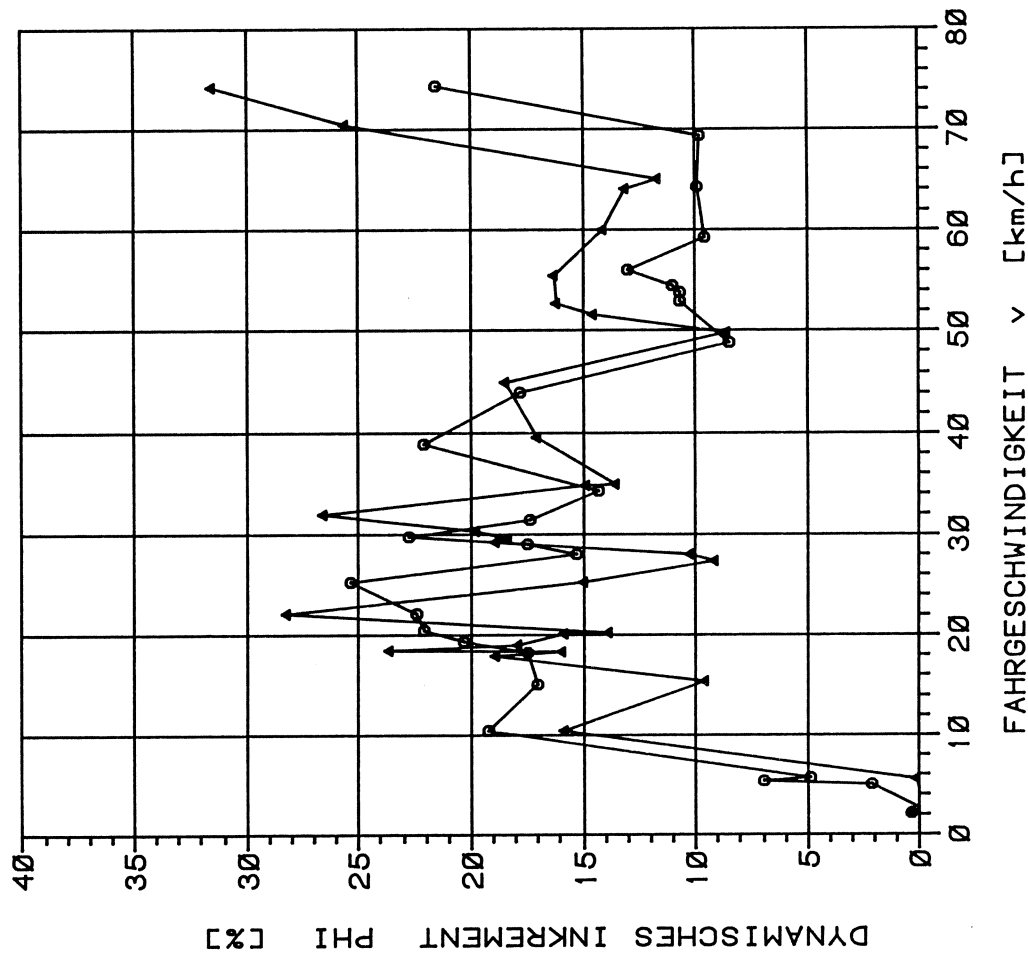


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	71R 10 AoA	-1.01 MM	17.89
○	WG 82	71R 6 AoA	-1.01 MM	12.43
				53.5
				50.5



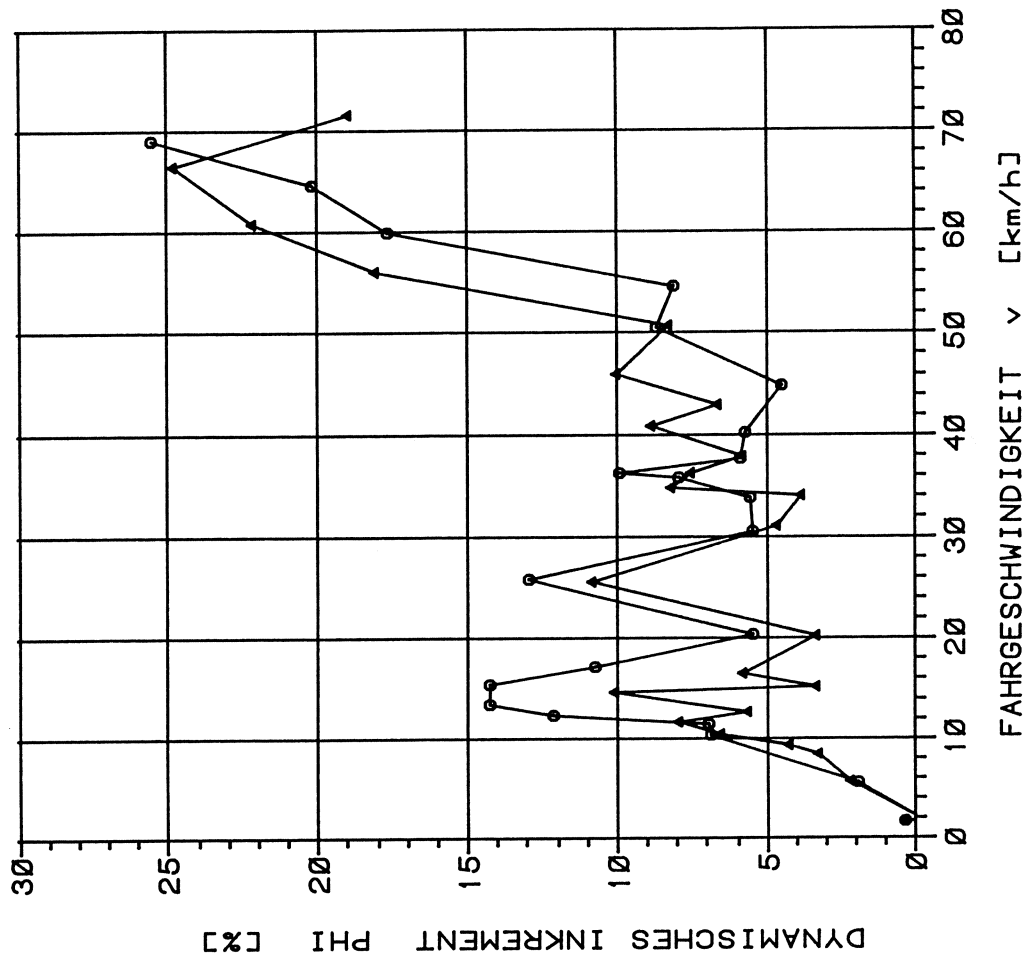
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	74R 10 AoA	-1.20 MM	25.2
▲	WG 82	74R 6 AoA	-1.20 MM	31.49
				74.1



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82	76R 10 AoA	-1.50 MM	25.50
▲	WG 82	76R 6 AoA	-1.50 MM	24.77
				66.4

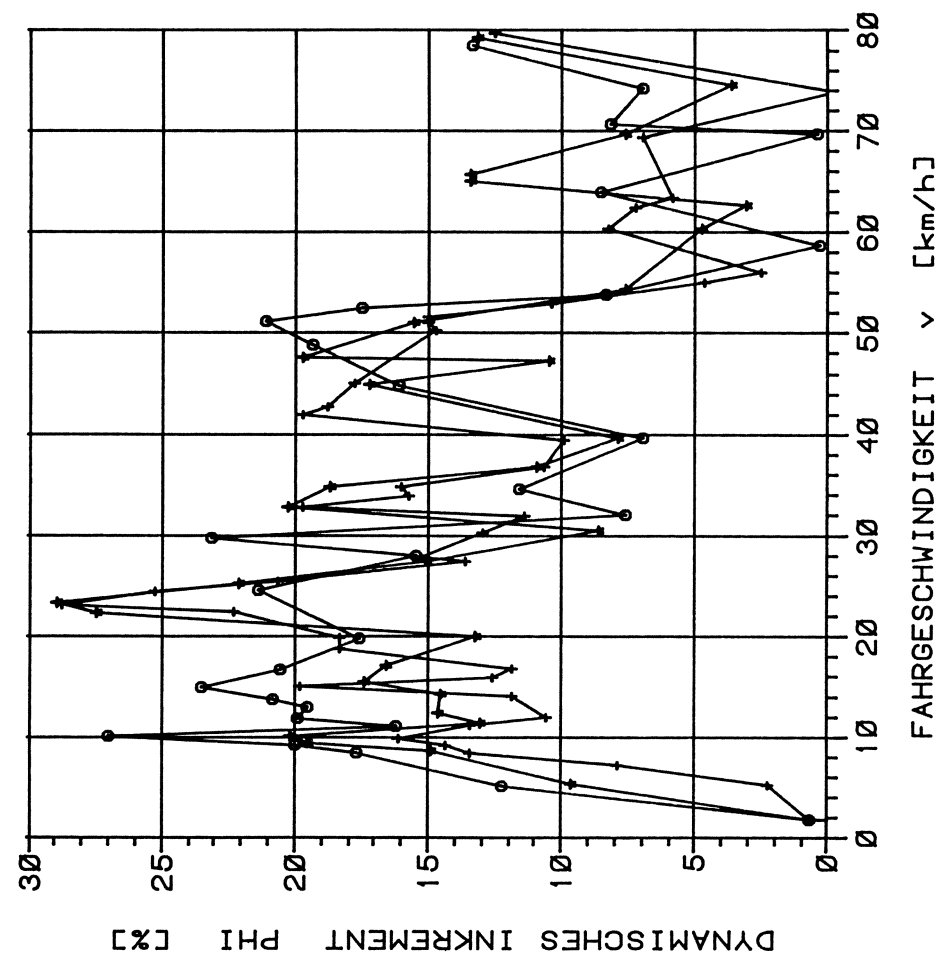


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, WG Ø1

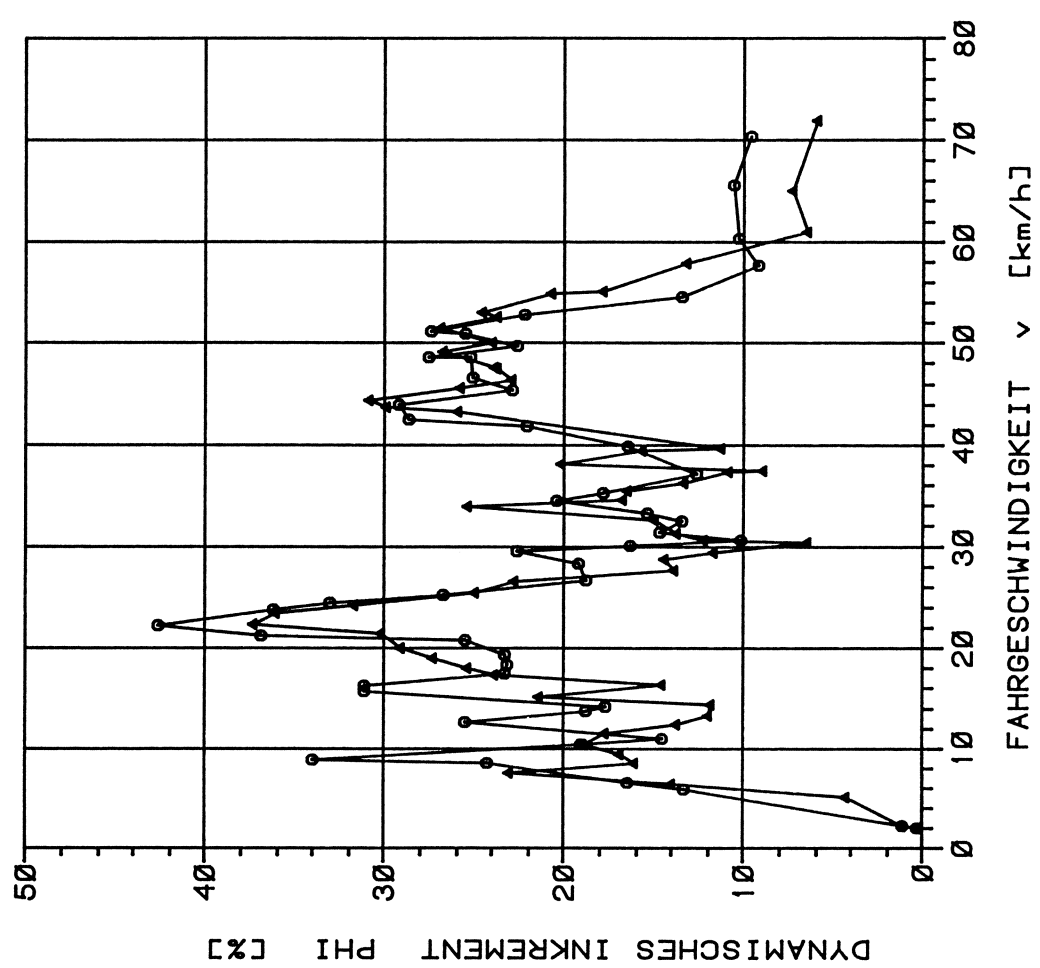
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, WG Ø1

A7.12
A7.11

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	11R 10 KoA	-1.80 MM	26.95	10.0
+	11R 8 KoA	-1.80 MM	28.89	23.3
+	11R 6 KoA	-1.80 MM	28.72	23.1

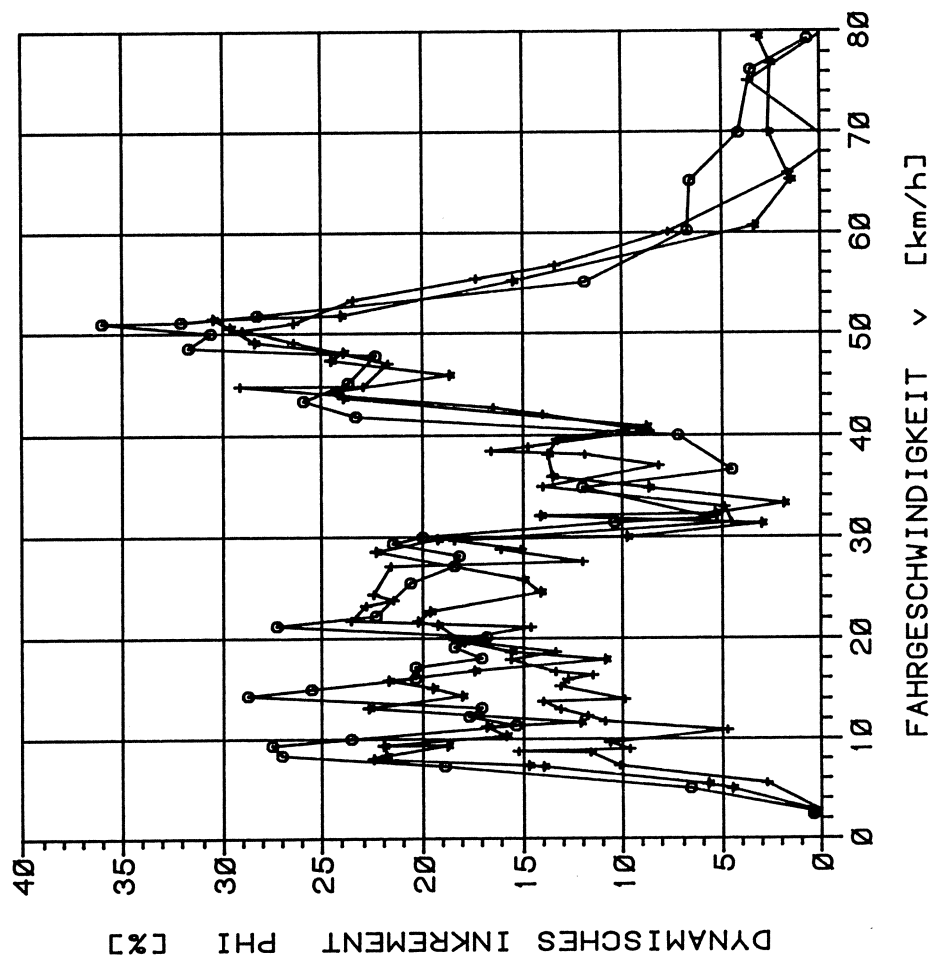


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	12R 10 KoA	-1.74 MM	42.54	22.1
+	12R 6 KoA	-1.74 MM	37.23	22.3



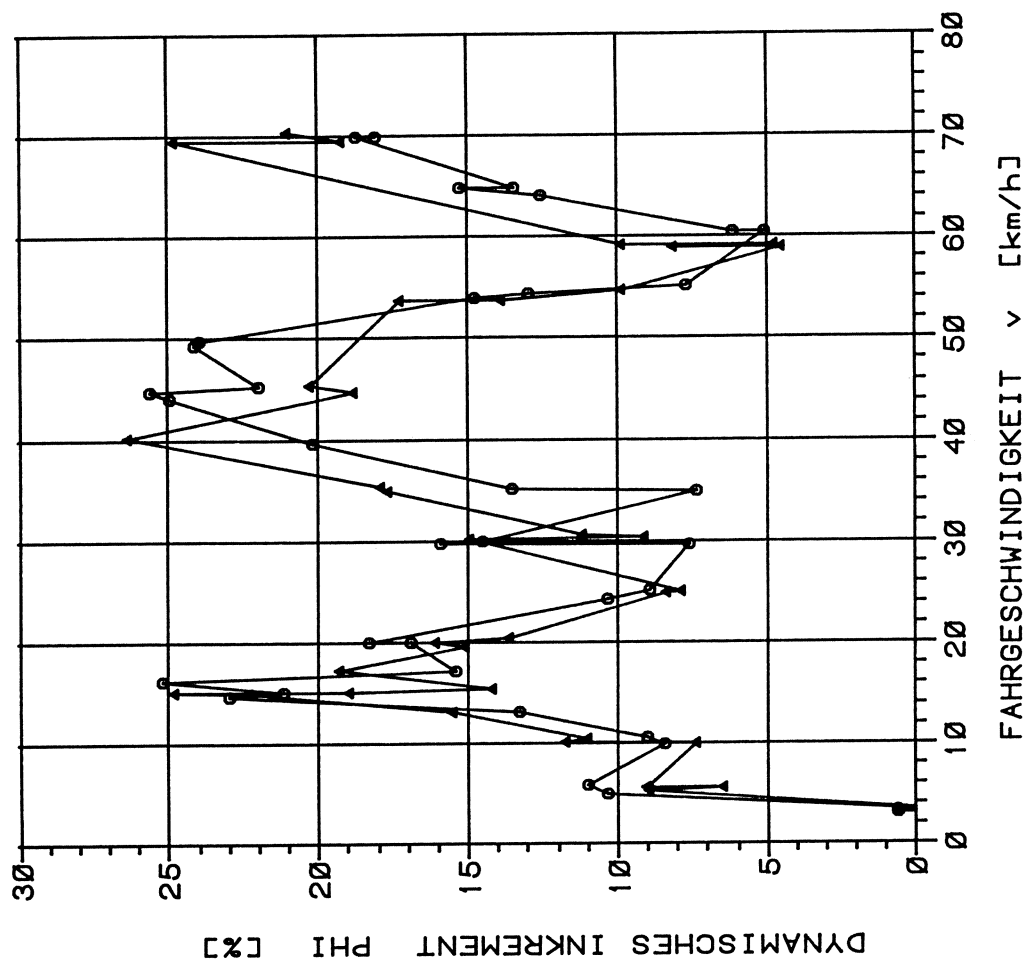
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	13R 10 KoA	-1.79 MM	35.92
+	WG Ø1	13R 8 KoA	-1.79 MM	30.37
+	WG Ø1	13R 6 KoA	-1.79 MM	29.08
				51.0
				51.4
				44.8



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 2ØR, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	2ØR 10 KoA	-2.94 MM	25.59
+	WG Ø1	2ØR 6 KoA	-2.94 MM	26.31
				44.6
				40.1

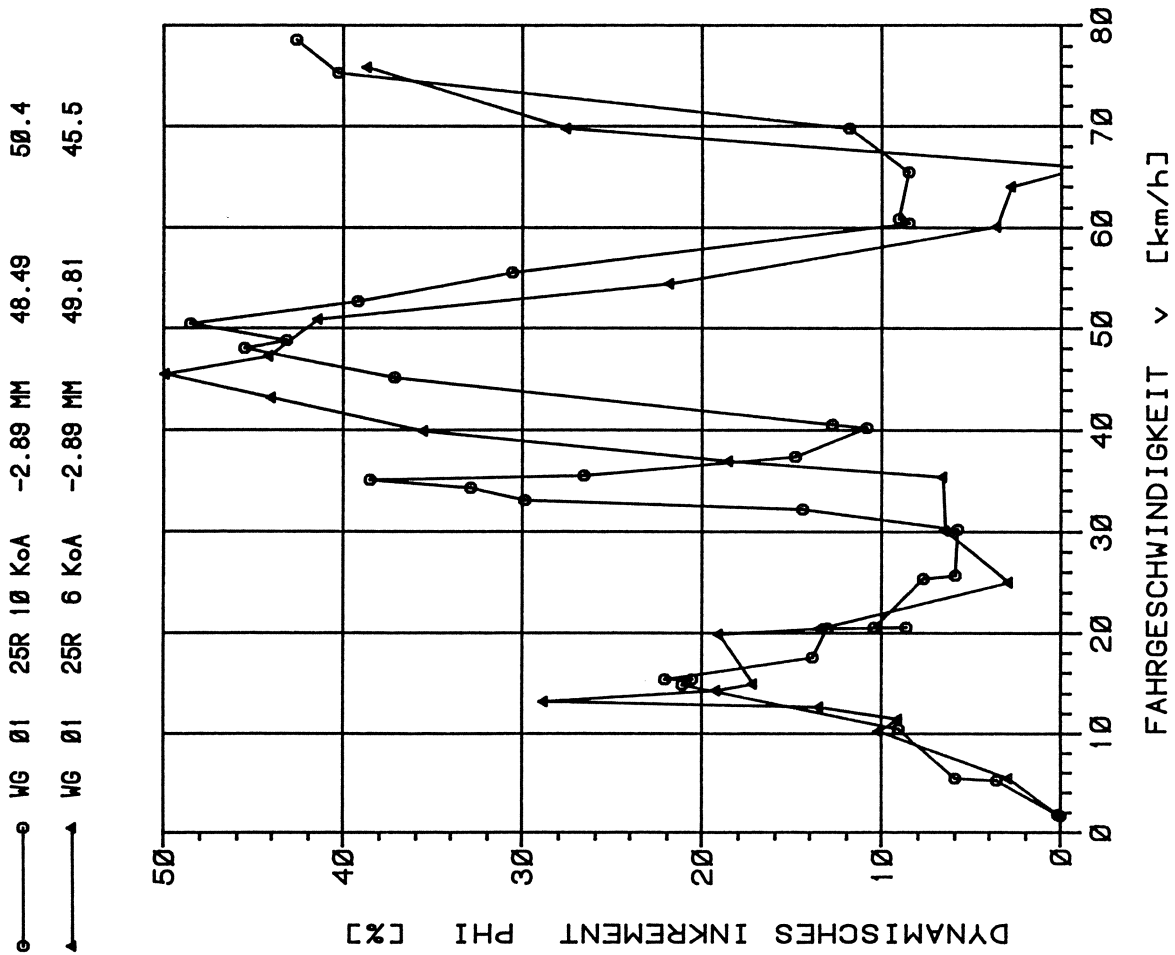


A7.16
A7.15

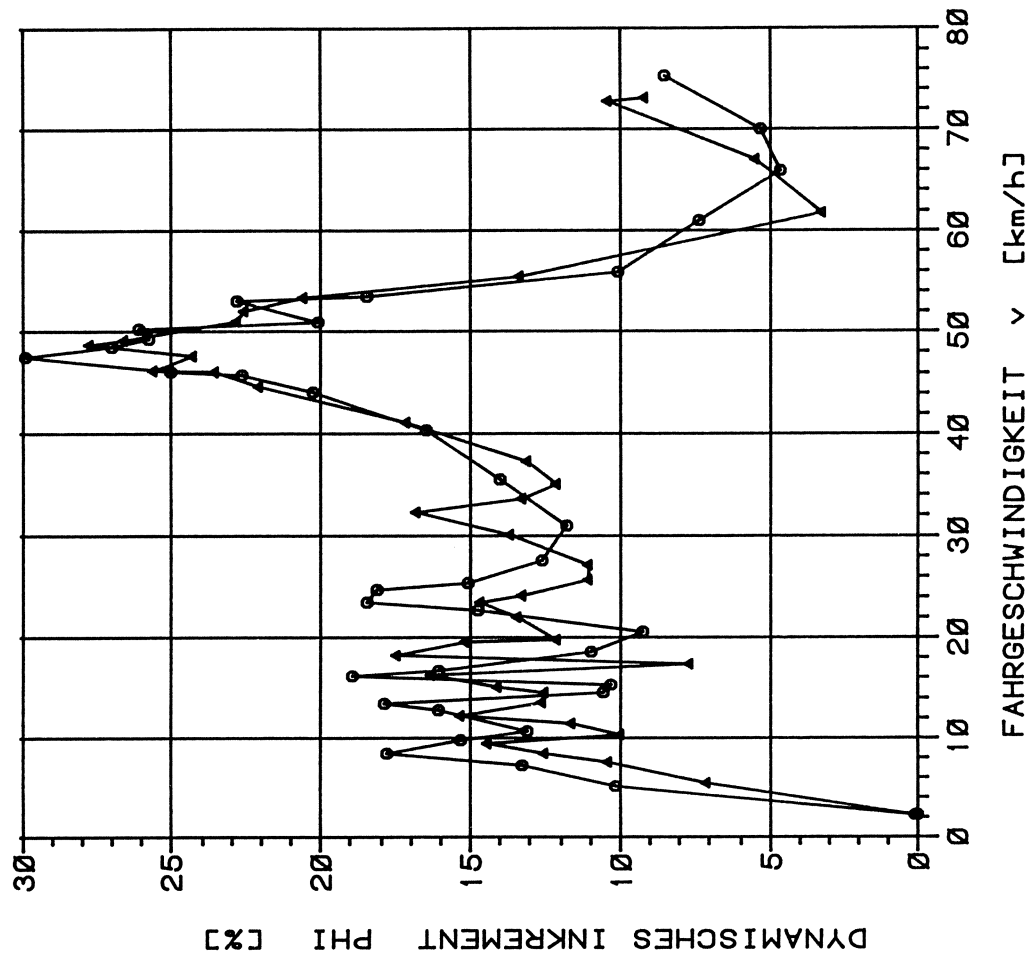
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, WG Ø1

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	25R 10 KoA	-2.89 MM	48.49
▲	WG Ø1	25R 6 KoA	-2.89 MM	49.81

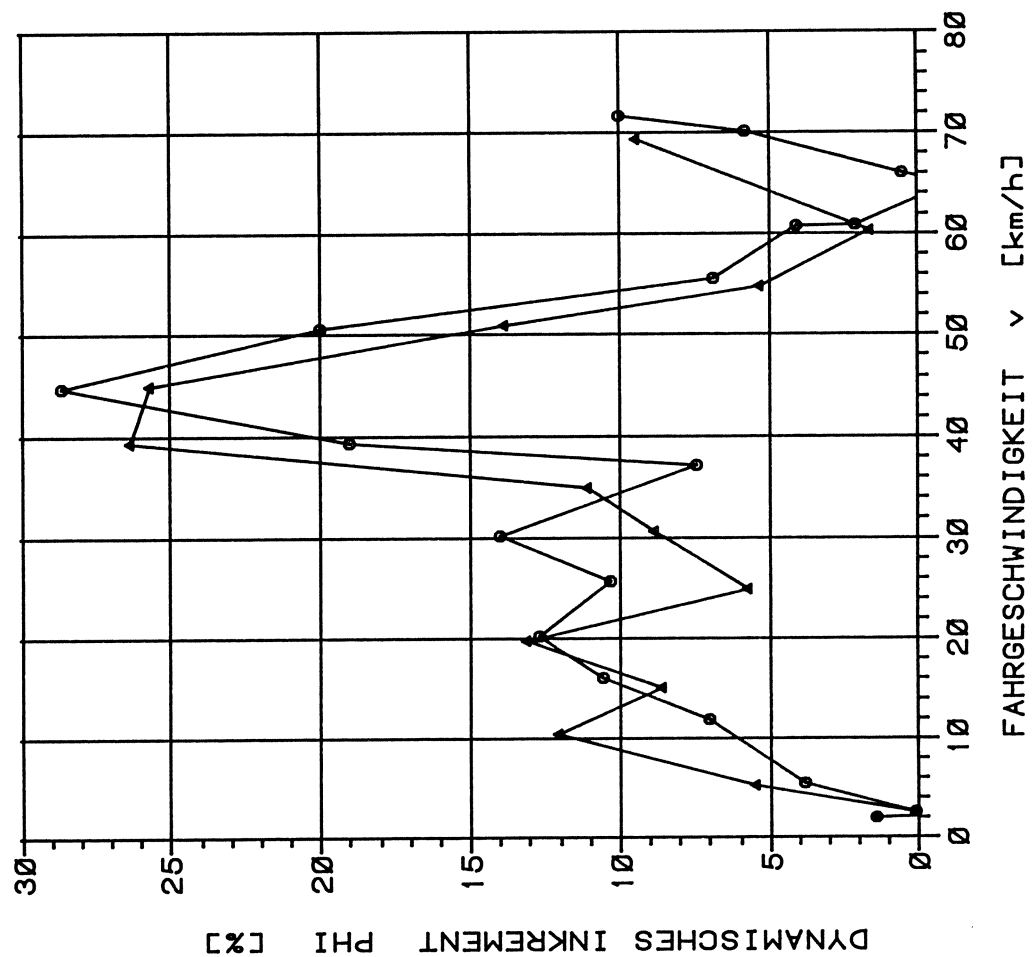


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	42R 10 KoA	-2.75 MM	29.84
▲	WG Ø1	42R 6 KoA	-2.75 MM	27.69



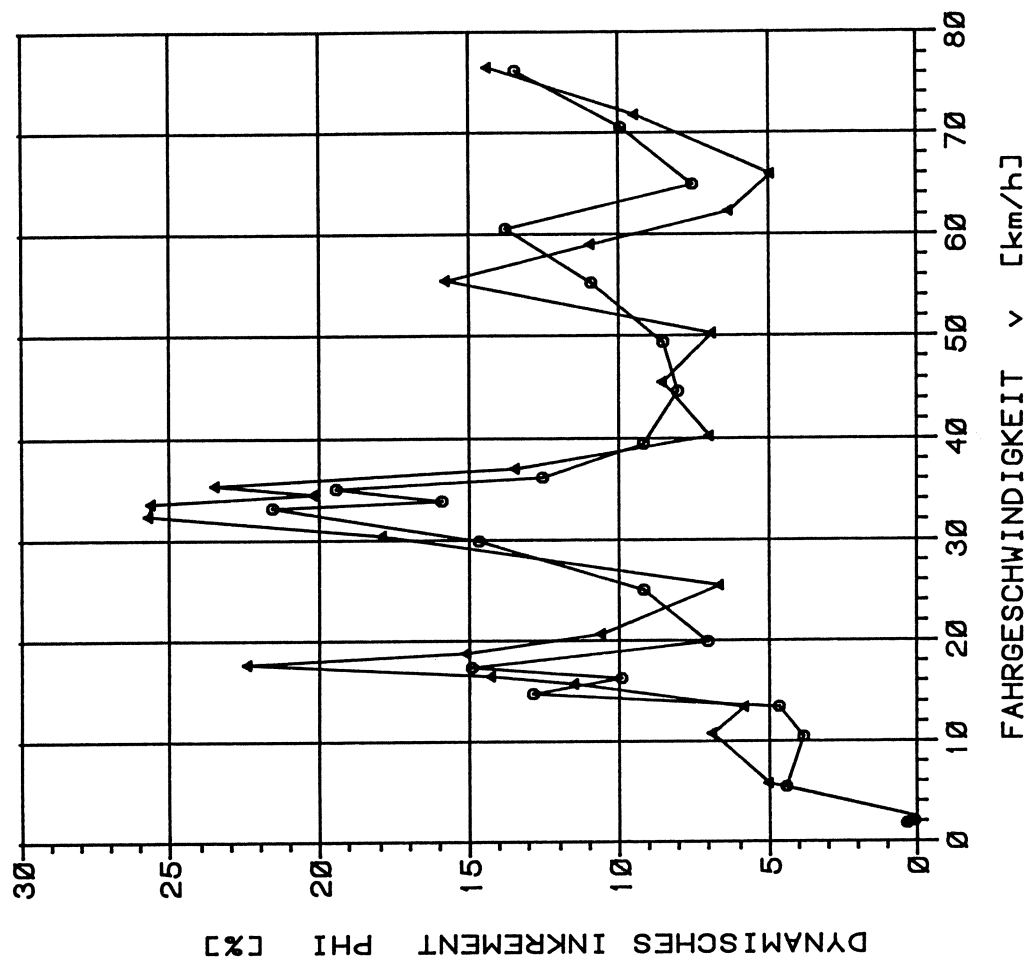
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	52R 10 KoA	-4.07 MM	28.58
○	WG Ø1	52R 6 KoA	-4.07 MM	26.27
○	WG Ø1	52R 10 KoA	-4.07 MM	44.7
○	WG Ø1	52R 6 KoA	-4.07 MM	39.3



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, WG Ø1

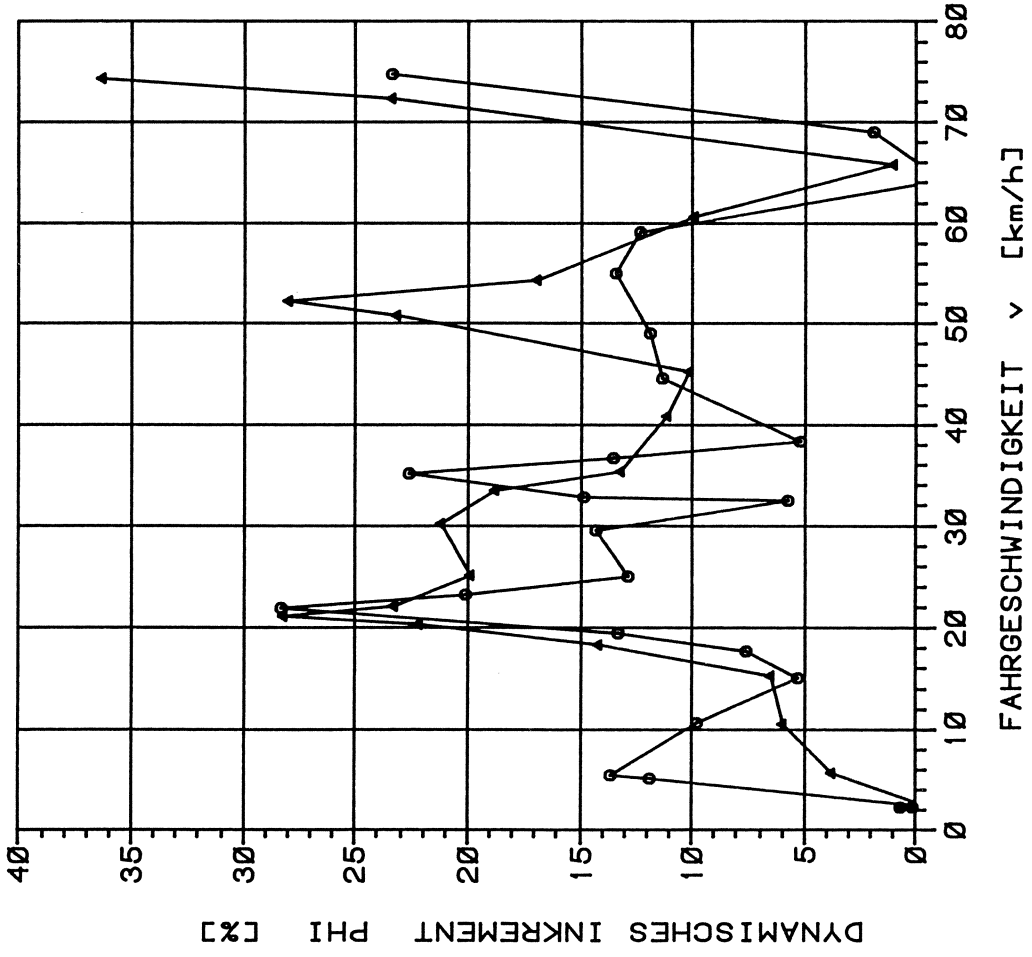
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	71R 10 KoA	-2.46 MM	21.52
○	WG Ø1	71R 6 KoA	-2.46 MM	25.66
○	WG Ø1	71R 10 KoA	-2.46 MM	33.1
○	WG Ø1	71R 6 KoA	-2.46 MM	32.4



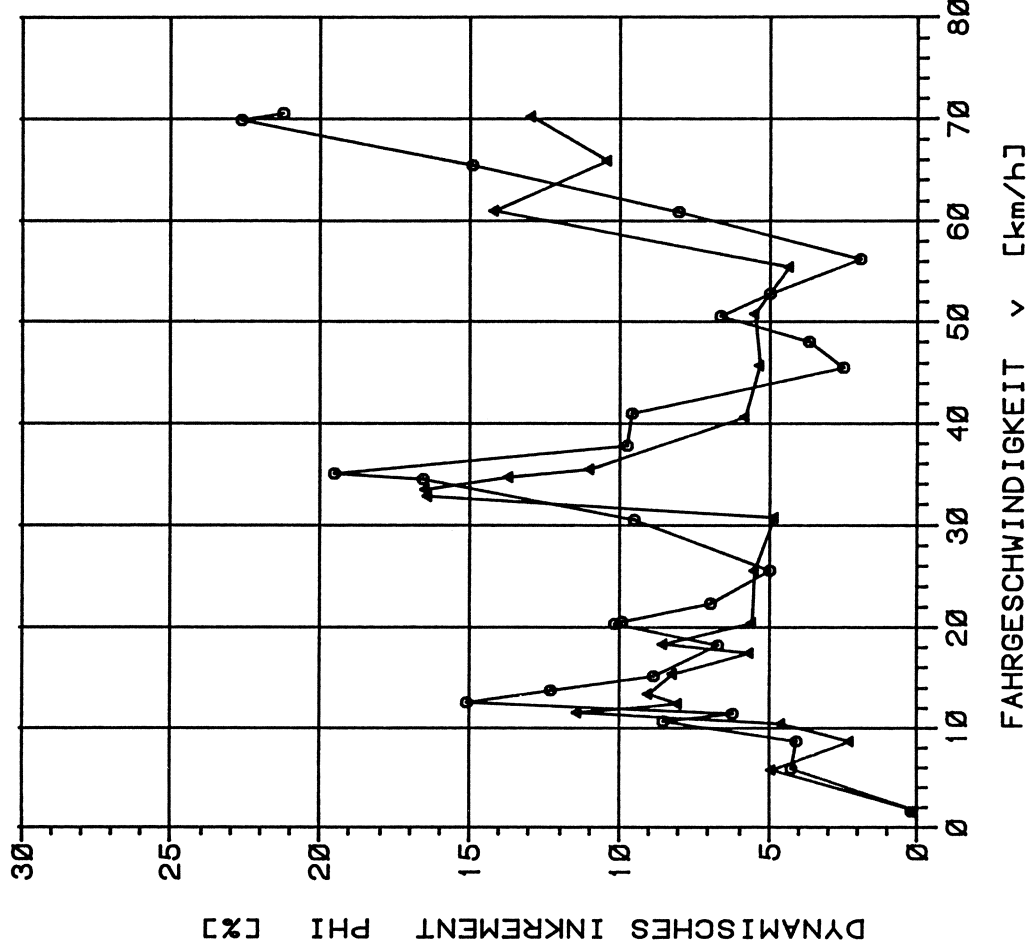
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, WG Ø1

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	74R 10 KoA	-2.98 MM	28.29	21.8
▲	74R 6 KoA	-2.98 MM	36.31	74.3

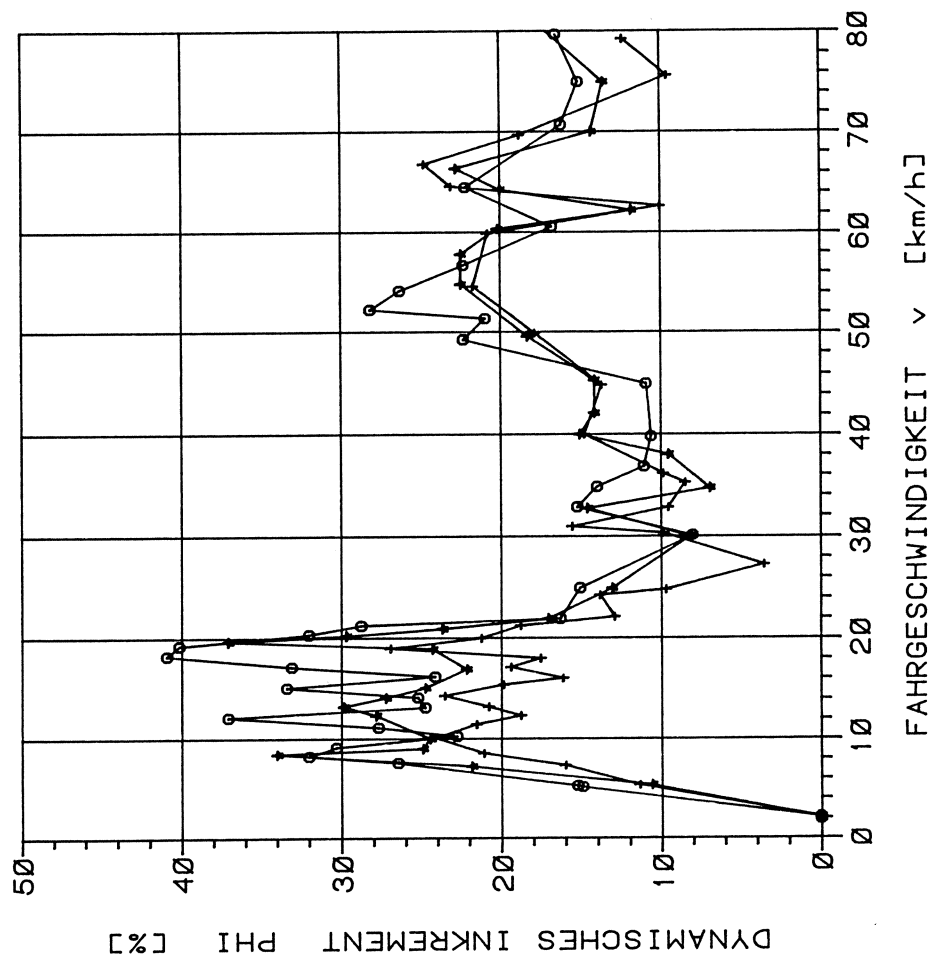


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	76R 10 KoA	-3.68 MM	22.58	69.8
▲	76R 6 KoA	-3.68 MM	16.40	33.4



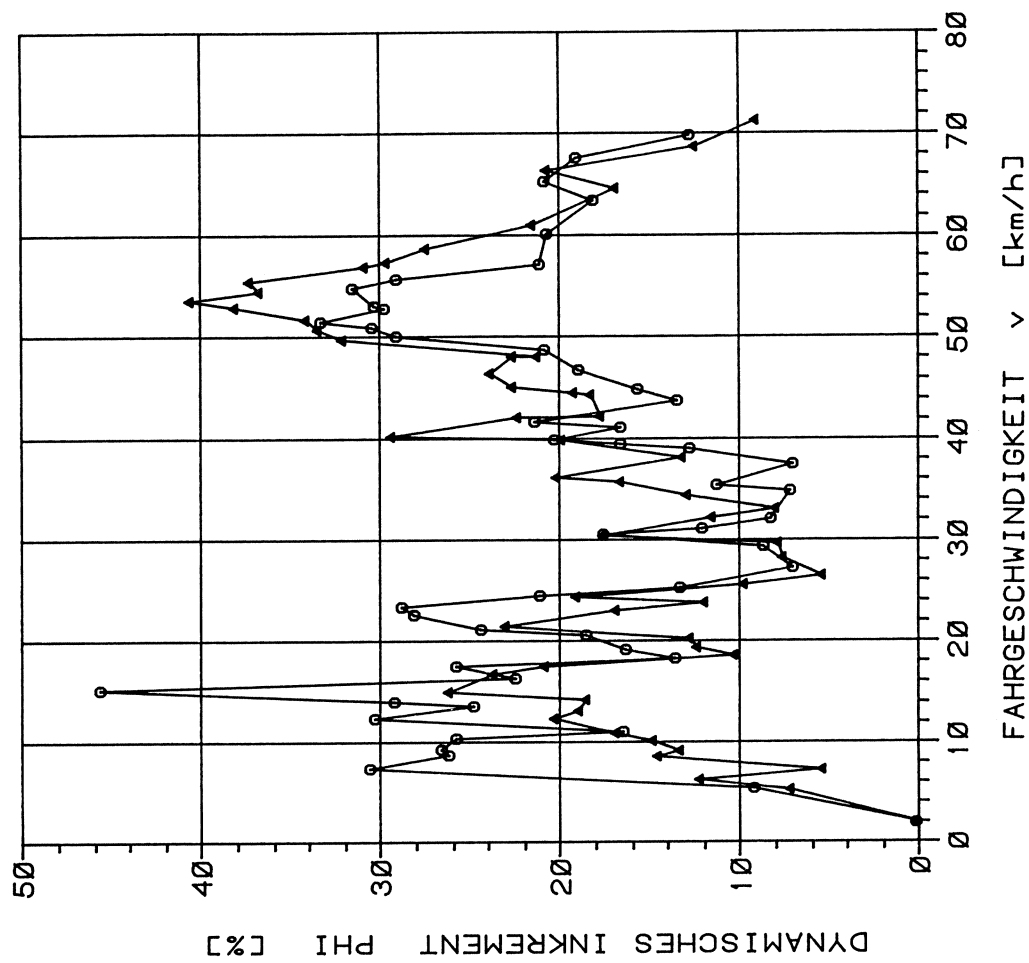
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	11R 10 AoA	-1.05 MM	40.97
+	WG Ø2	11R 8 AoA	-1.05 MM	37.07
+	WG Ø2	11R 6 AoA	-1.05 MM	26.90



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, WG Ø2

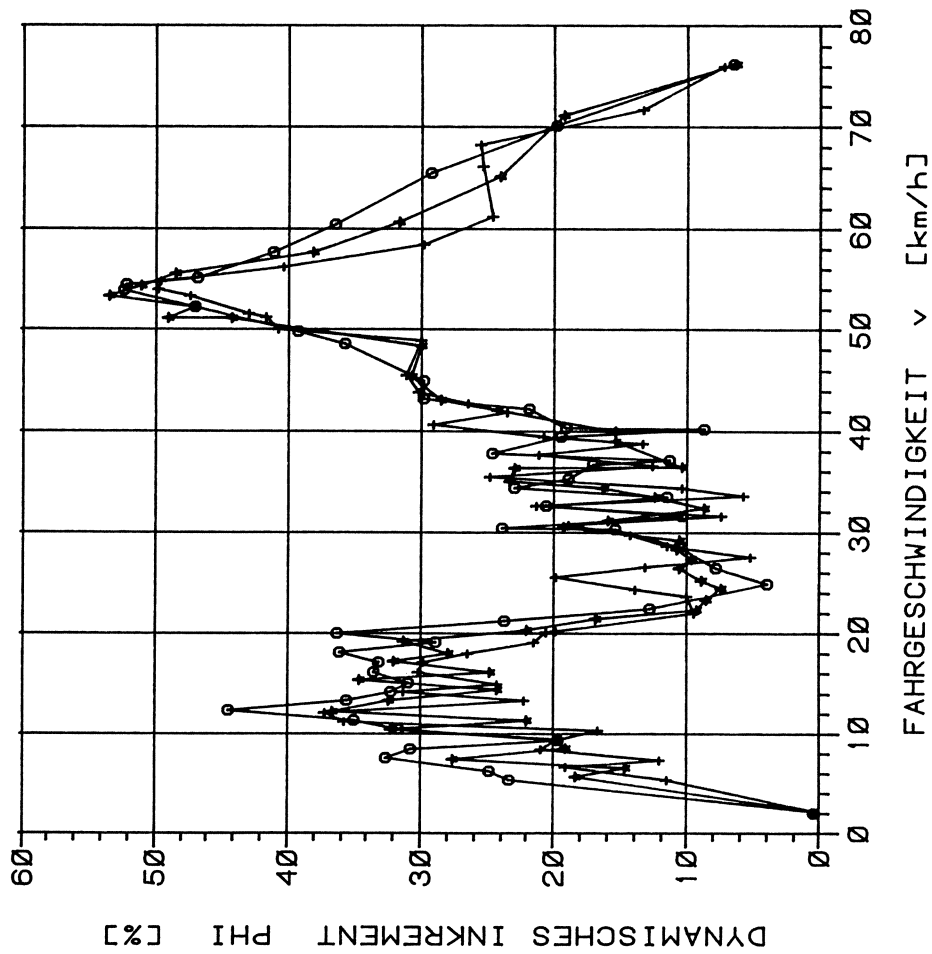
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	12R 10 AoA	-1.03 MM	45.65
+	WG Ø2	12R 6 AoA	-1.03 MM	40.61
+	WG Ø2	12R 6 AoA	-1.03 MM	53.5



A7.24
A7.23

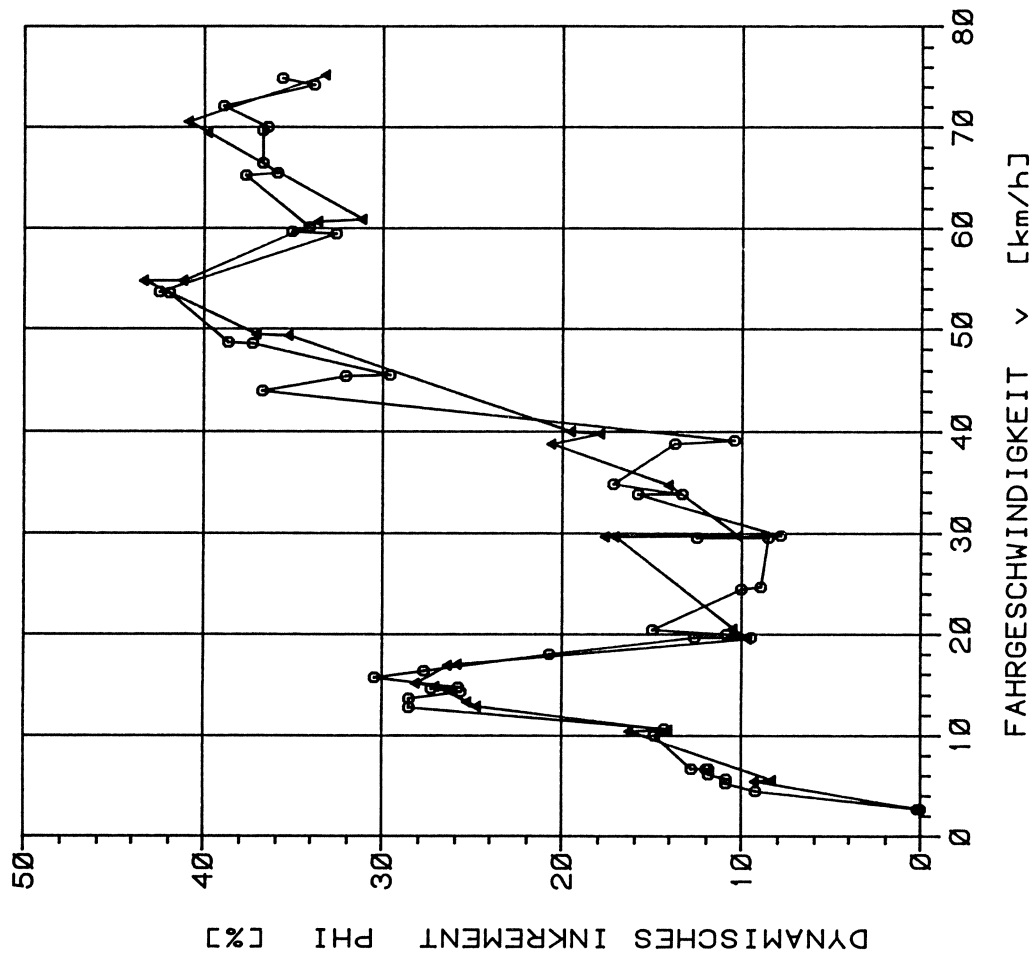
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	13R 10 AoA	-1.03 MM	52.18
+	WG Ø2	13R 8 AoA	-1.03 MM	53.34
+	WG Ø2	13R 6 AoA	-1.03 MM	49.66
				53.9
				53.3
				54.0



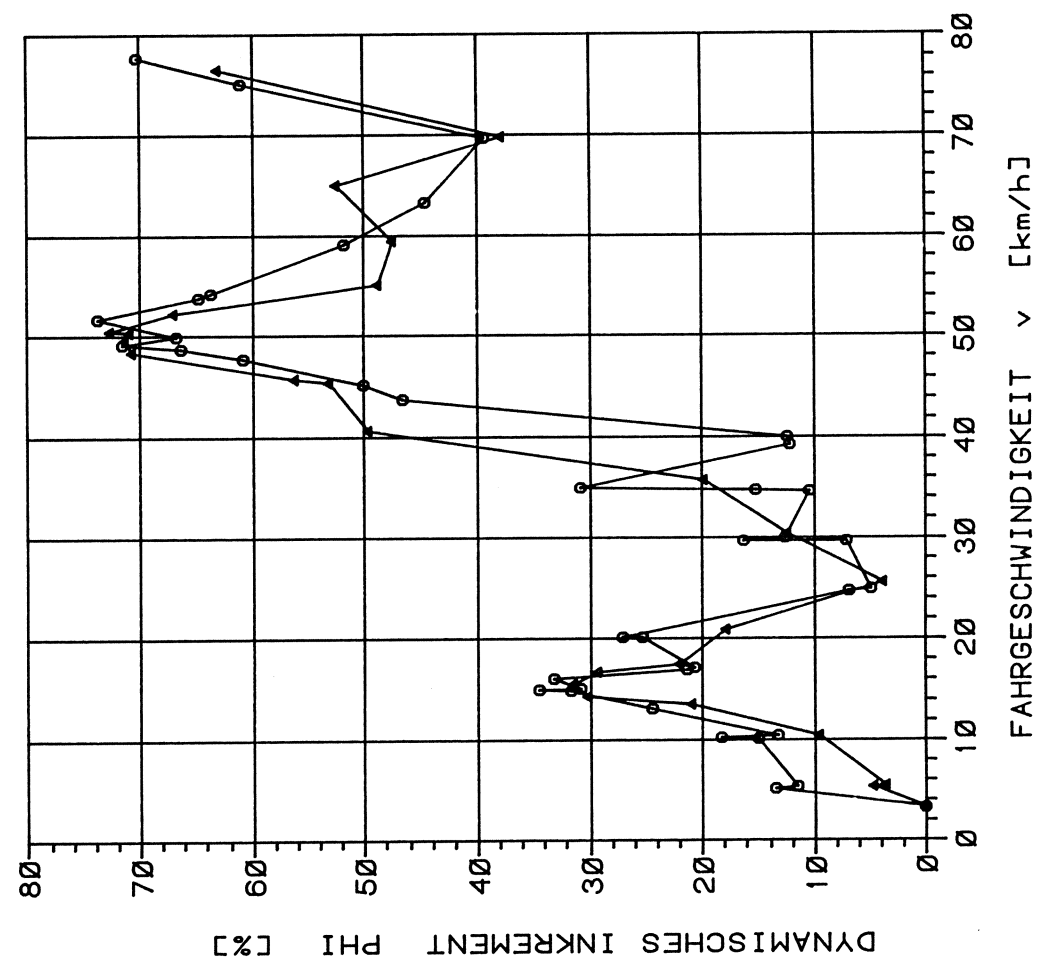
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 2ØR, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	2ØR 10 AoA	-1.75 MM	42.42
+	WG Ø2	2ØR 6 AoA	-1.75 MM	43.22
				53.7
				54.7



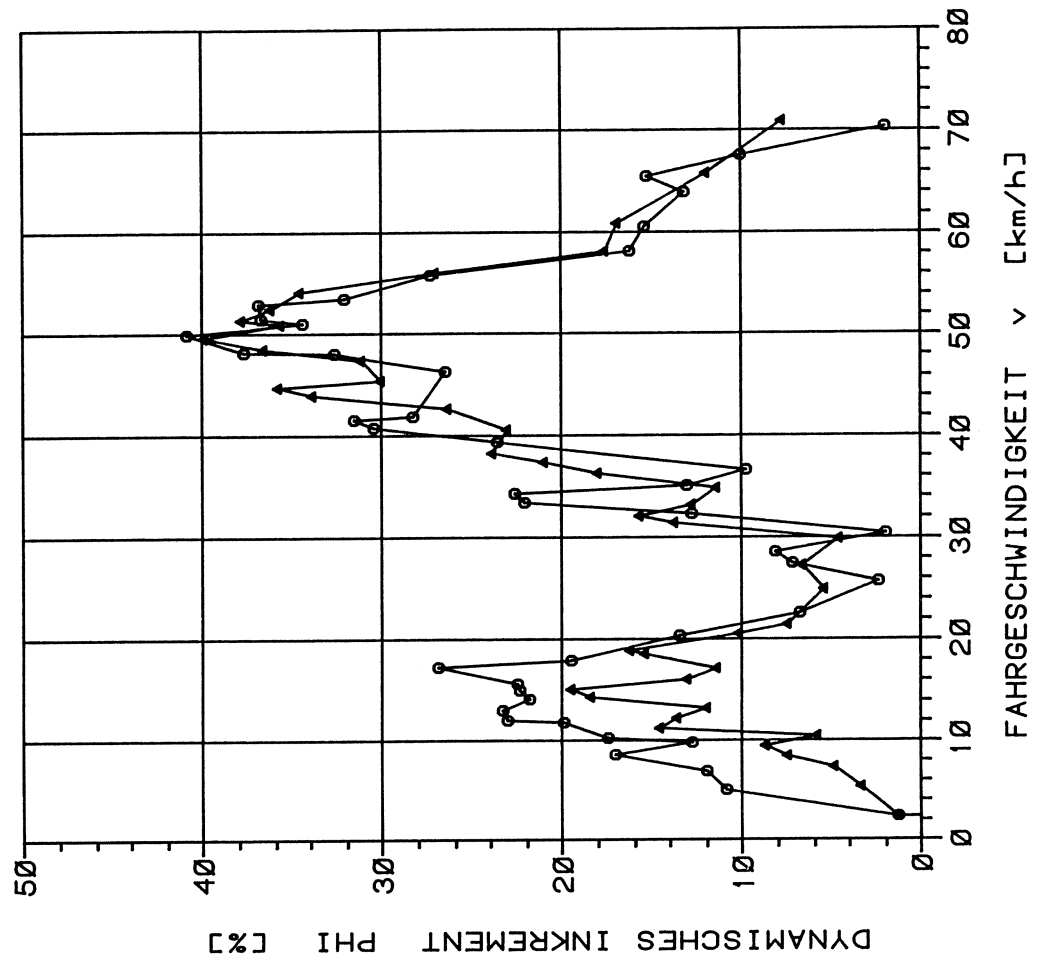
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	25R 10 AoA	-1.76 MM	73.71
○	WG Ø2	25R 6 AoA	-1.76 MM	51.7
△	WG Ø2	25R 6 AoA	-1.76 MM	72.63
△	WG Ø2	25R 6 AoA	-1.76 MM	50.4



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, WG Ø2

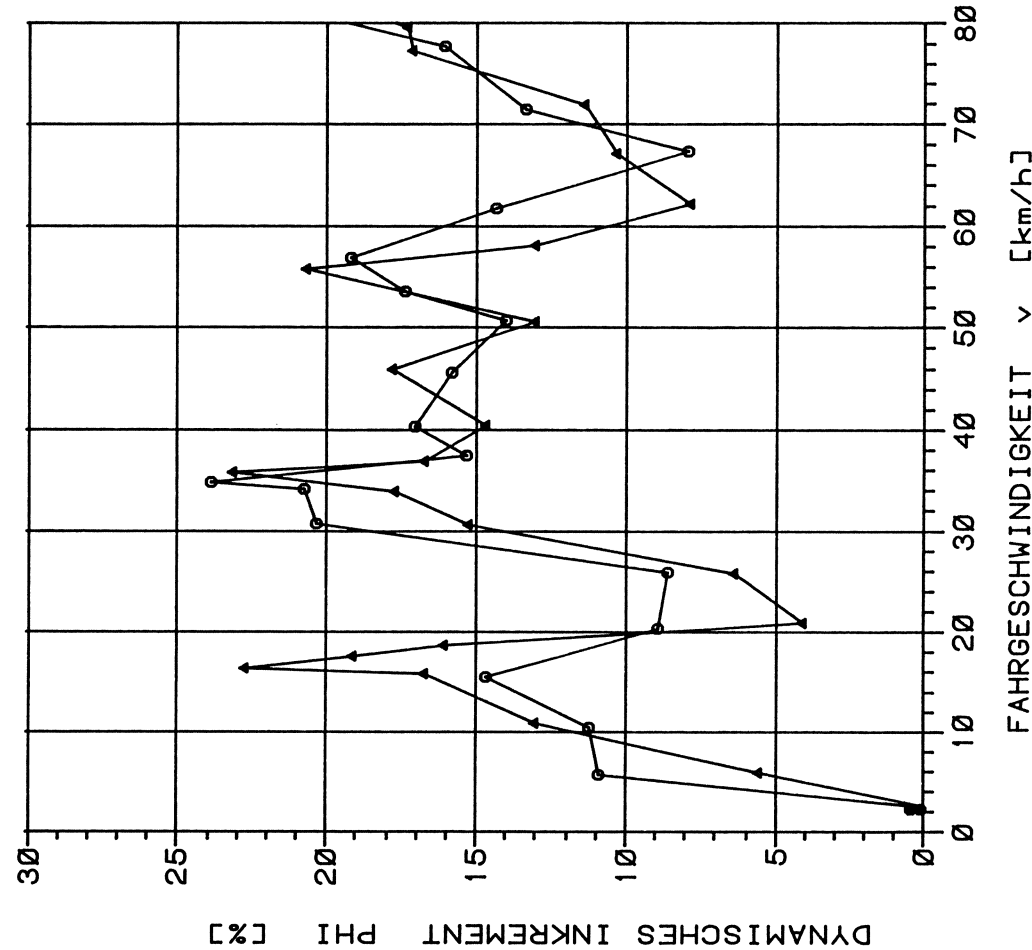
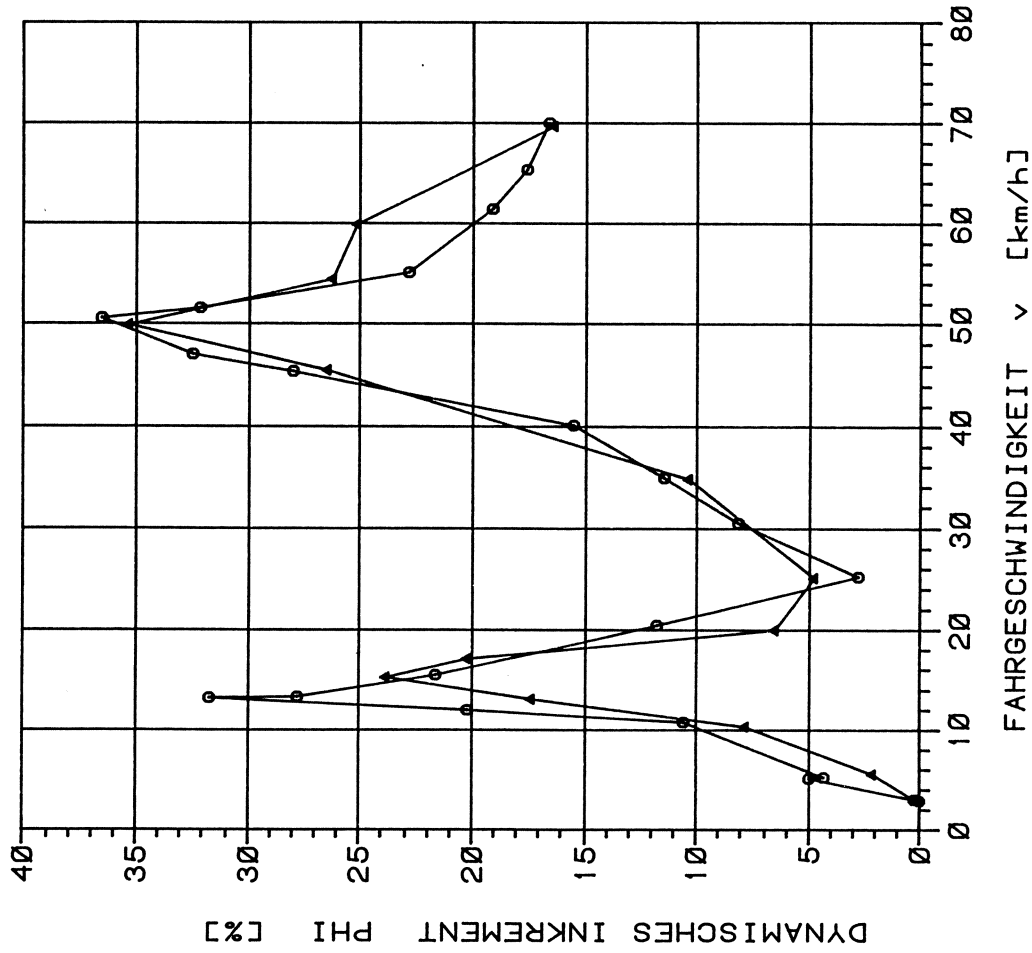
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	42R 10 AoA	-1.72 MM	40.81
○	WG Ø2	42R 6 AoA	-1.72 MM	39.88
△	WG Ø2	42R 6 AoA	-1.72 MM	49.9
△	WG Ø2	42R 6 AoA	-1.72 MM	49.5



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, WG Ø2

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, WG Ø2

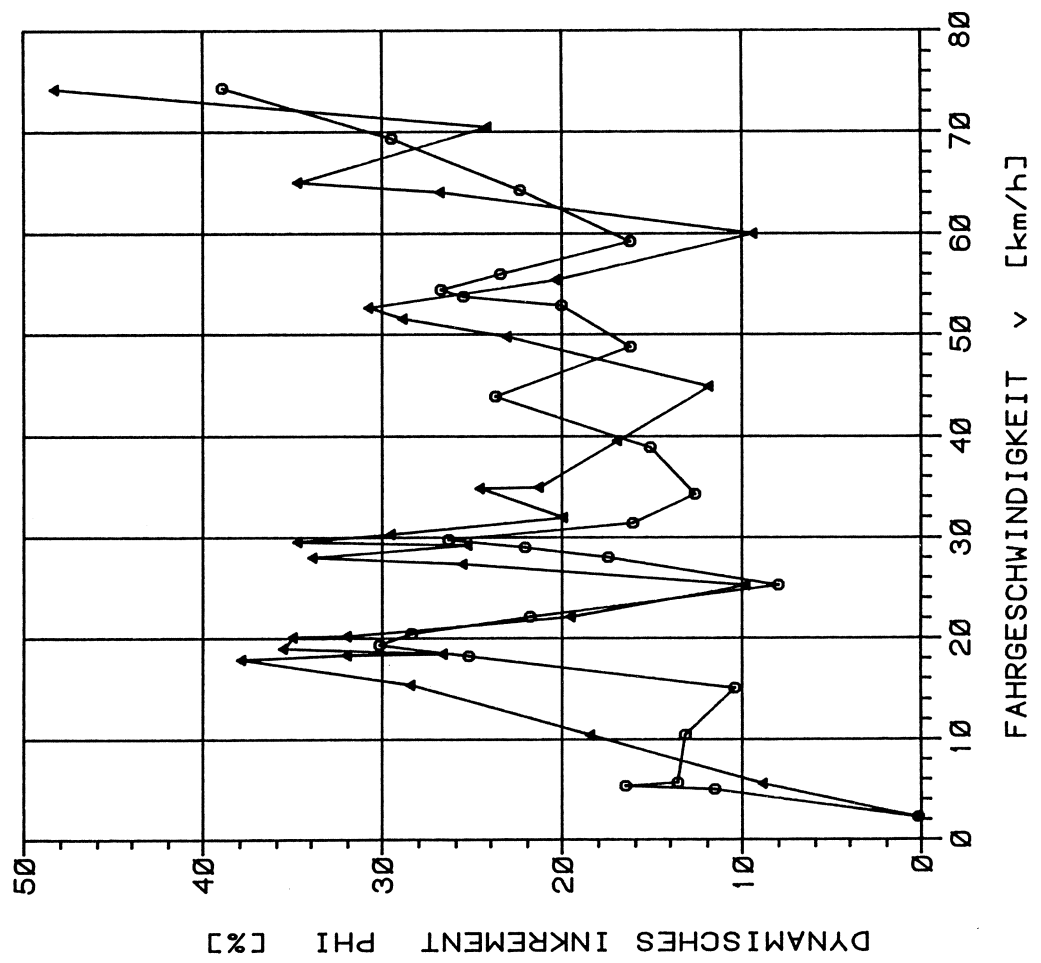
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	52R 10 AoA	-2.52 MM	36.46
○	WG Ø2	52R 6 AoA	-2.52 MM	35.28
○	WG Ø2	52R 10 AoA	-1.51 MM	34.7
○	WG Ø2	71R 6 AoA	-1.51 MM	23.10
○	WG Ø2	71R 10 AoA	-1.51 MM	23.83
○	WG Ø2	71R 10 AoA	-1.51 MM	34.7
○	WG Ø2	71R 6 AoA	-1.51 MM	35.7
○	WG Ø2	71R 6 AoA	-1.51 MM	35.7



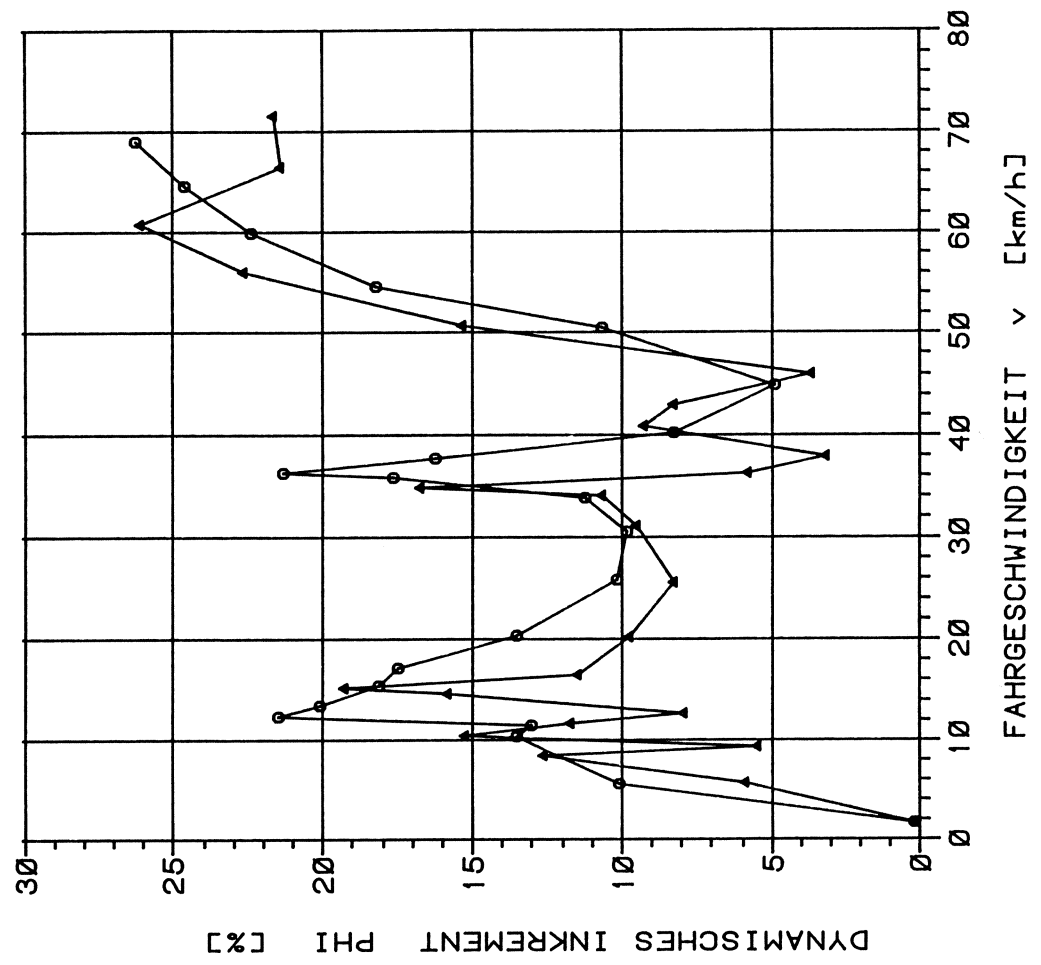
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, WG Ø2

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
WG Ø2	74R 10 AoA	-1.83 MM	38.88	74.3
WG Ø2	74R 6 AoA	-1.83 MM	48.19	74.1



INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
WG Ø2	76R 10 AoA	-2.22 MM	26.20	69.0
WG Ø2	76R 6 AoA	-2.22 MM	26.02	60.7

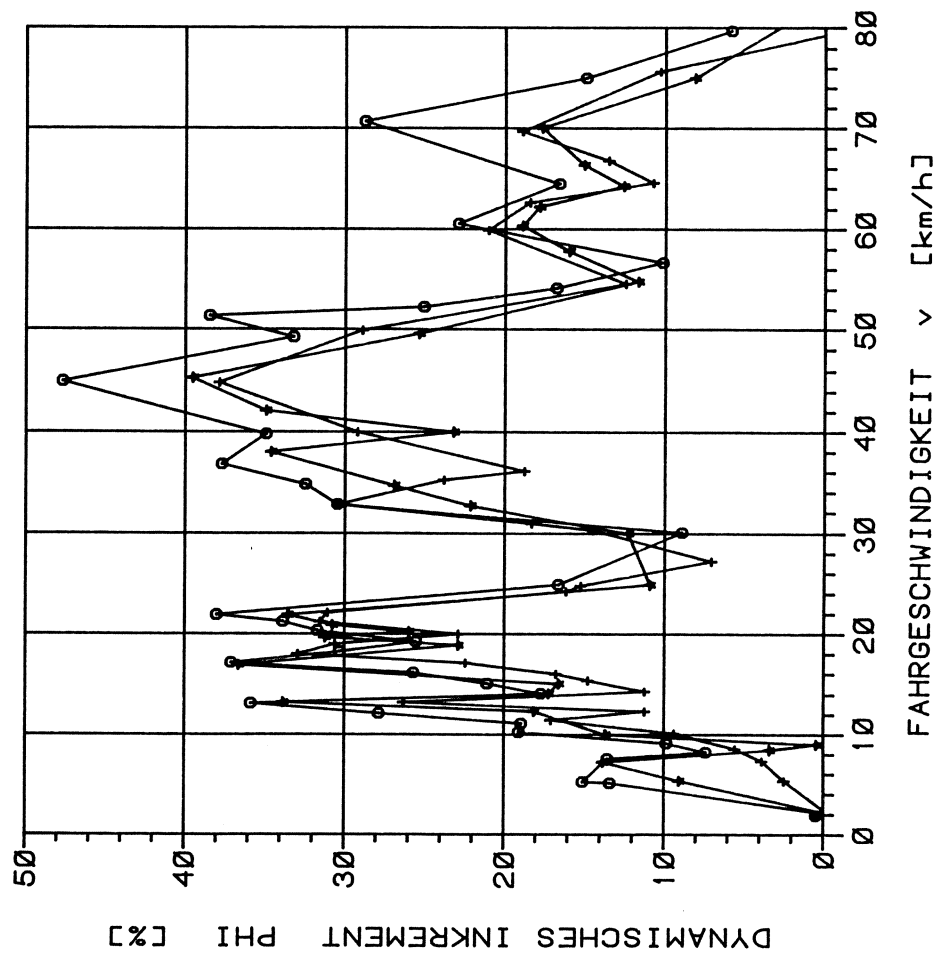


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, WG 22

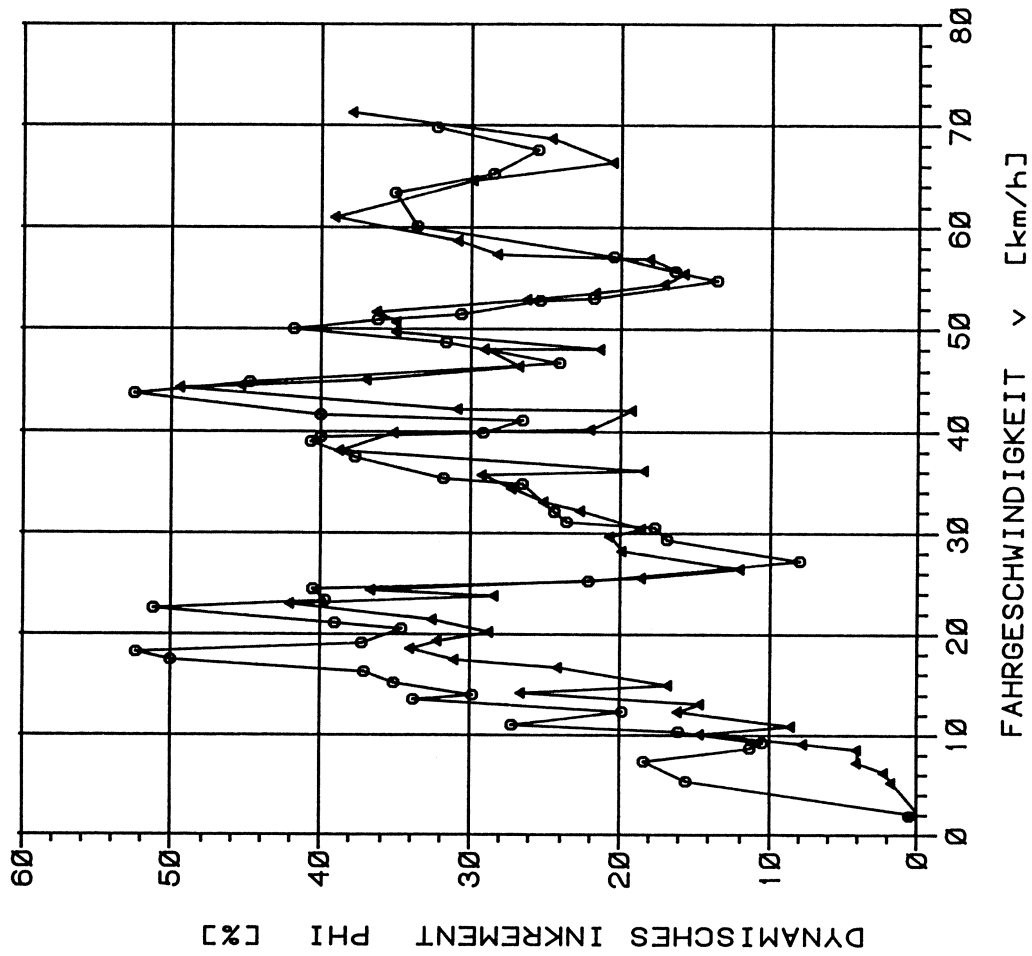
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, WG 22

A7.32
A7.31

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	11R 10 AoA	-1.12 MM	44.9
+	WG 22	11R 8 AoA	-1.12 MM	45.2
+	WG 22	11R 6 AoA	-1.12 MM	44.8



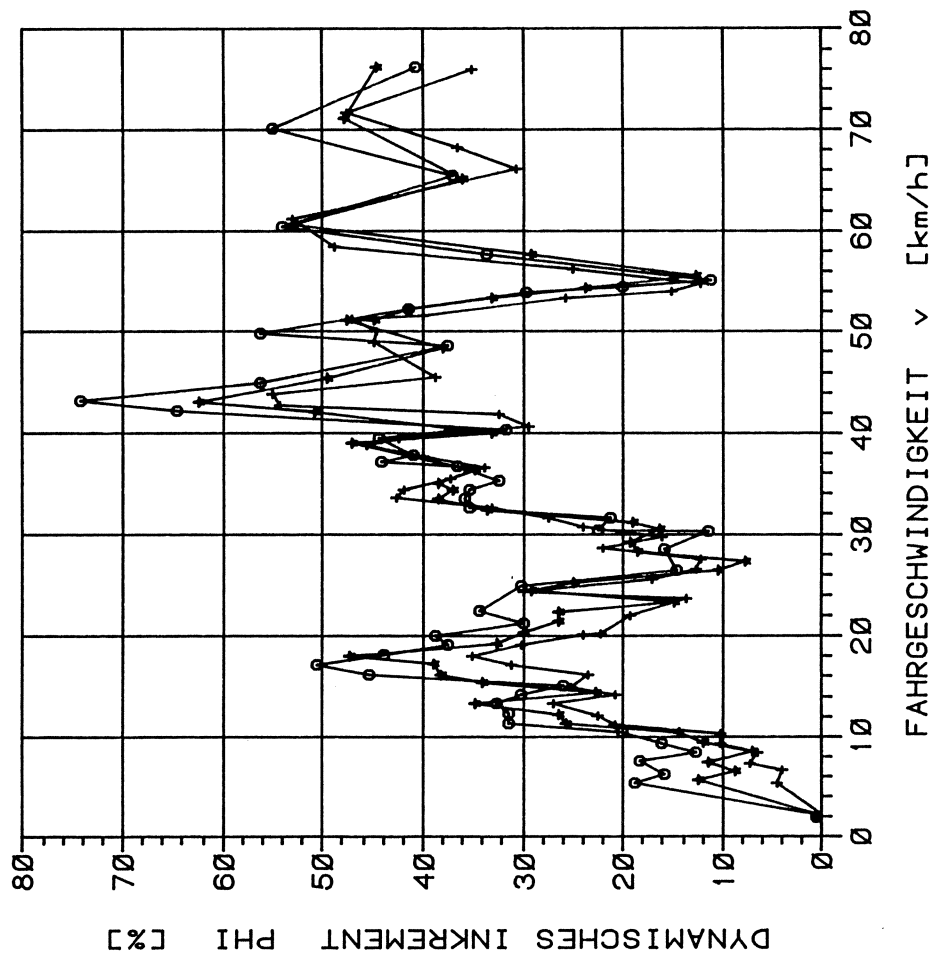
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	12R 10 AoA	-1.11 MM	43.7
+	WG 22	12R 6 AoA	-1.11 MM	44.3



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
○	WG 22	13R 10 AoA	-1.10 MM	74.15
+	WG 22	13R 8 AoA	-1.10 MM	62.30
+	WG 22	13R 6 AoA	-1.10 MM	55.01

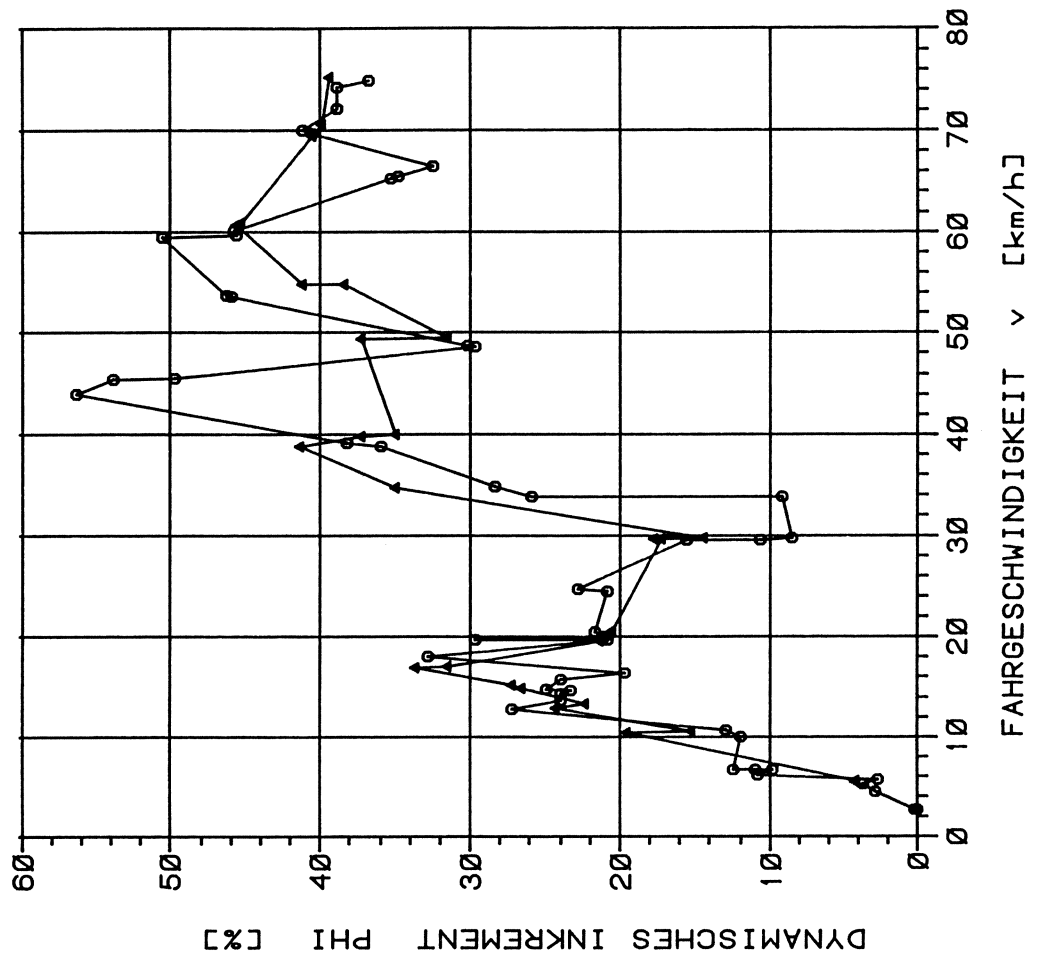
43.1
43.0
43.8



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
○	WG 22	20R 10 AoA	-1.83 MM	56.26
+	WG 22	20R 6 AoA	-1.83 MM	45.54

44.0
60.6

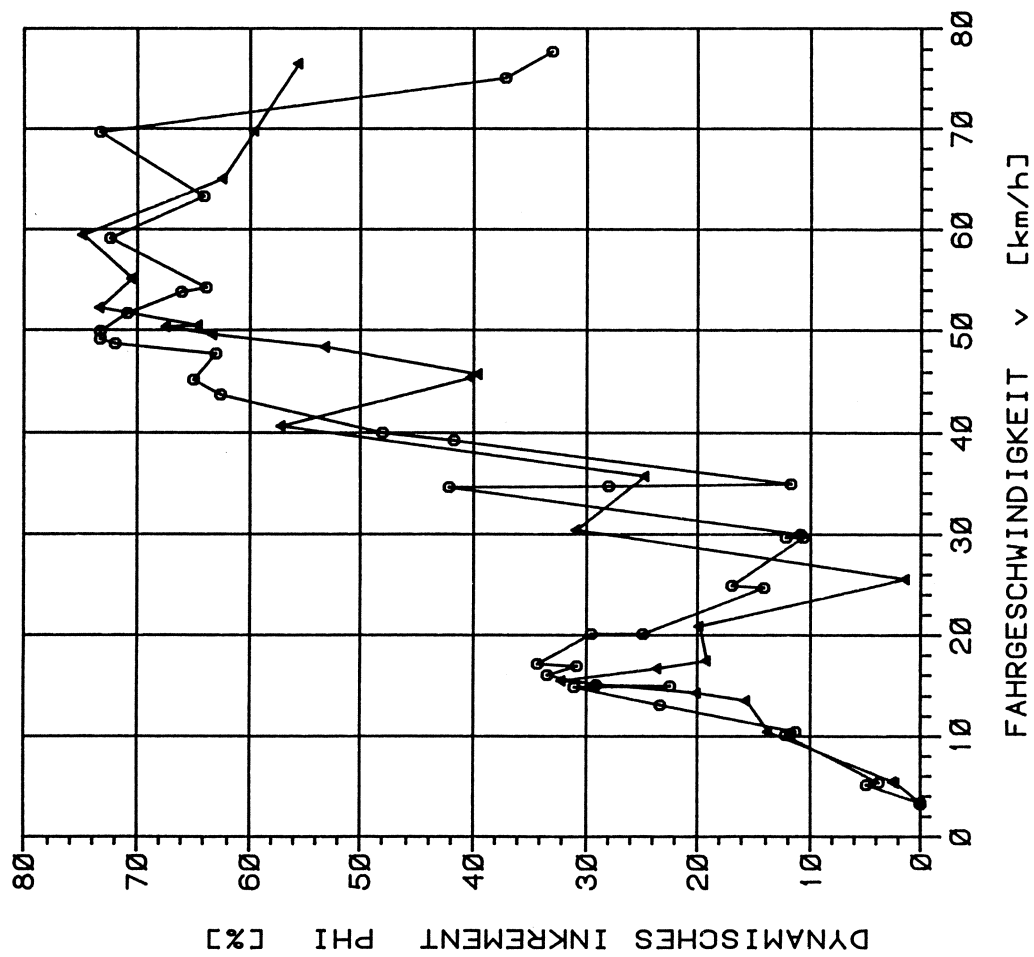


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, WG 22

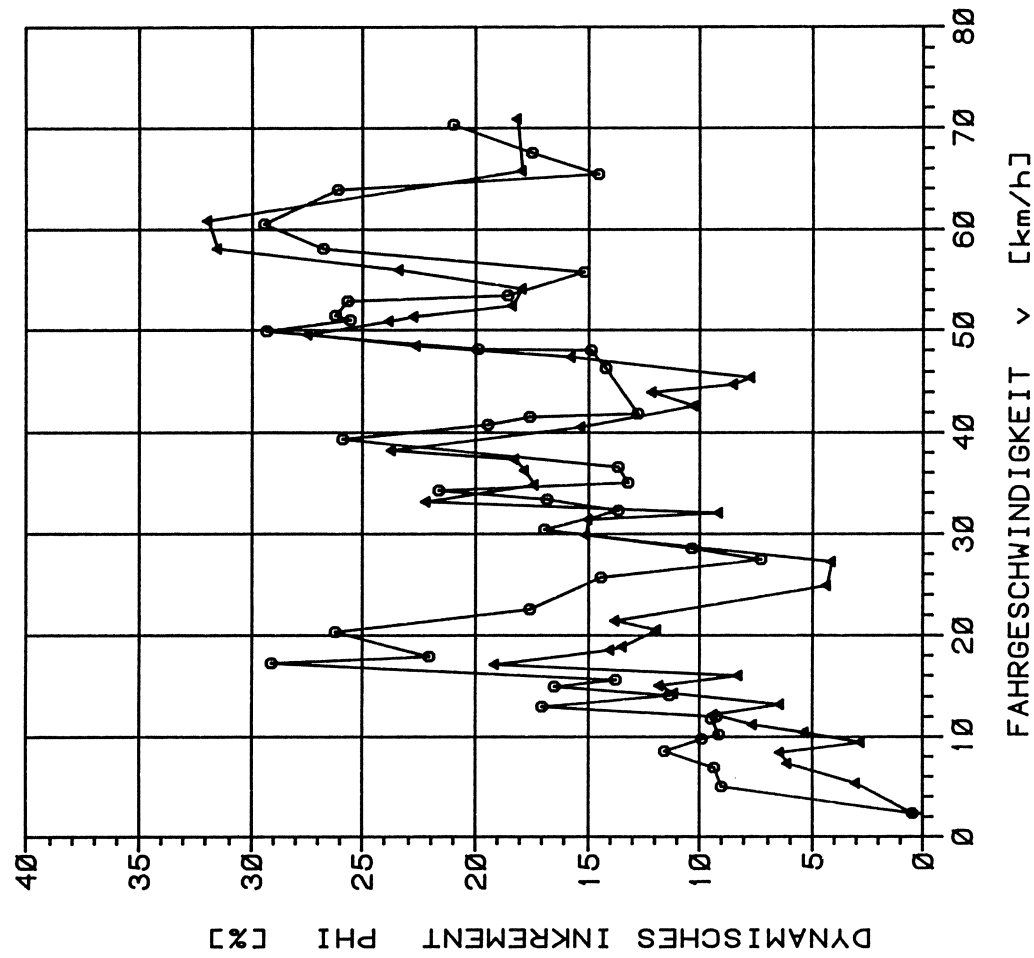
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, WG 22

A7.36
A7.35

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	25R 10 AoA	73.25	49.9
▲	WG 22	25R 6 AoA	74.75	59.4

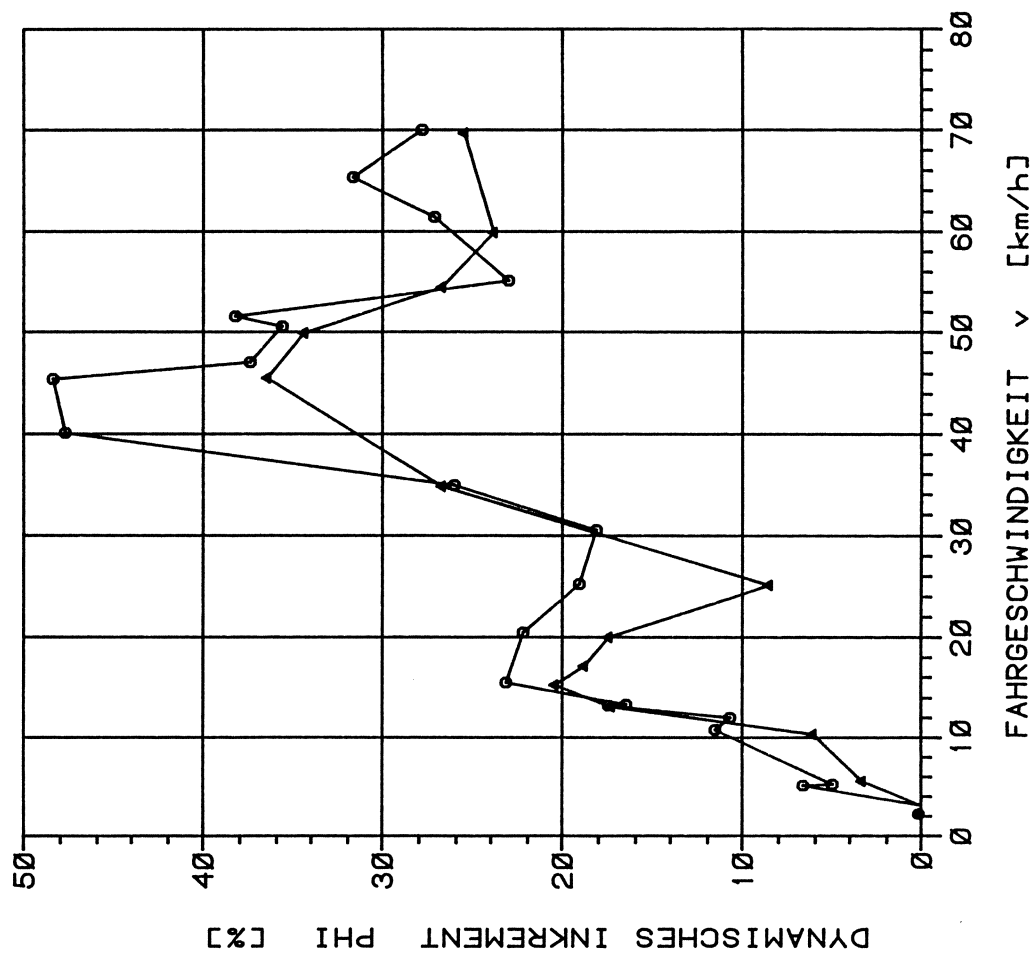


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	42R 10 AoA	29.35	60.4
▲	WG 22	42R 6 AoA	31.87	60.8



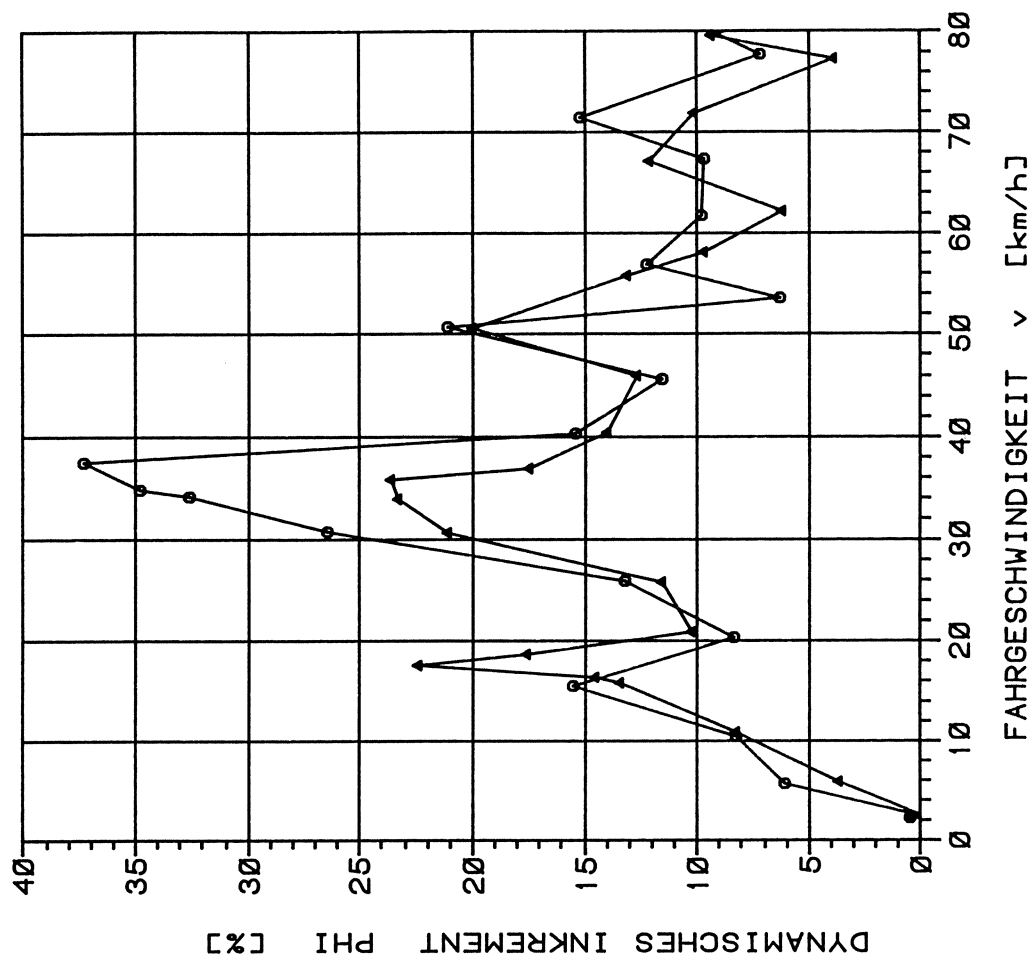
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22 52R 10 AOA	-2.65 MM	48.30	45.4
▲	WG 22 52R 6 AOA	-2.65 MM	36.43	45.4



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22 71R 10 AOA	-1.61 MM	37.24	37.4
▲	WG 22 71R 6 AOA	-1.61 MM	23.58	35.7

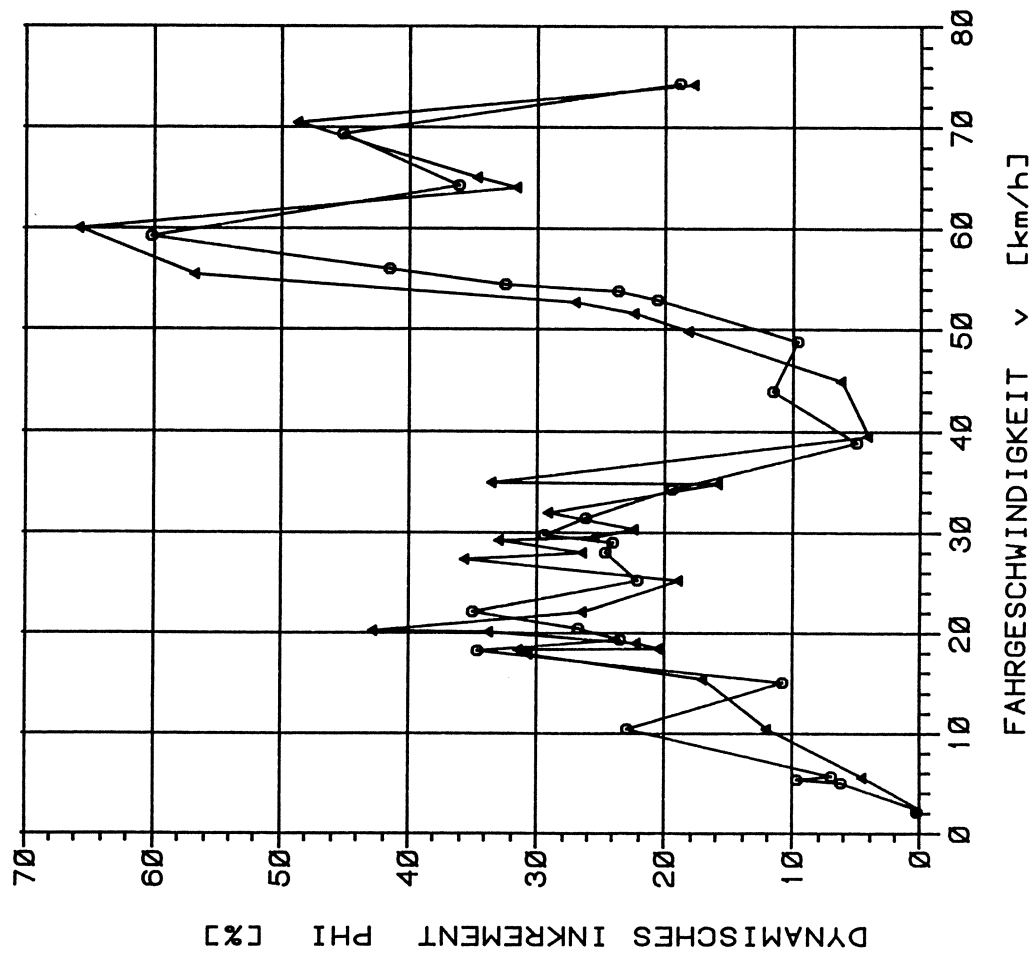


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, WG 22

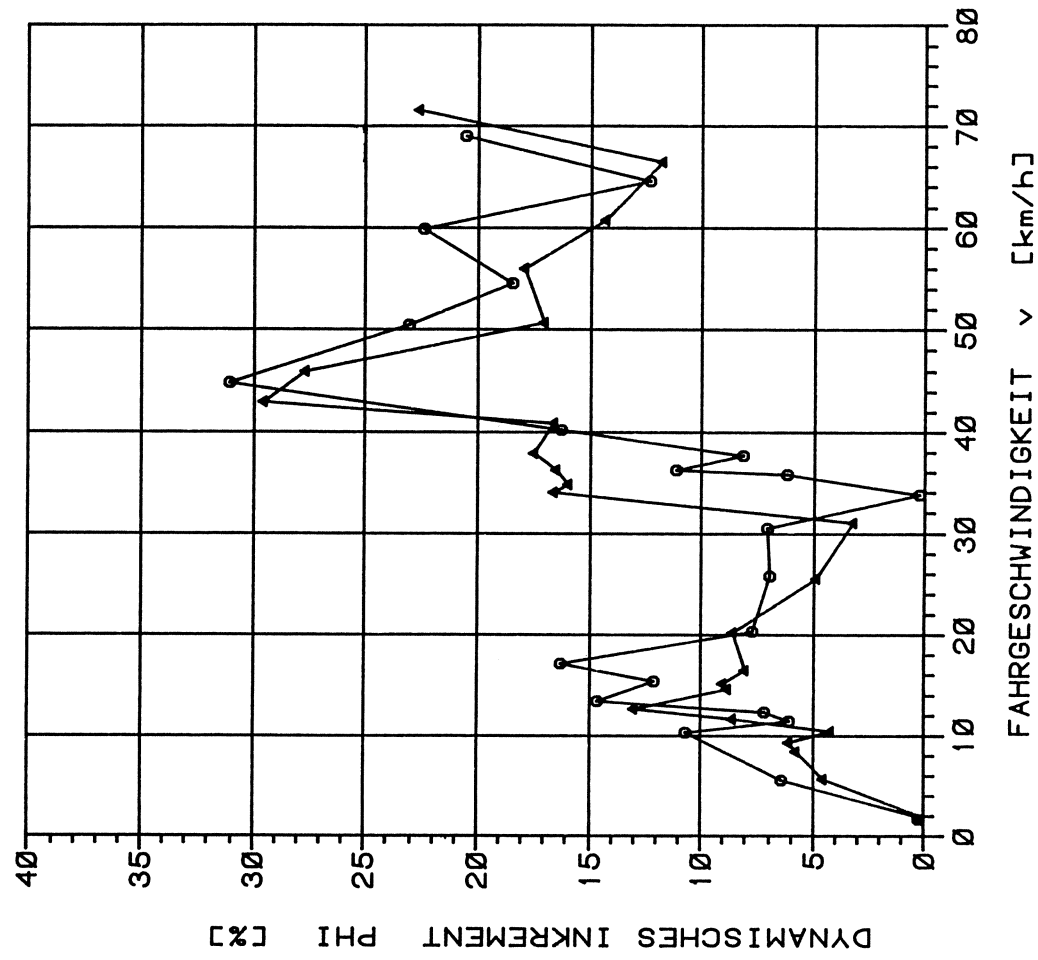
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, WG 22

A7.40
A7.39

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 22	74R 10 AoA	-1.91 MM	60.11	59.2
WG 22	74R 6 AoA	-1.91 MM	65.50	60.0

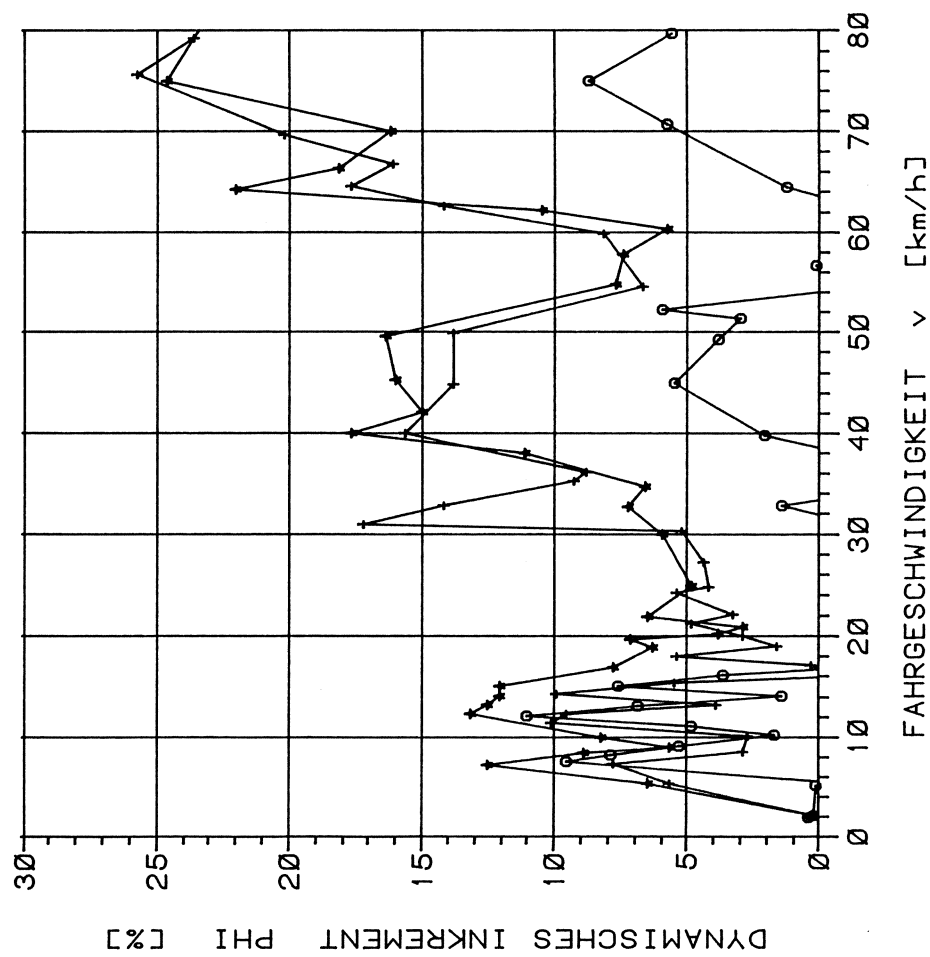


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 22	76R 10 AoA	-2.37 MM	31.00	44.8
WG 22	76R 6 AoA	-2.37 MM	29.49	42.9



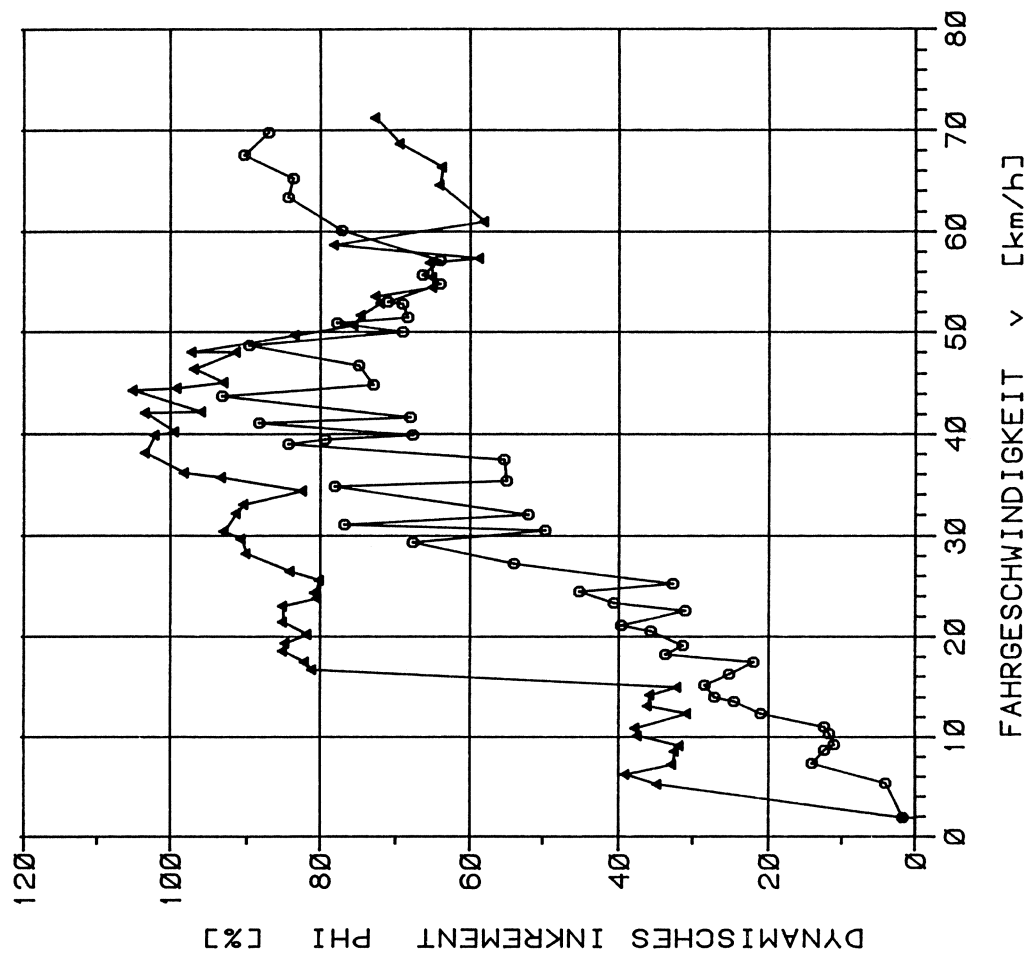
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	11R 10 AoA	9.05 MI	10.94
+	DMS 42	11R 8 AoA	9.05 MI	24.58
+	DMS 42	11R 6 AoA	9.05 MI	25.63
				12.1
				74.9
				75.6



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 42

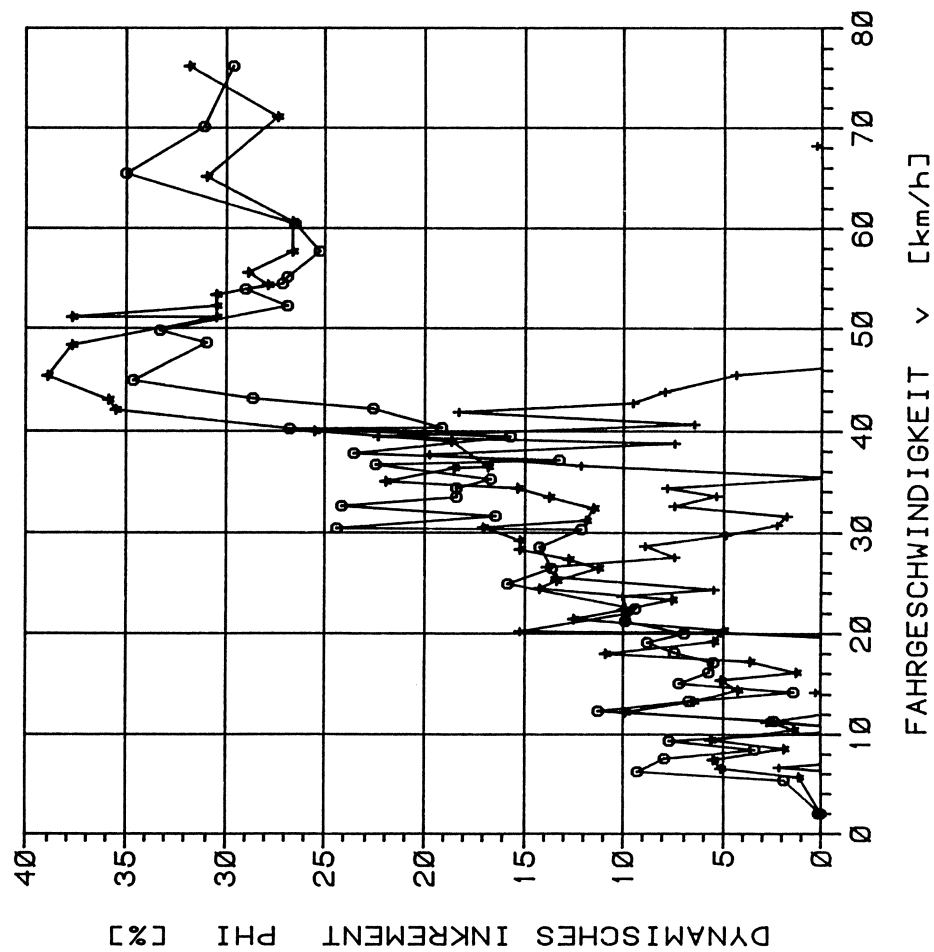
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	12R 10 AoA	5.62 MI	92.95
+	DMS 42	12R 6 AoA	5.62 MI	104.94
				43.7
				44.3



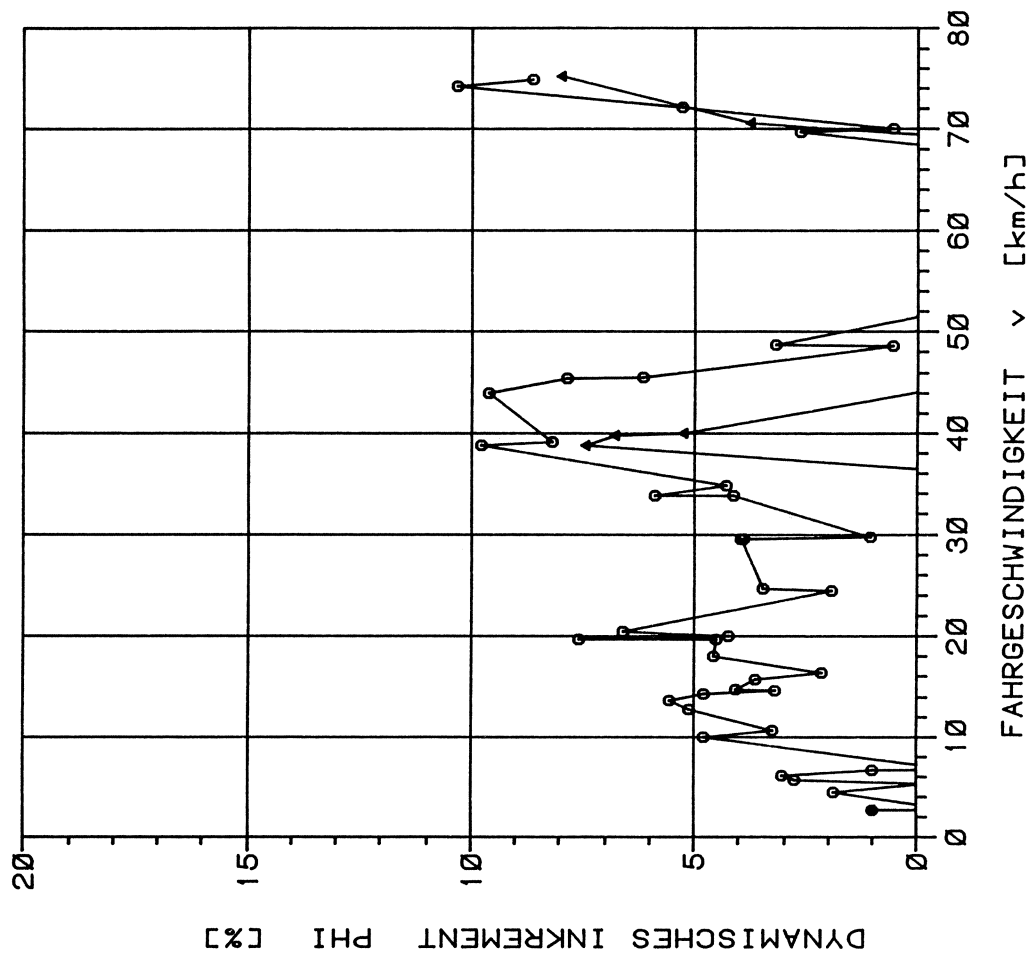
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 42

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	13R 10 AoA	8.94 MI	34.93
+	DMS 42	13R 8 AoA	8.94 MI	38.95
+	DMS 42	13R 6 AoA	8.94 MI	22.22
				65.5
				45.3
				39.4

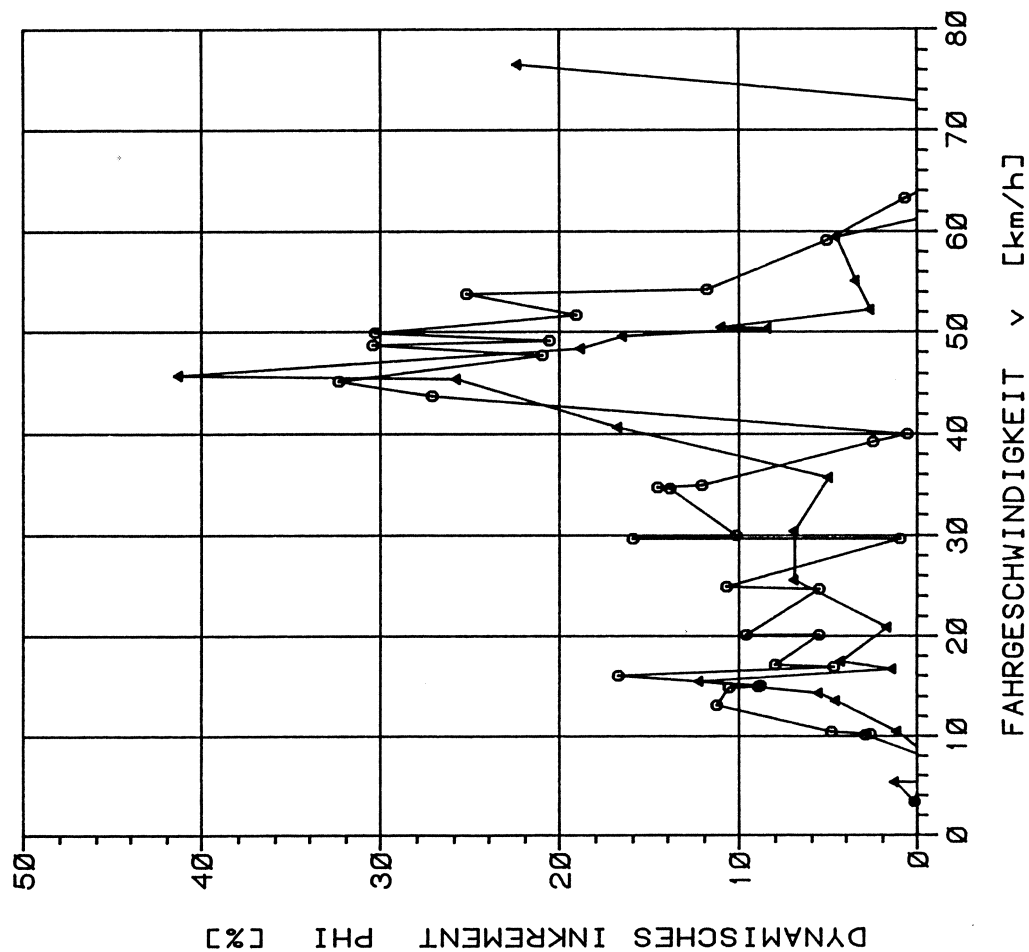


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	20R 10 AoA	16.74 MI	10.28
+	DMS 42	20R 6 AoA	16.74 MI	7.95
				74.2
				75.1



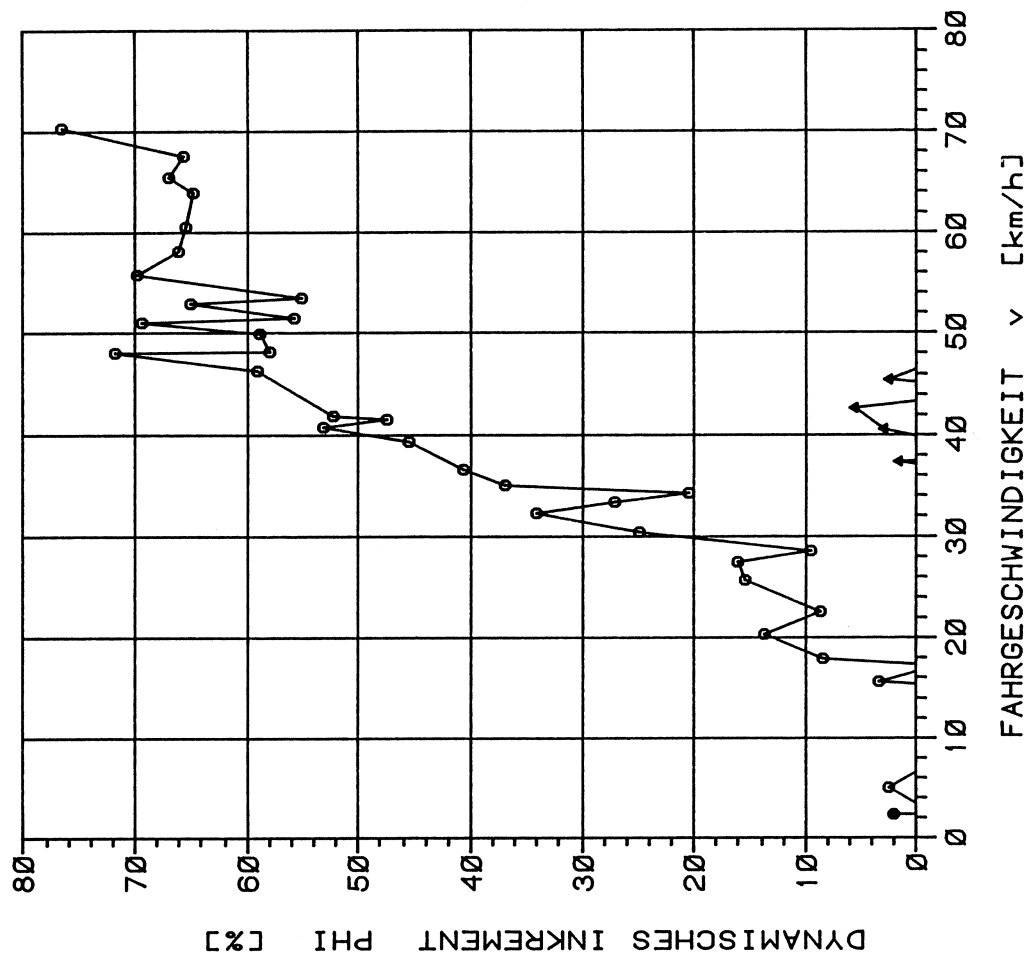
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	25R 10 AoA	14.63 MI	32.36
○	DMS 42	25R 6 AoA	14.63 MI	41.25
○	DMS 42	25R 10 AoA	14.63 MI	45.1
○	DMS 42	25R 6 AoA	14.63 MI	45.7



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 42

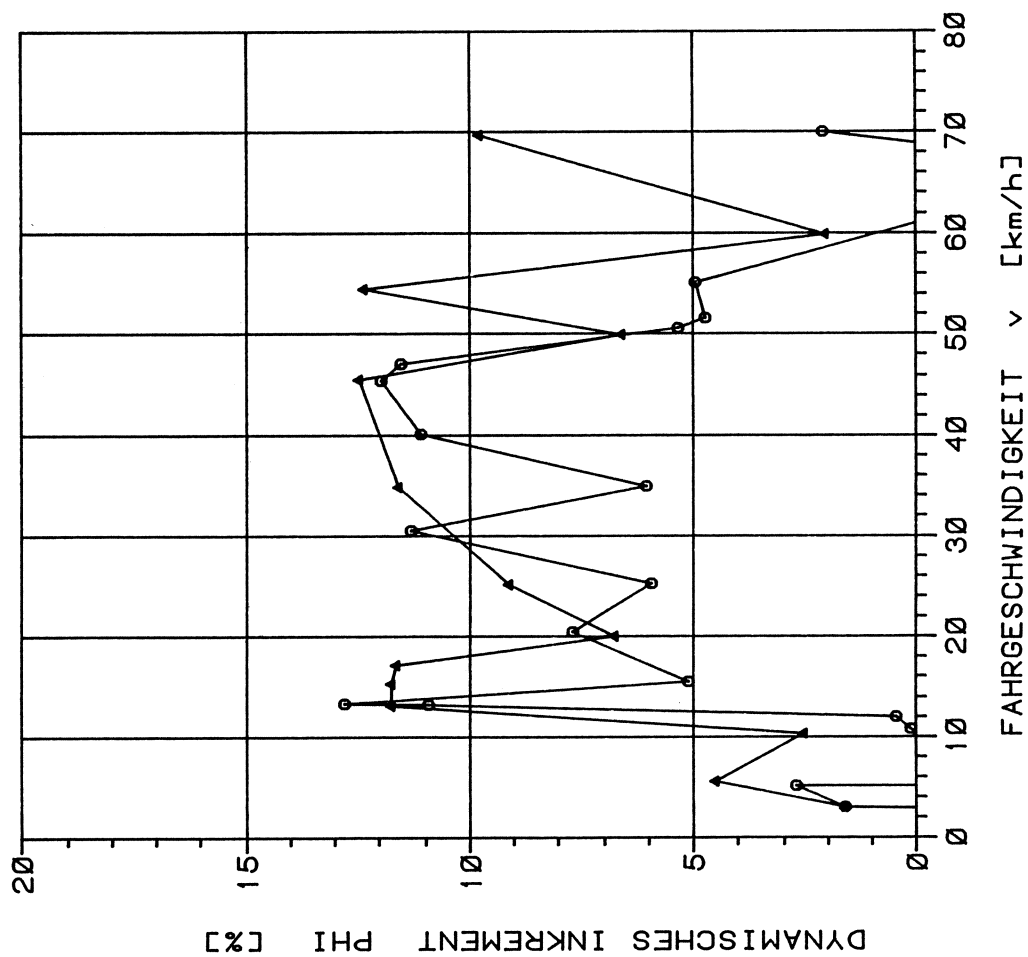
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	42R 10 AoA	7.32 MI	76.40
○	DMS 42	42R 6 AoA	7.32 MI	5.56
○	DMS 42	42R 10 AoA	7.32 MI	70.3
○	DMS 42	42R 6 AoA	7.32 MI	42.6



A7.48
A7.47

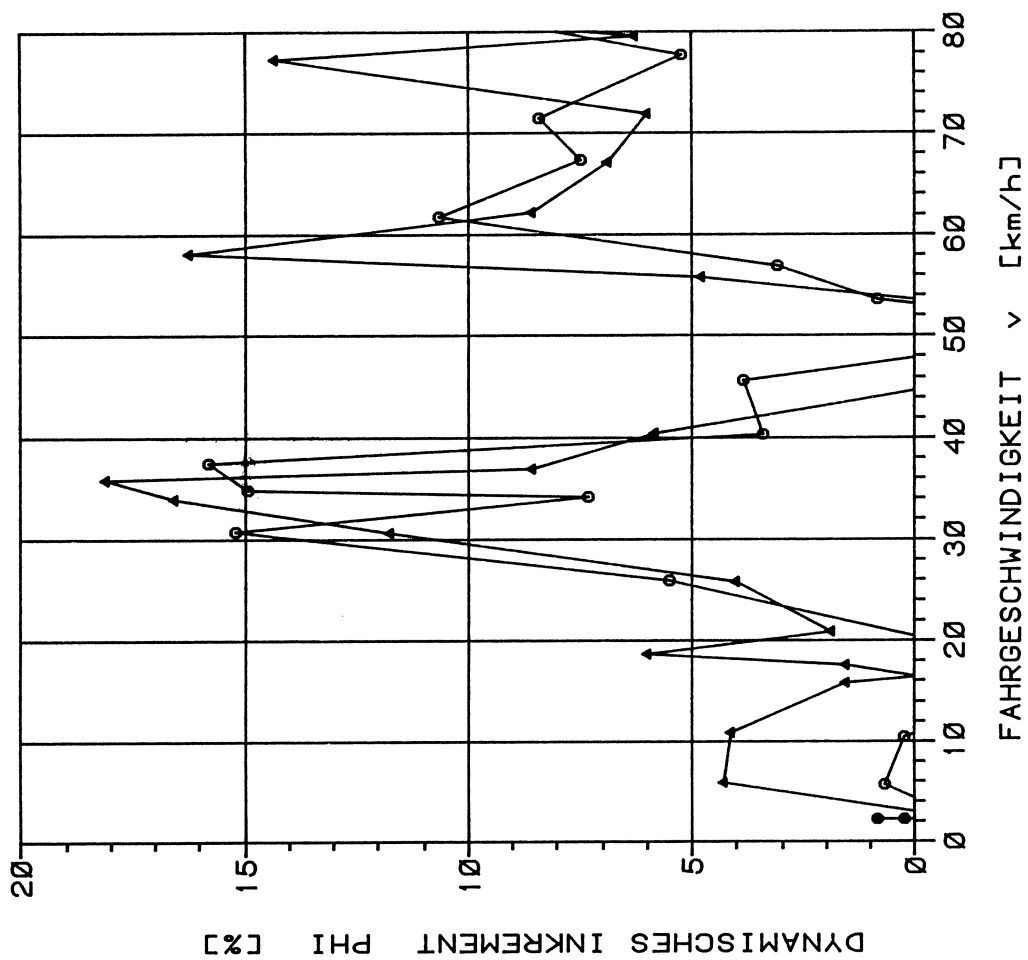
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 52R 10 AoA	15.05 MI	12.75	13.3
▲	DMS 42 52R 6 AoA	15.05 MI	12.42	45.4



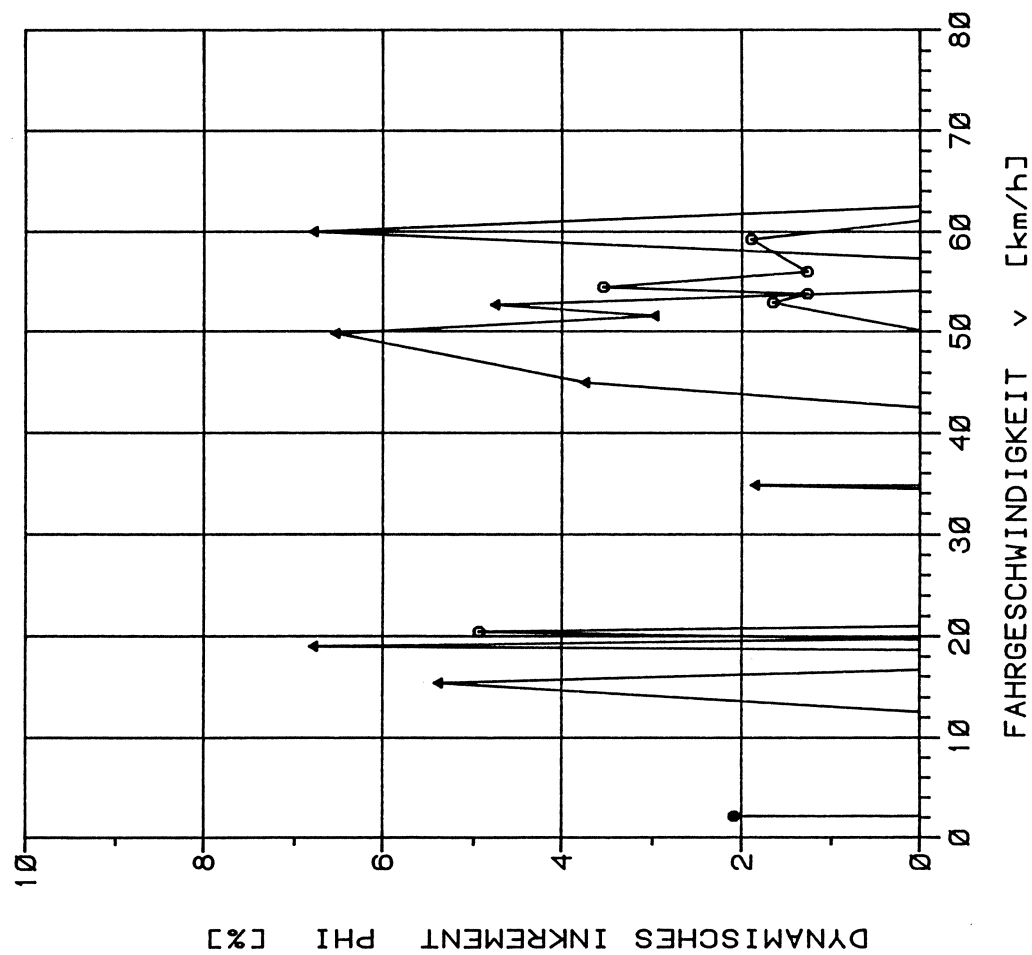
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 71R 10 AoA	9.72 MI	15.79	37.4
▲	DMS 42 71R 6 AoA	9.72 MI	18.06	35.7



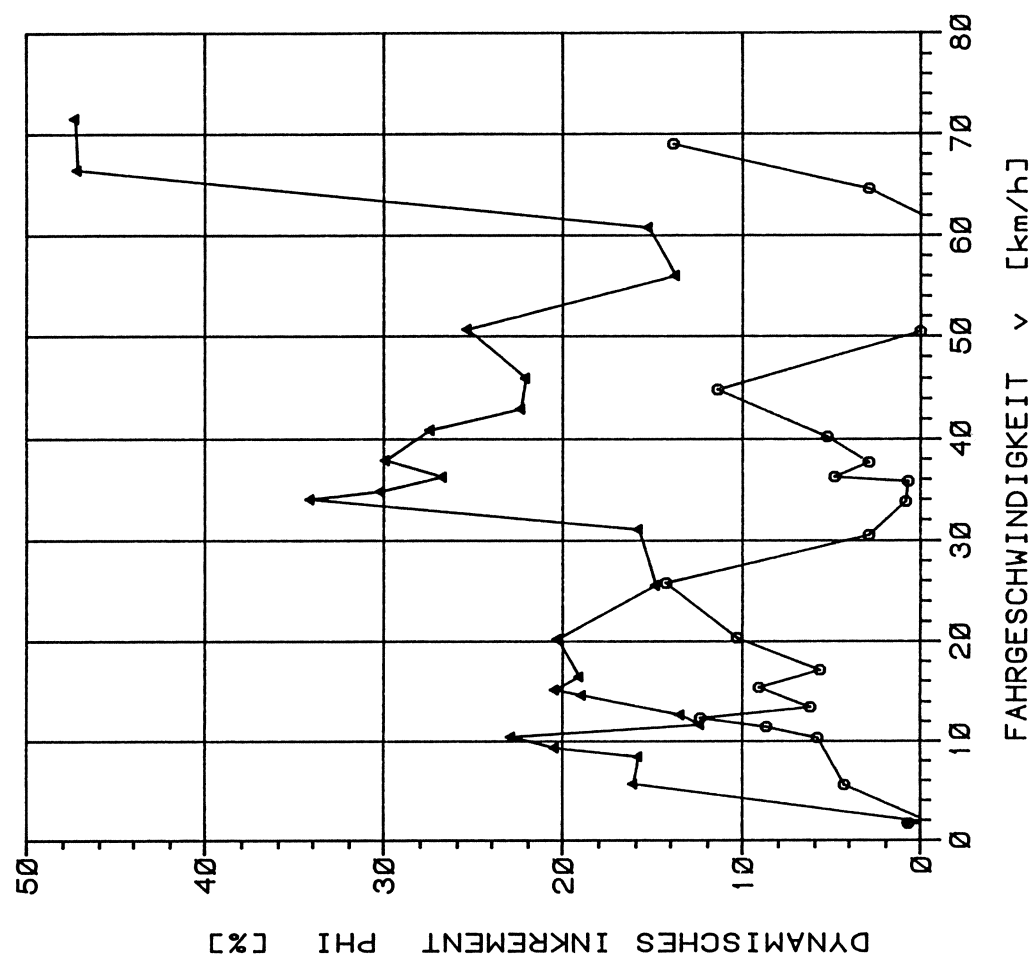
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
○	DMS 42	74R 10 AoA	11.62 MI	4.93
▲	DMS 42	74R 6 AoA	11.62 MI	6.78



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 42

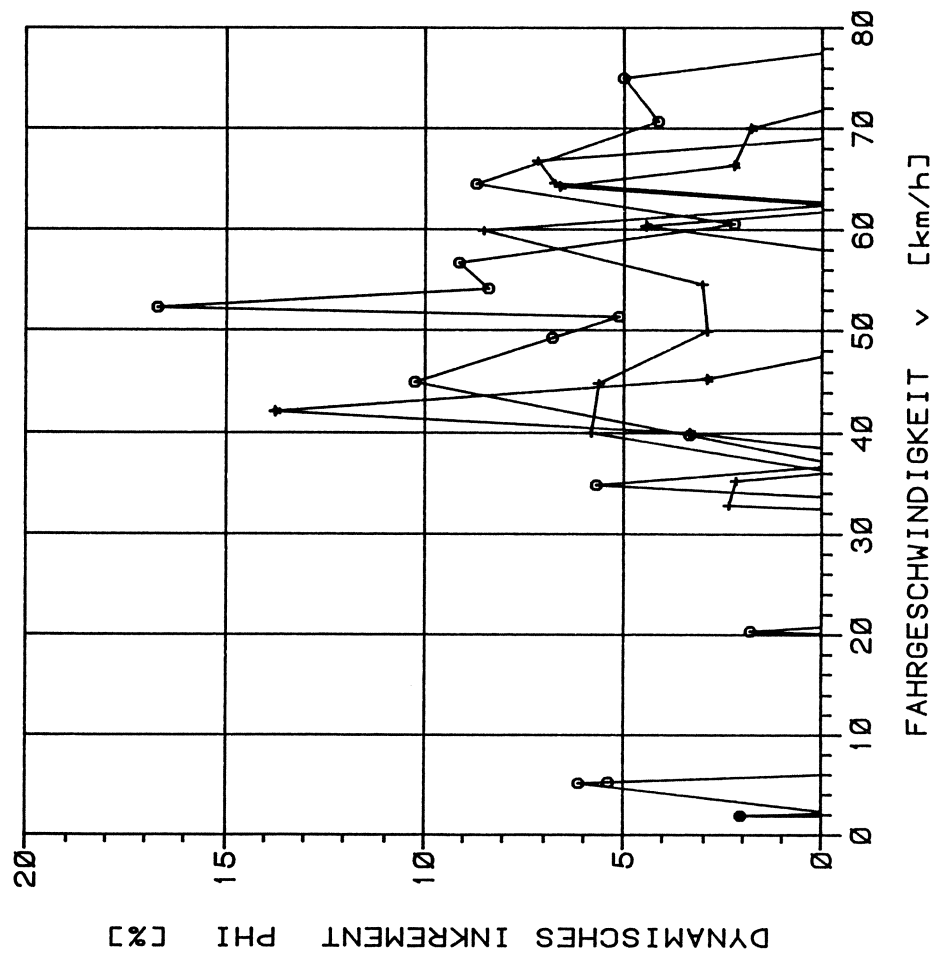
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
○	DMS 42	76R 10 AoA	10.25 MI	14.24
▲	DMS 42	76R 6 AoA	10.25 MI	47.28



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 52+

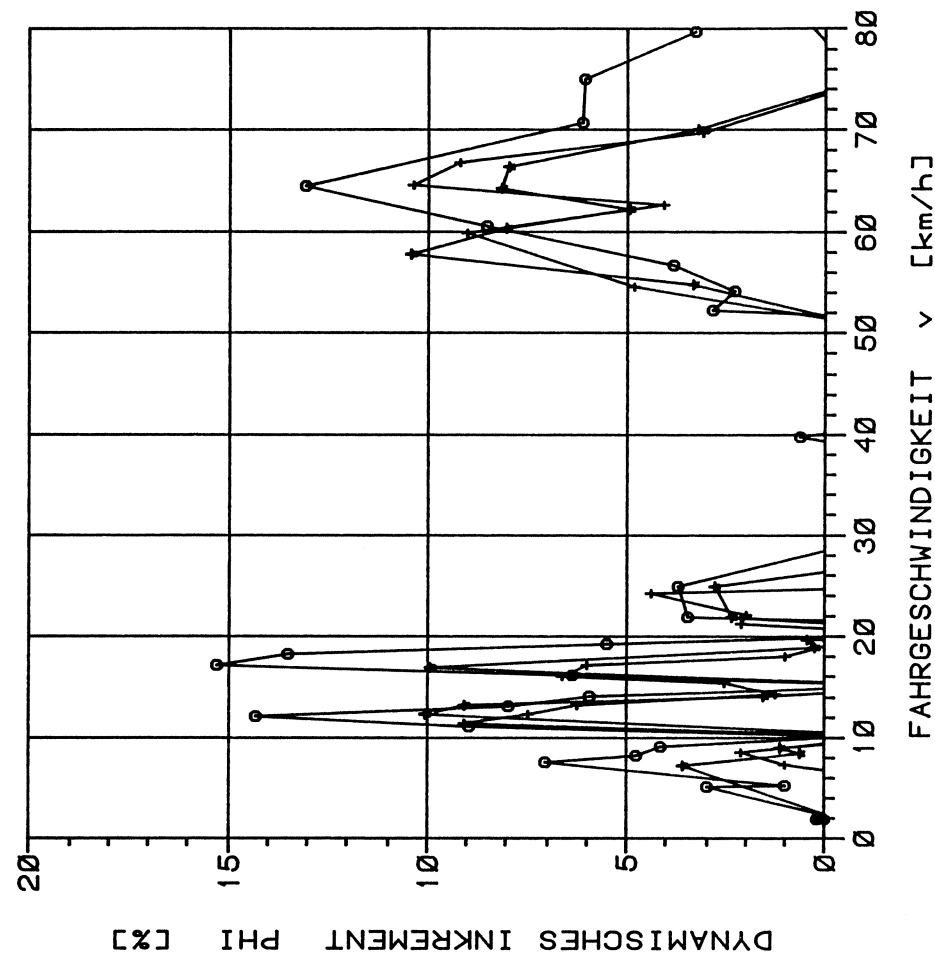
A7.52
A7.51

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AoA	13.19 MI	16.68	52.2
—+—	11R 8 AoA	13.19 MI	13.71	42.0
—+—	11R 6 AoA	13.19 MI	8.48	59.8



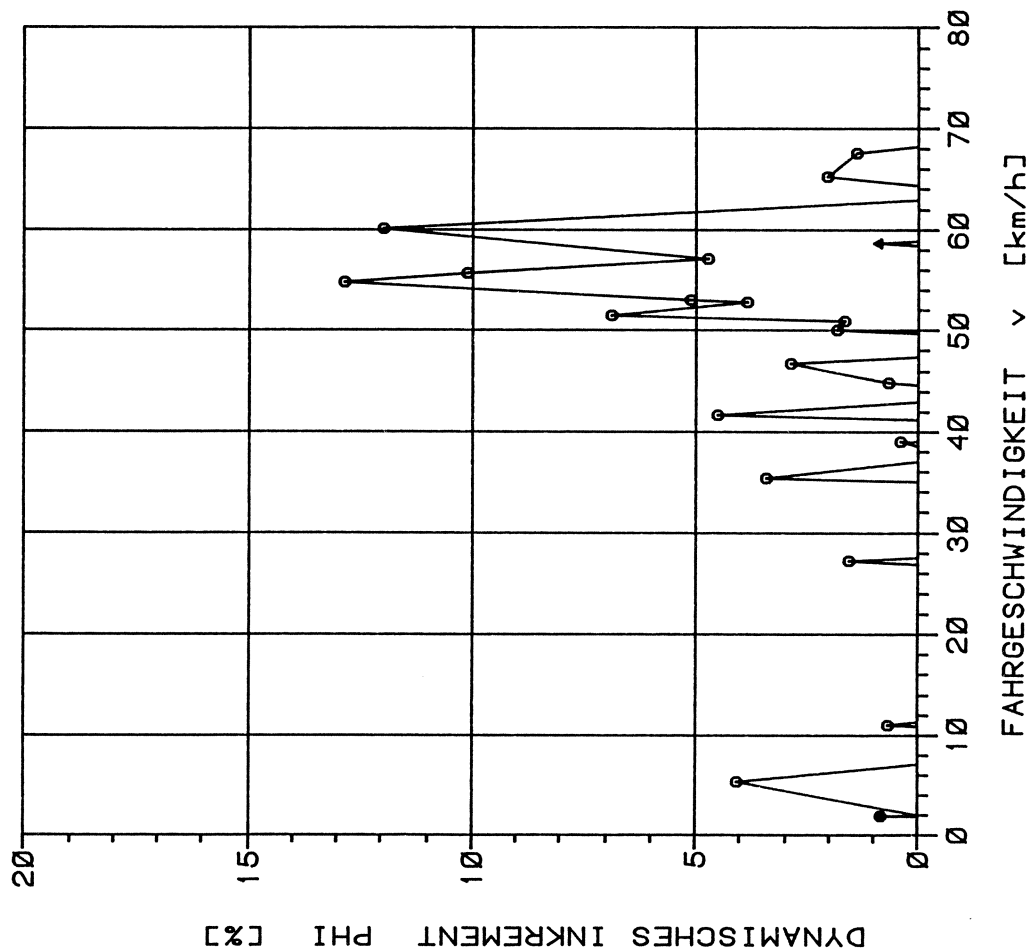
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—○	11R 10 AoA	-17.16 MI	15.25	17.1
—+—	11R 8 AoA	-17.16 MI	10.43	57.7
—+—	11R 6 AoA	-17.16 MI	10.34	64.6



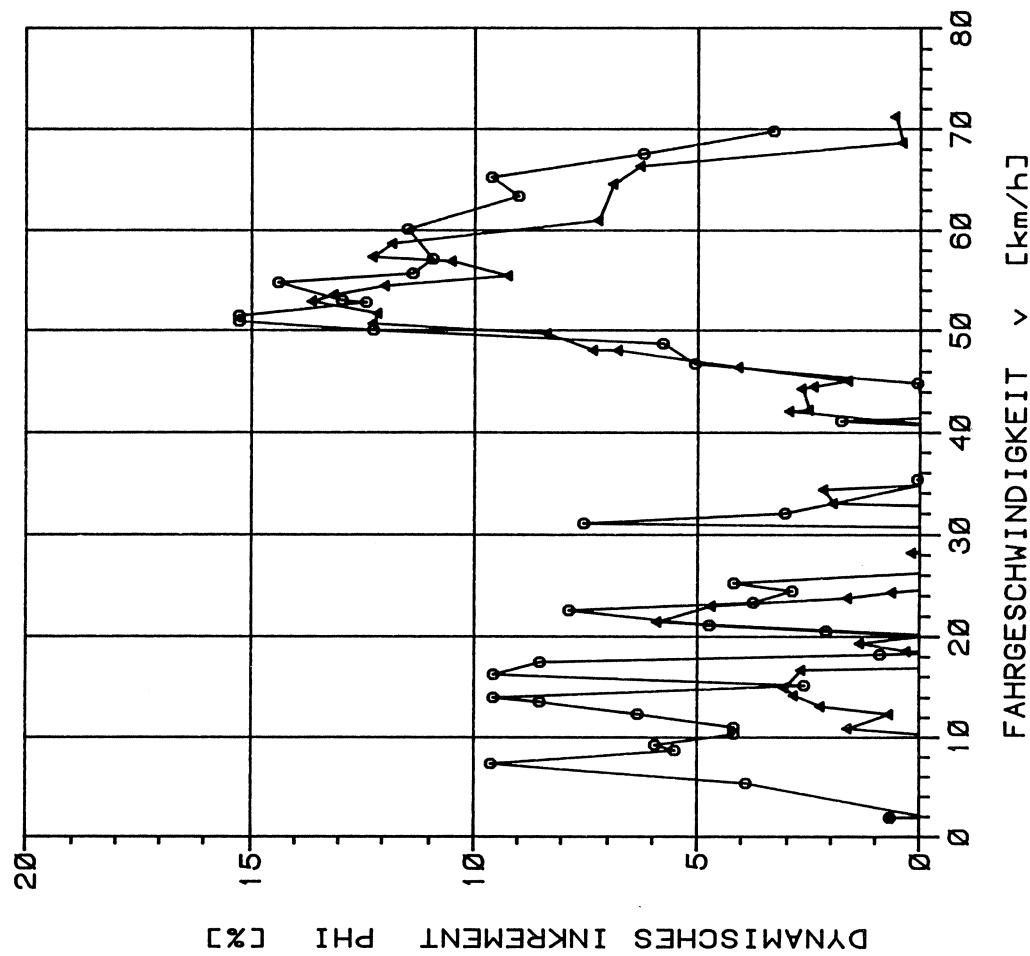
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	12R 10 AoA	16.57 MI	54.7
▲	DMS 52	12R 6 AoA	16.57 MI	58.6



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	12R 10 AoA	-16.78 MI	51.4
▲	DMS 52	12R 6 AoA	-16.78 MI	52.9

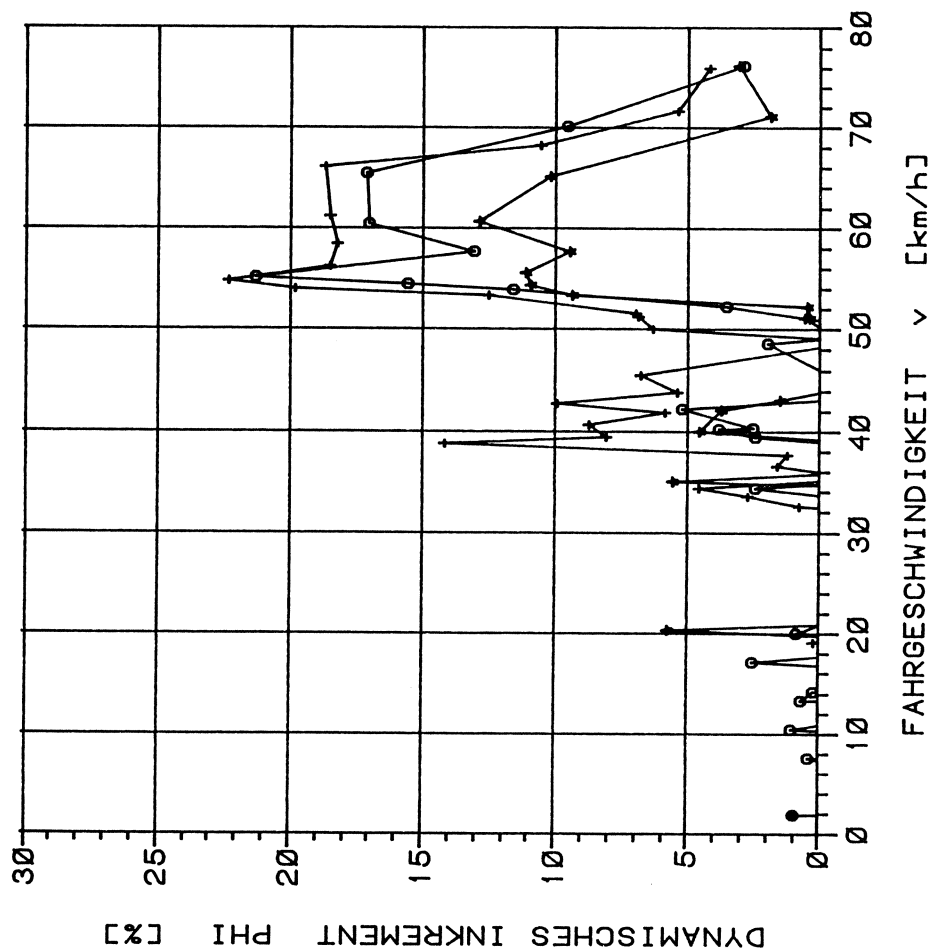


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 52+

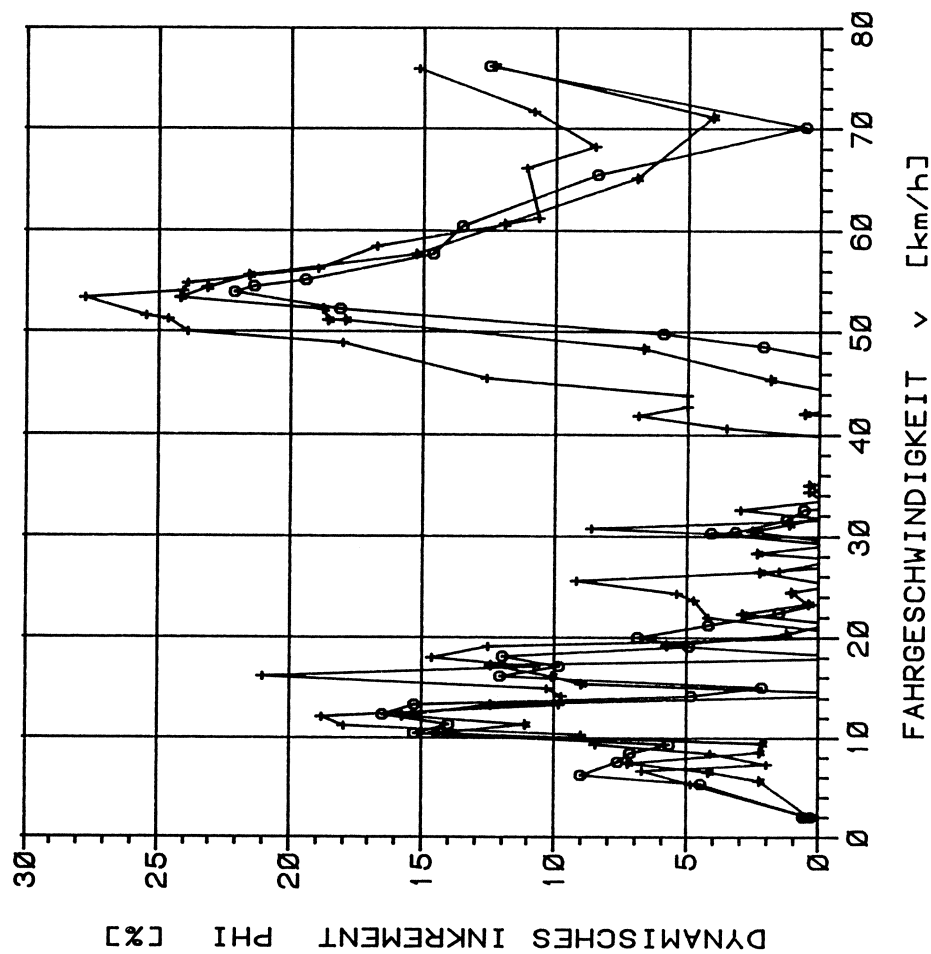
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 52-

A7.56
A7.55

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	13R 10 AoA	16.25 MI	21.27	55.0
+	13R 8 AoA	16.25 MI	12.85	60.5
+	13R 6 AoA	16.25 MI	22.25	54.7

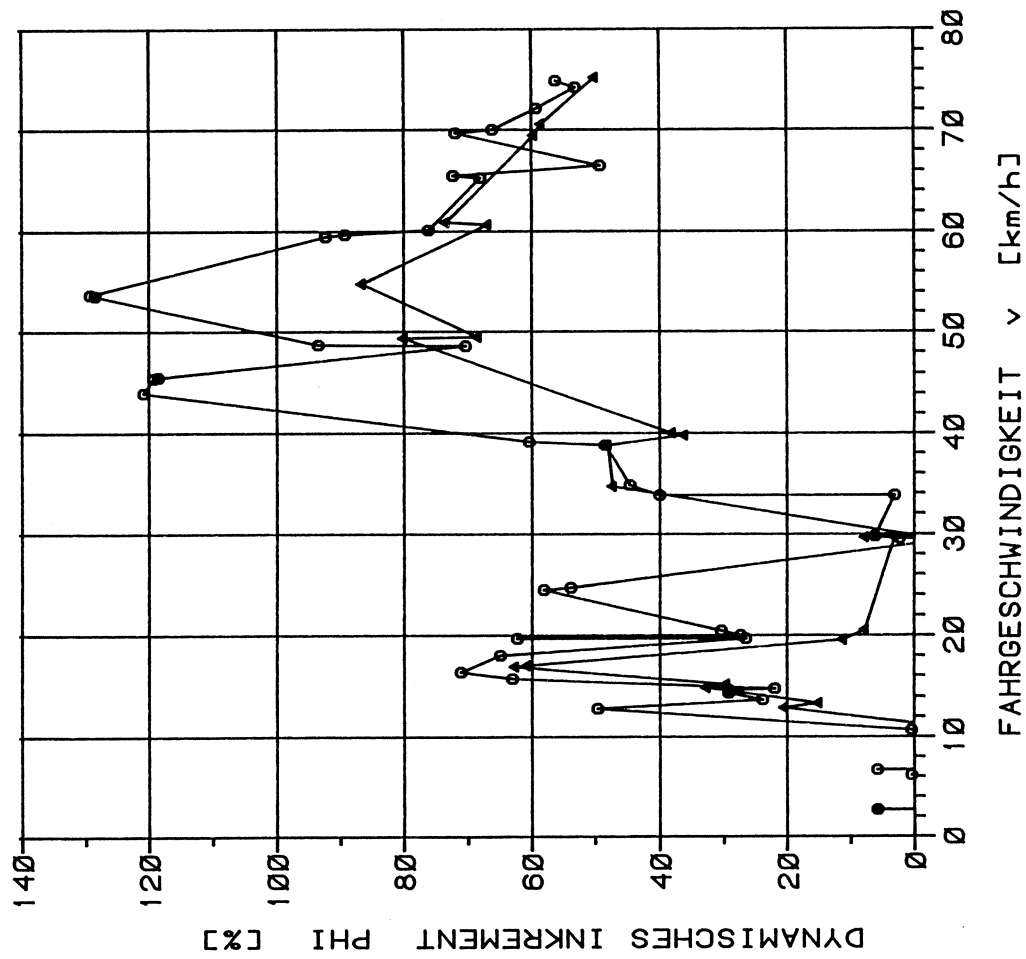


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	13R 10 AoA	-16.18 MI	22.07	53.9
+	13R 8 AoA	-16.18 MI	24.11	53.3
+	13R 6 AoA	-16.18 MI	27.68	53.3



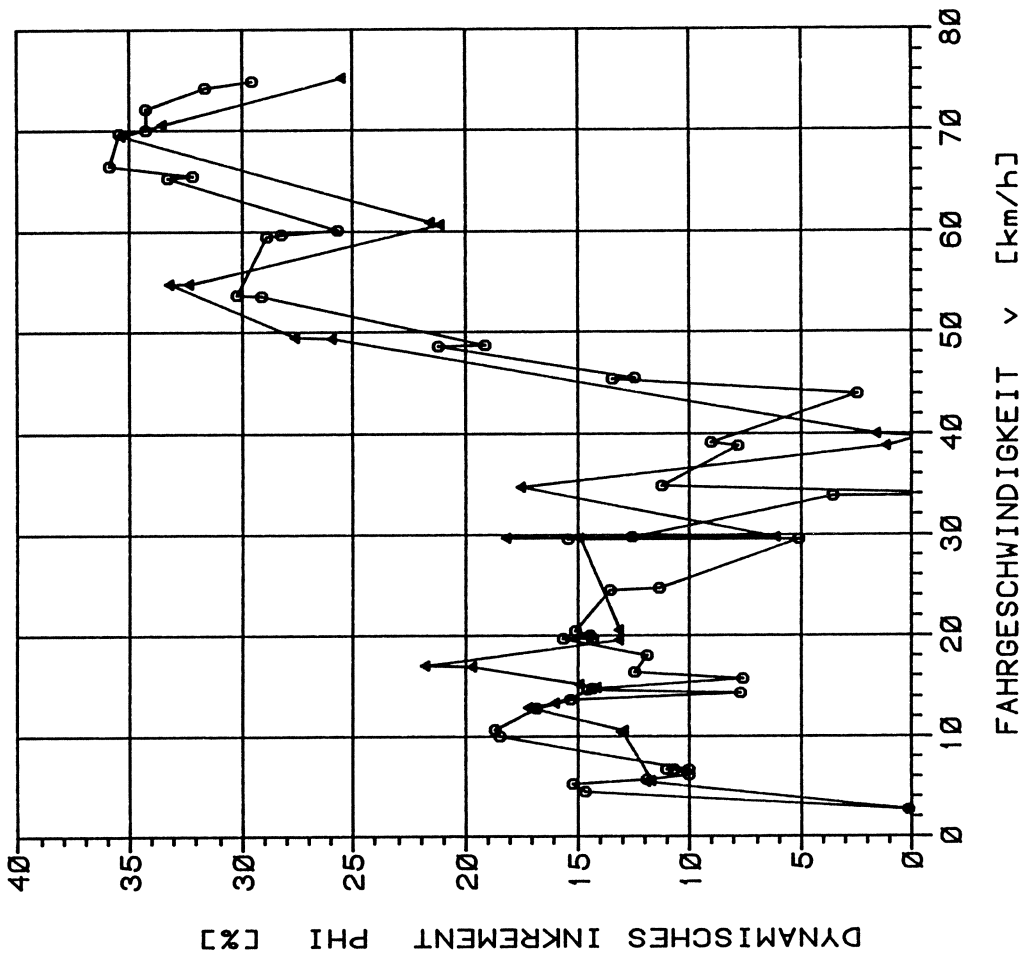
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 20R 10 AOA	3.60 MI	128.77	53.7
▲	DMS 52 20R 6 AOA	3.60 MI	86.48	54.7



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 20R 10 AOA	-22.07 MI	35.85	66.5
▲	DMS 52 20R 6 AOA	-22.07 MI	35.32	69.4

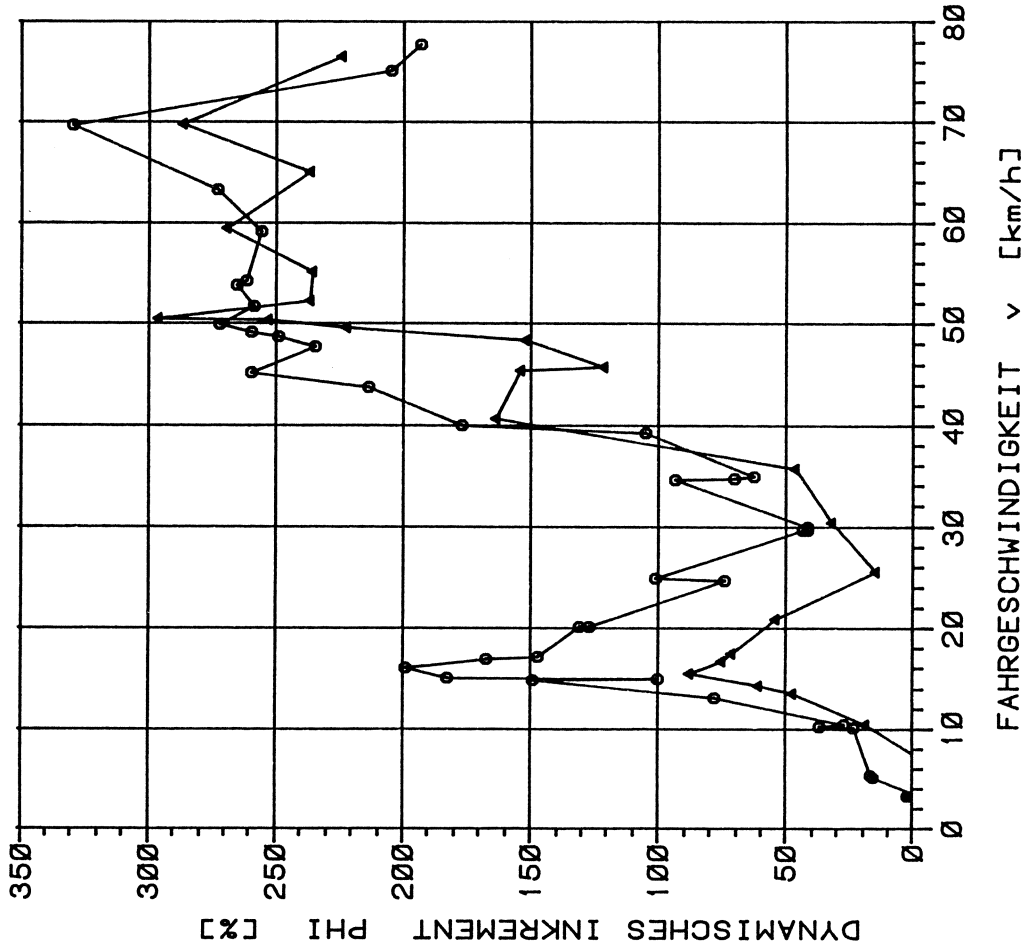


A7.60
A7.59

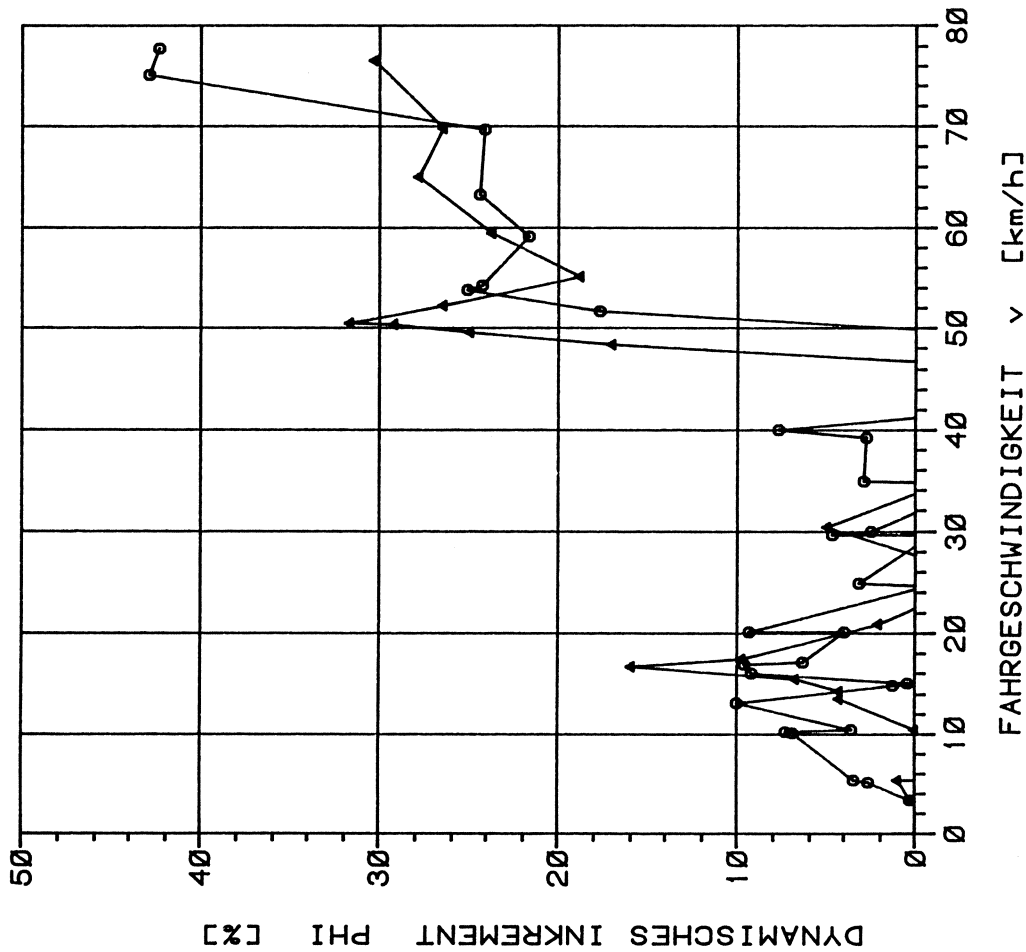
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 52+

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	25R 10 AoA	2.74 MI	329.13
○	DMS 52	25R 6 AoA	2.74 MI	295.66
○				69.6
○				50.4

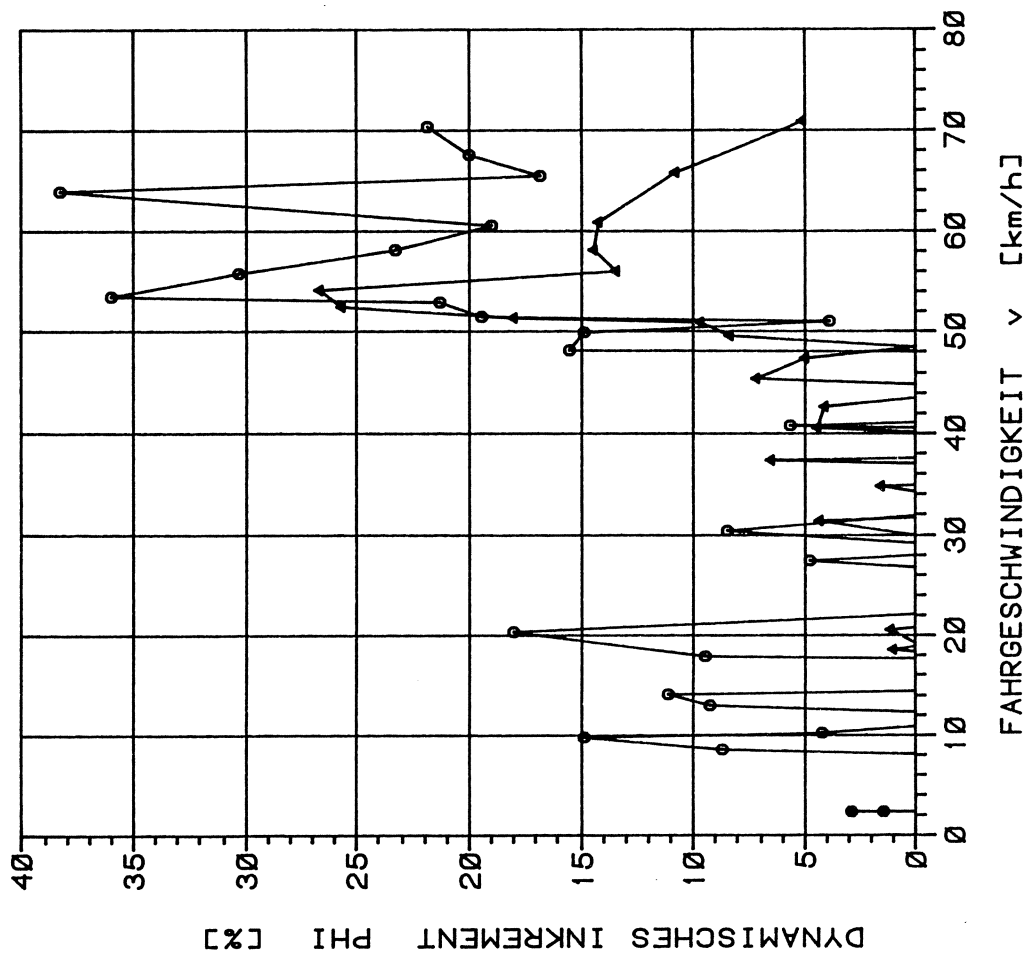


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	25R 10 AoA	-24.16 MI	42.92
○	DMS 52	25R 6 AoA	-24.16 MI	31.69
○				75.0
○				50.4



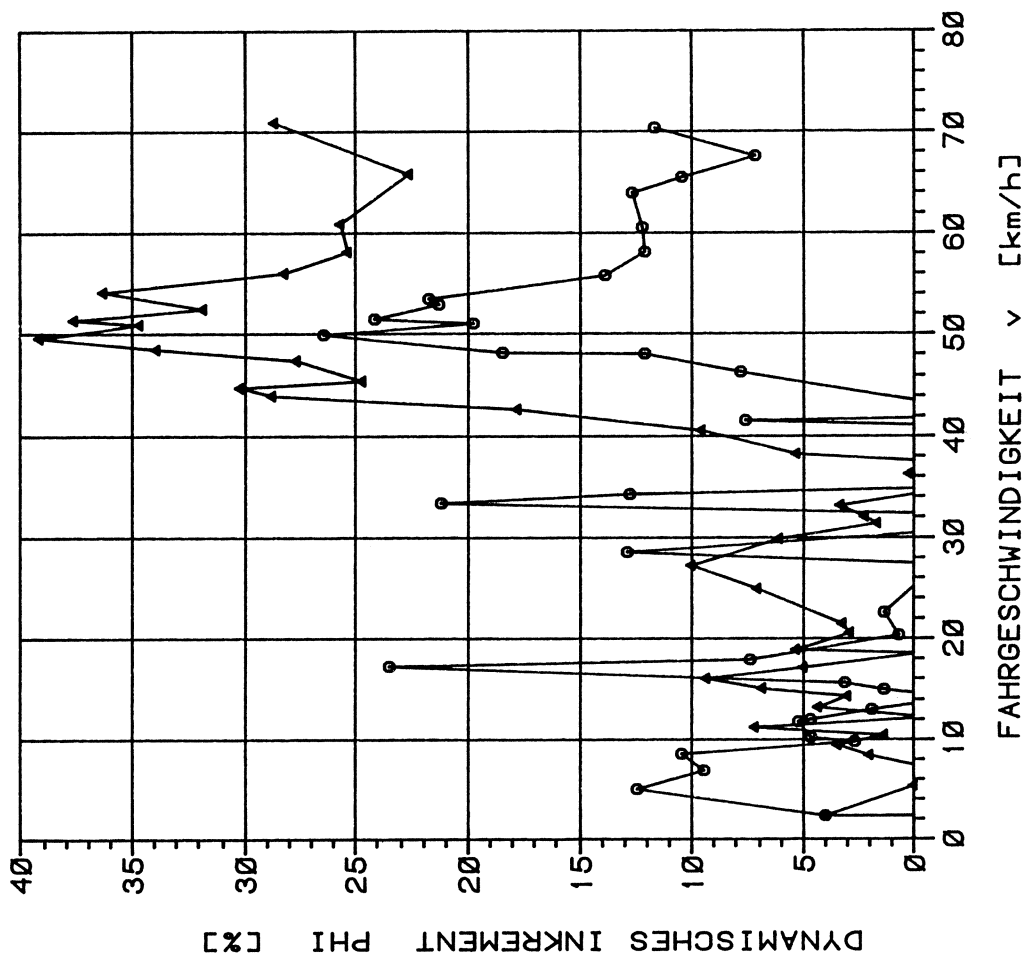
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	42R 10 AoA	10.96 MI	63.9
▲	DMS 52	42R 6 AoA	10.96 MI	54.1
			26.59	



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	42R 10 AoA	-22.30 MI	26.42
▲	DMS 52	42R 6 AoA	-22.30 MI	39.12
			49.9	
			49.5	



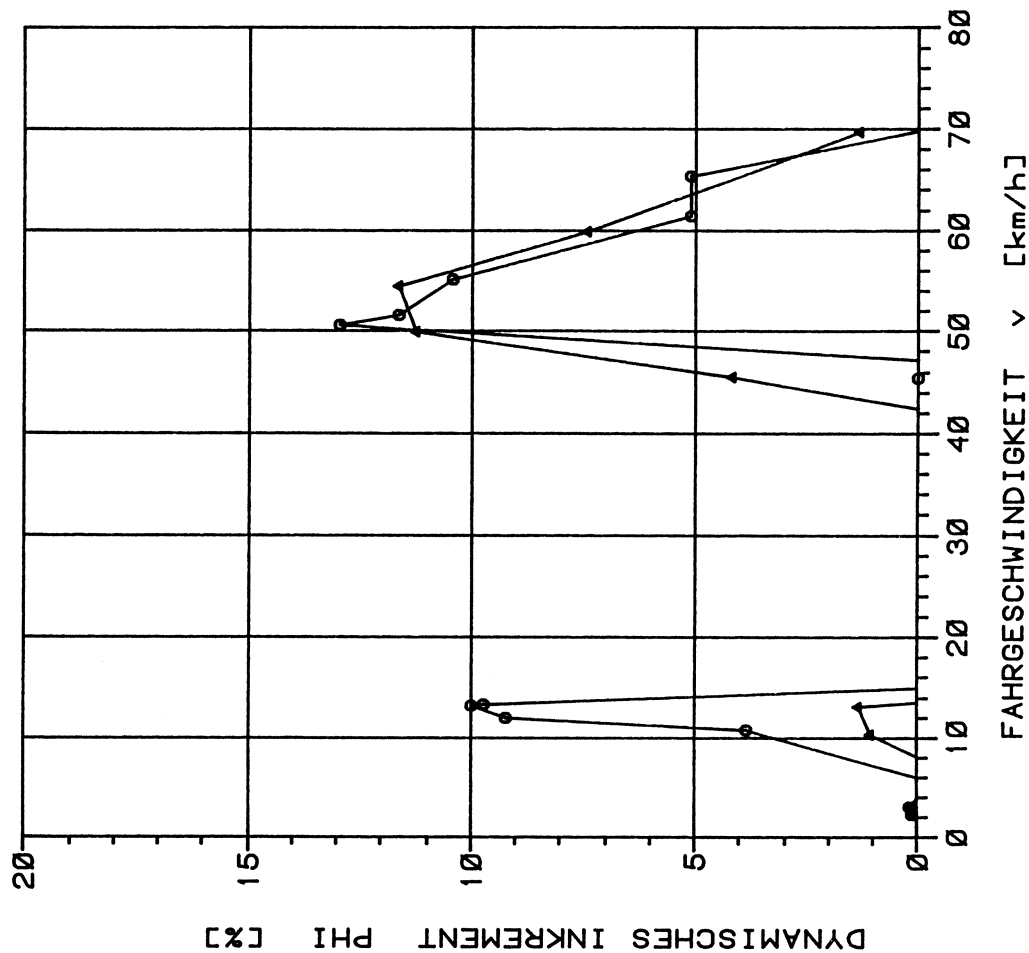
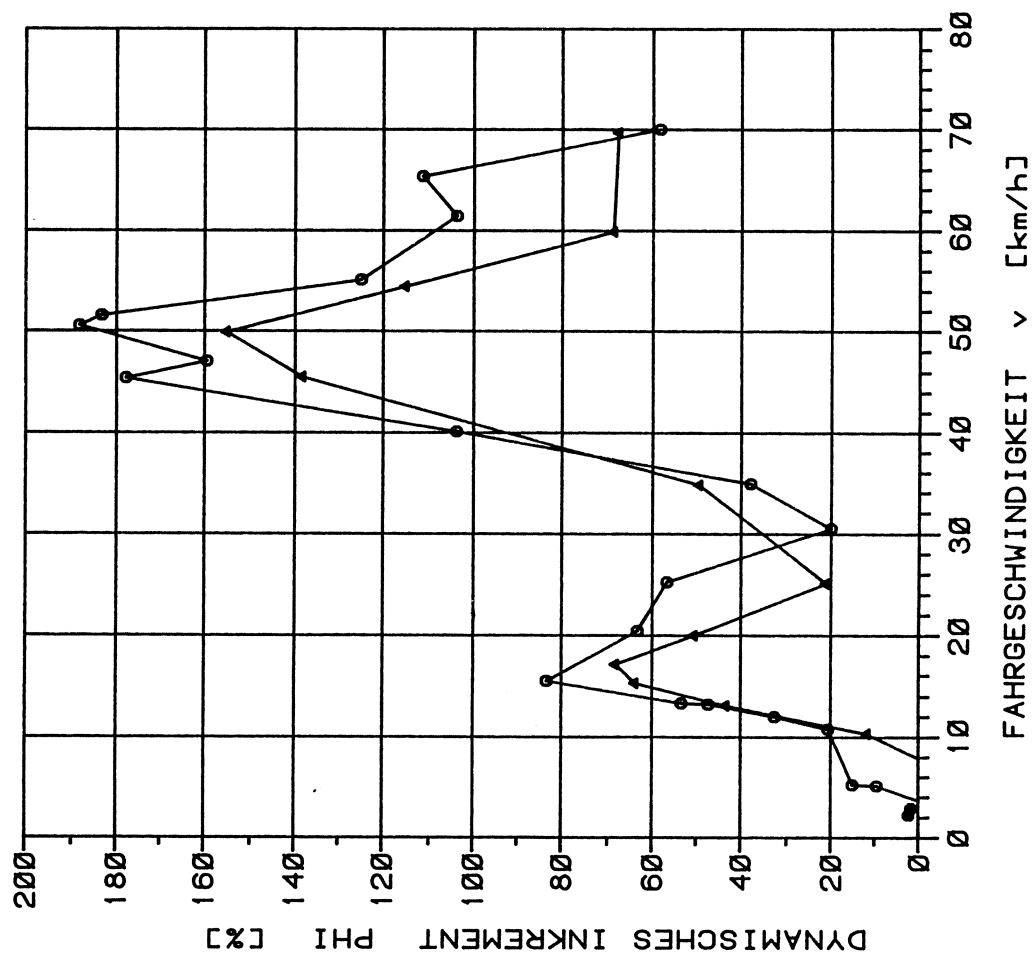
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 52+

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 52-

A7.64
A7.63

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	52R 10 AoA	4.18 MI	188.09
○	DMS 52	52R 6 AoA	4.18 MI	154.93
○	DMS 52	52R 10 AoA	-33.69 MI	50.5
○	DMS 52	52R 6 AoA	-33.69 MI	49.9

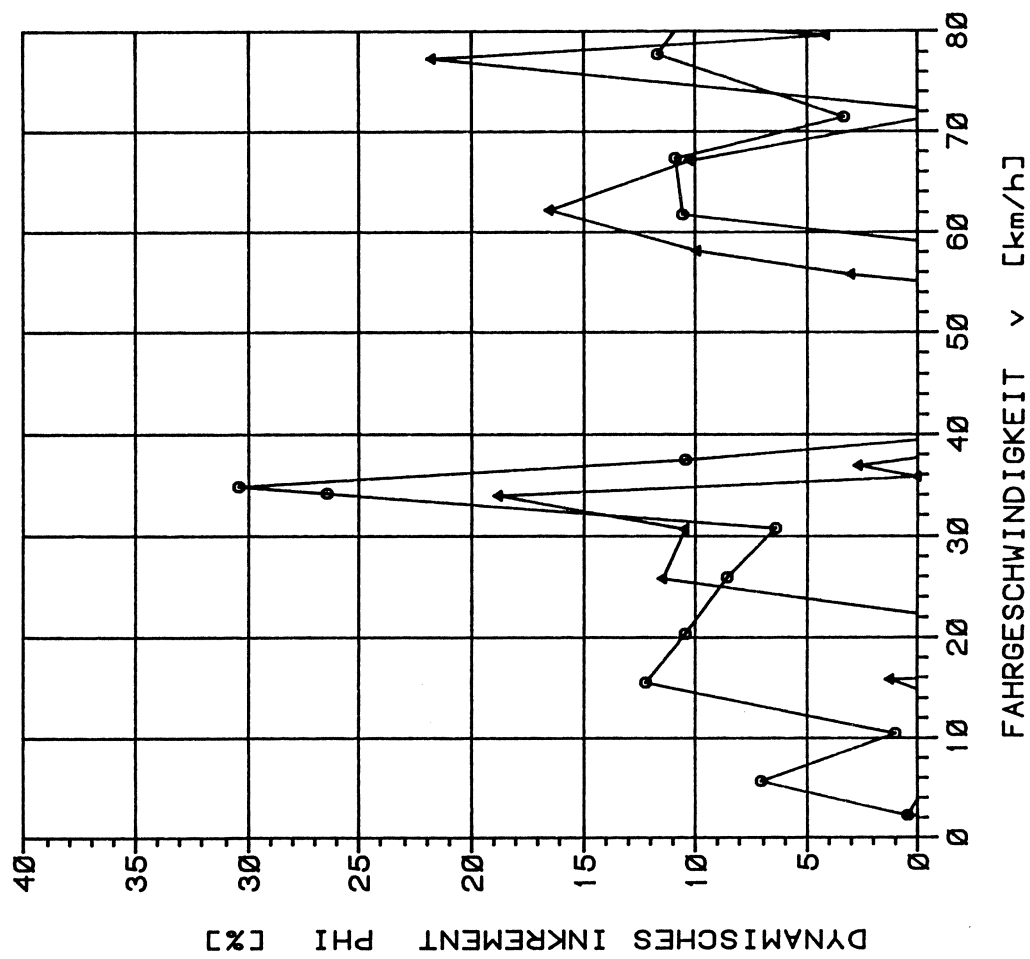
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	52R 10 AoA	-33.69 MI	50.5
○	DMS 52	52R 6 AoA	-33.69 MI	54.4



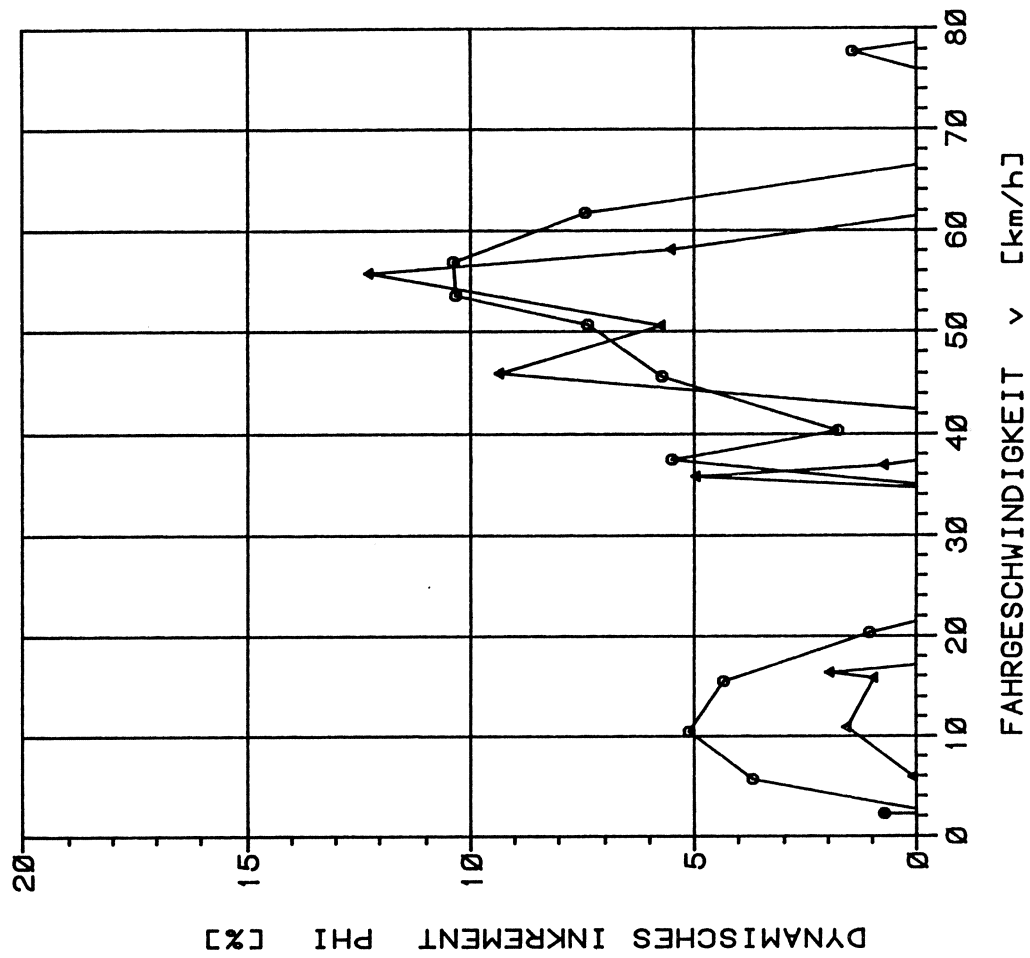
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 52+

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	71R 10 AoA	10.83 MI	30.36
○	DMS 52	71R 10 AoA	10.83 MI	34.7
▲	DMS 52	71R 6 AoA	21.69	77.2



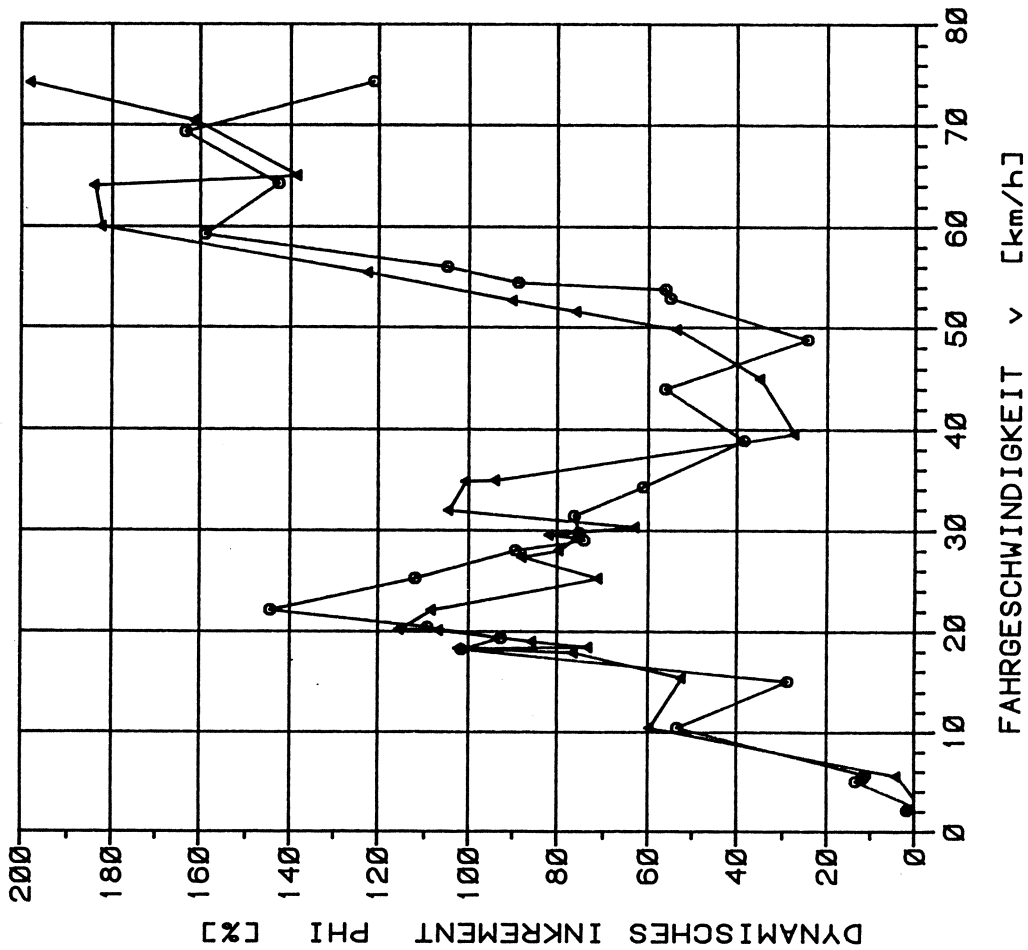
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	71R 10 AoA	-19.51 MI	10.36
○	DMS 52	71R 10 AoA	-19.51 MI	56.8
▲	DMS 52	71R 6 AoA	-19.51 MI	12.24
▲	DMS 52	71R 6 AoA	-19.51 MI	55.7



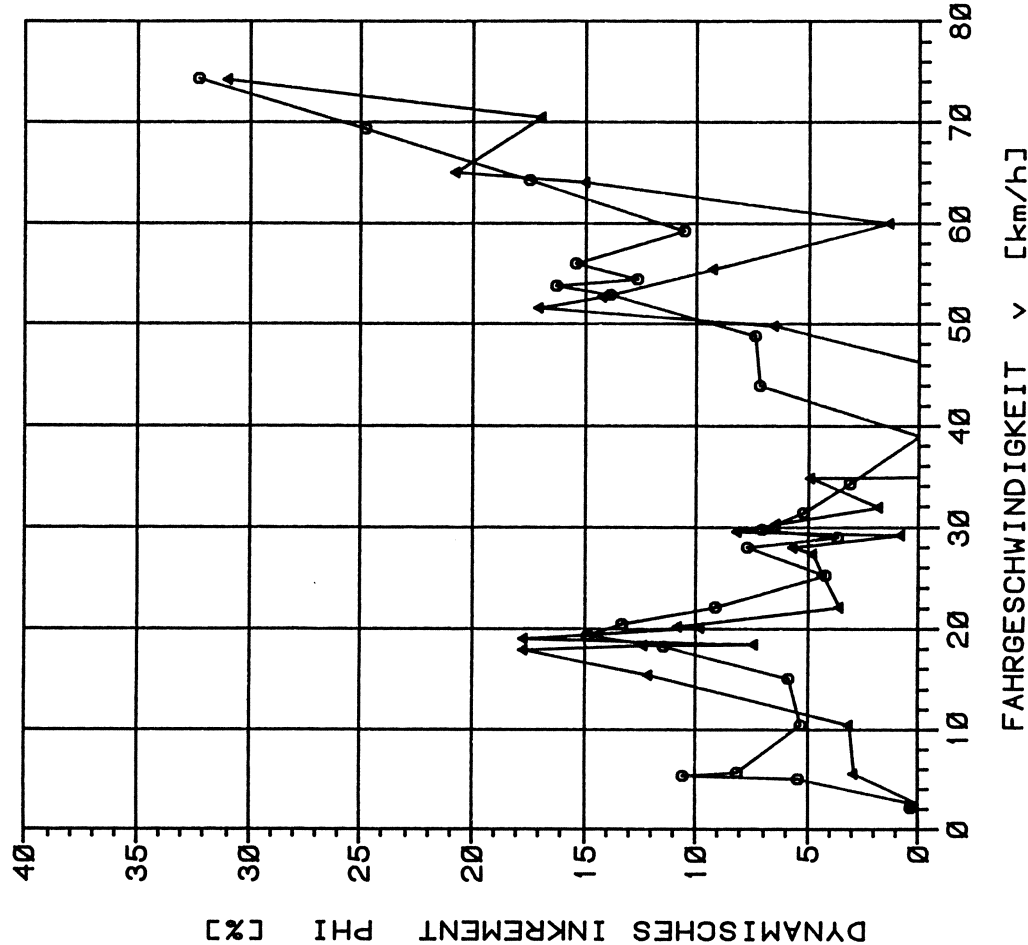
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 52+

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	74R 10 AoA	3.06 MI	163.51	69.3
▲	74R 6 AoA	3.06 MI	197.73	74.1



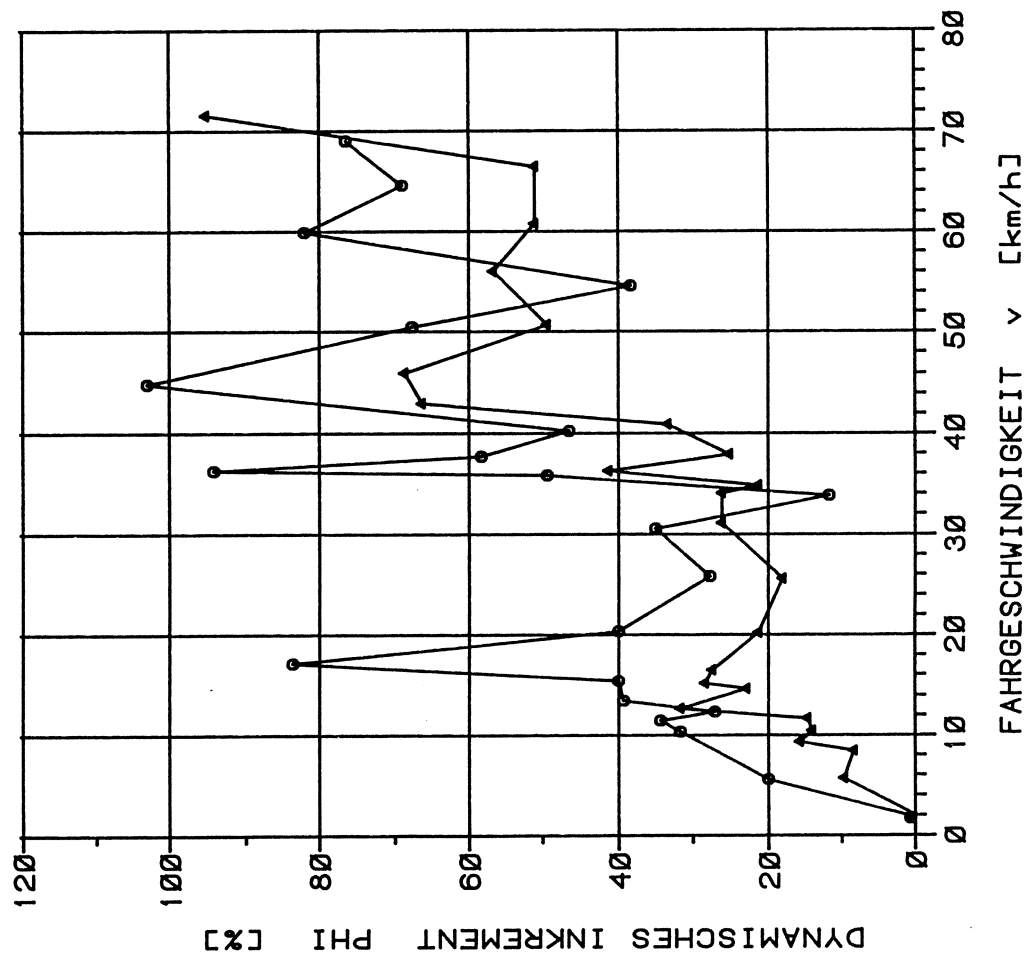
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	74R 10 AoA	-20.61 MI	32.23	74.3
▲	74R 6 AoA	-20.61 MI	30.93	74.1



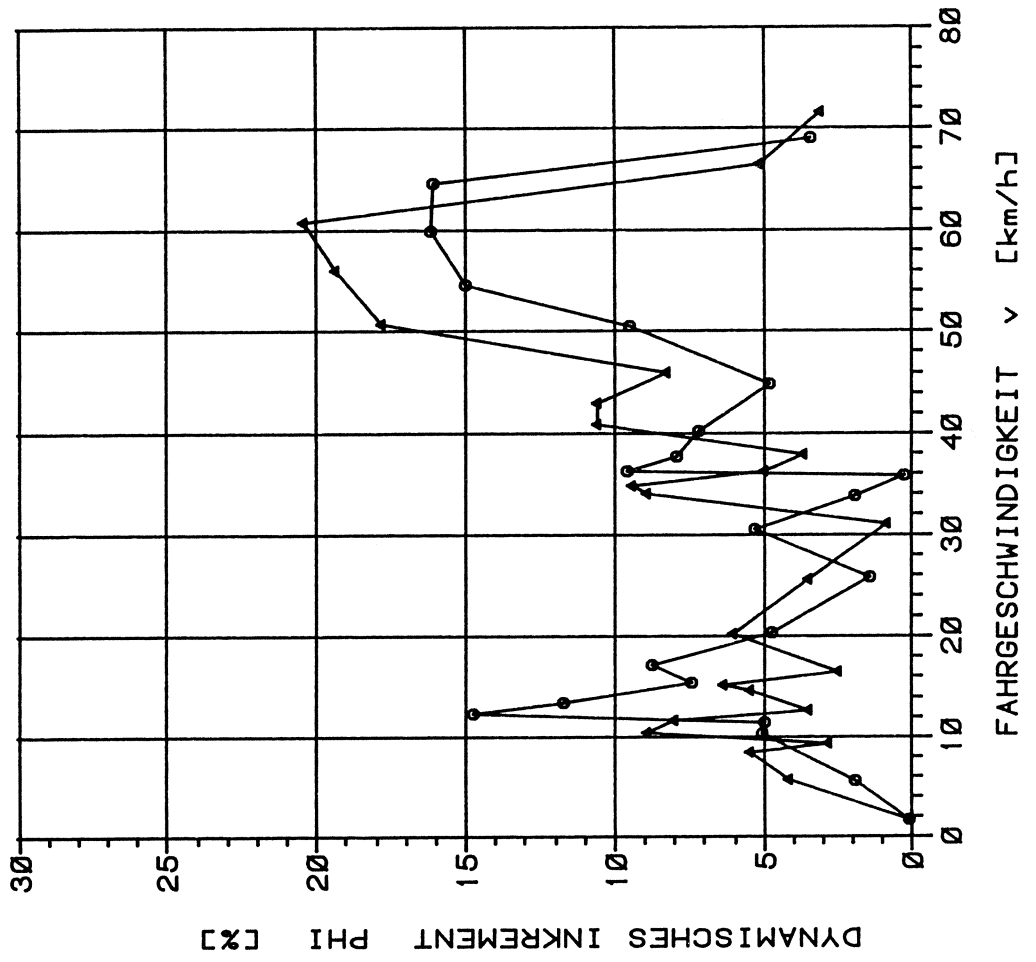
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 52+

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	76R 10 AoA	3.63 MI	102.81	44.8
▲	76R 6 AoA	3.63 MI	95.16	71.5

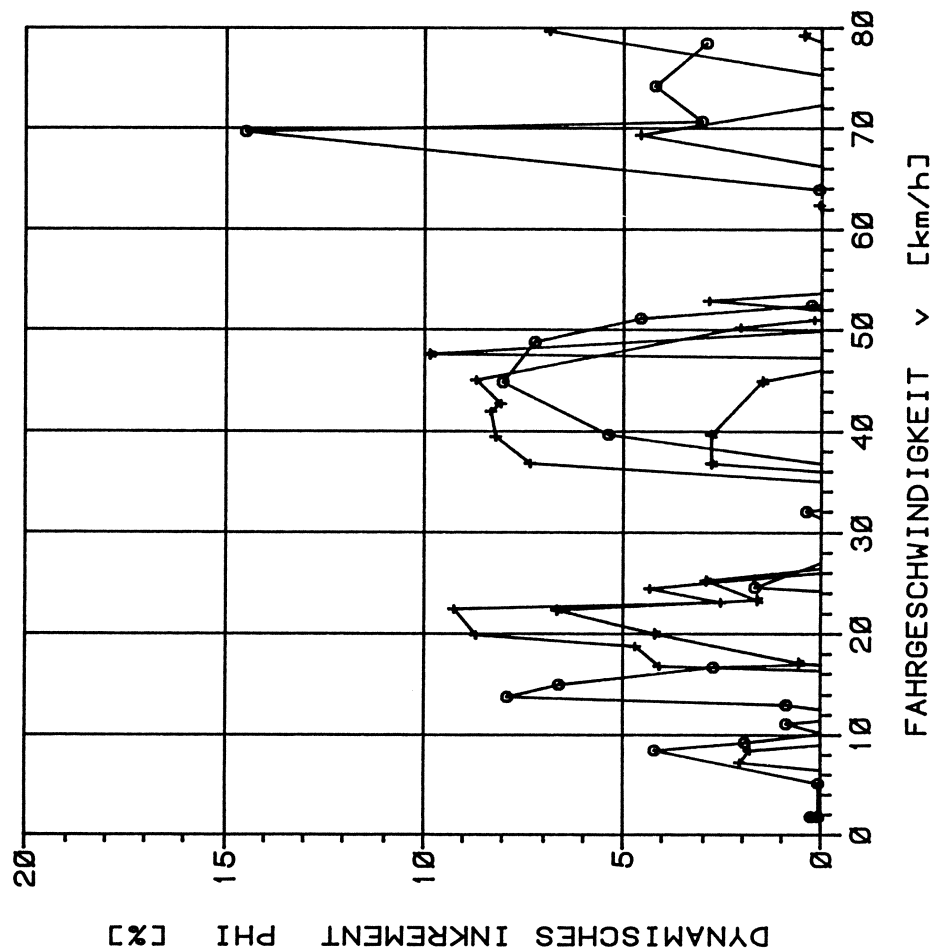


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	76R 10 AoA	-23.31 MI	16.12	59.8
▲	76R 6 AoA	-23.31 MI	20.42	60.7



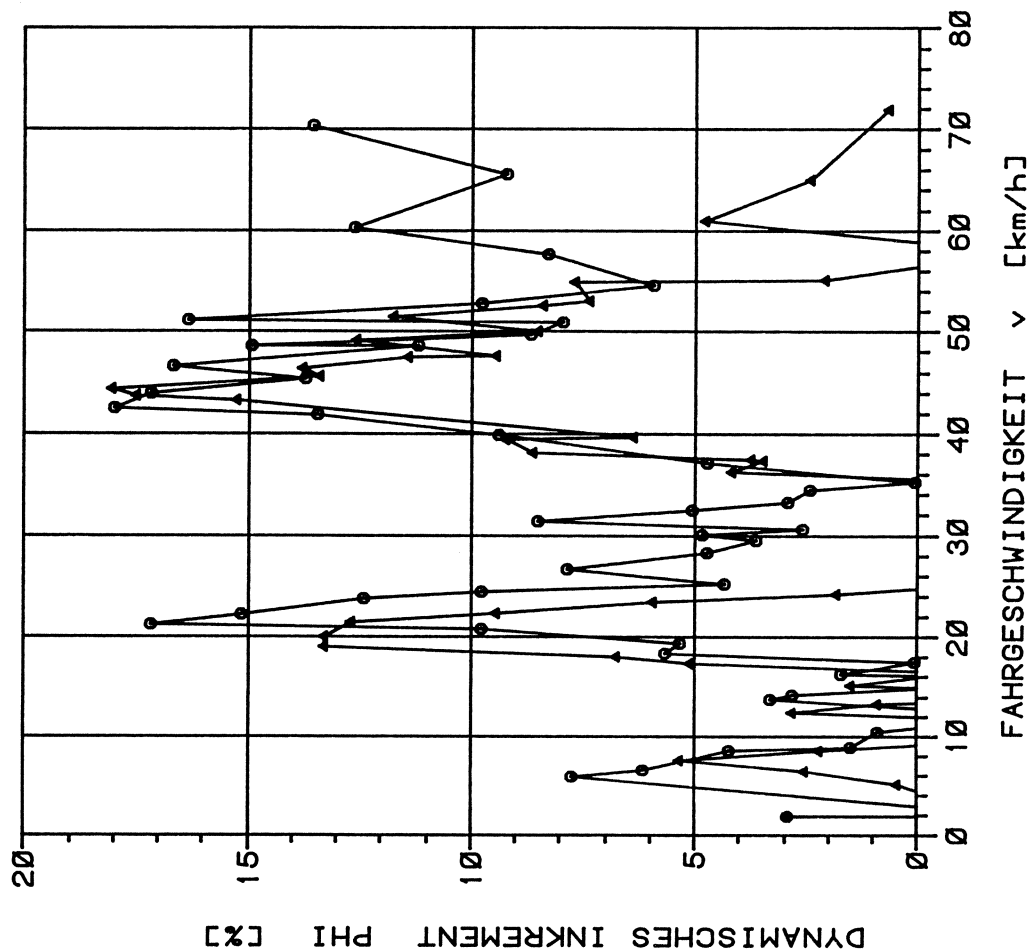
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	11R 10 KoA	14.45	69.6
+	DMS 22	11R 8 KoA	9.82	47.5
+	DMS 22	11R 6 KoA	9.25	22.4



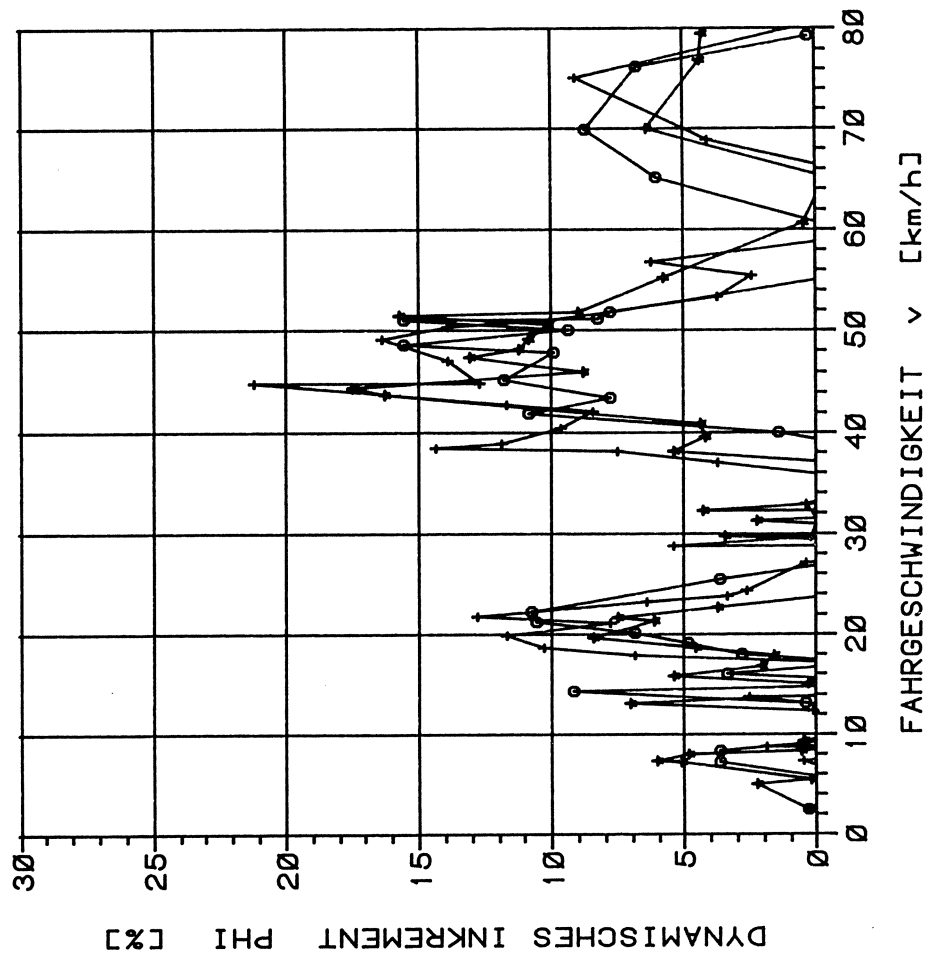
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	12R 10 KoA	17.95	42.4
+	DMS 22	12R 6 KoA	18.05	44.4



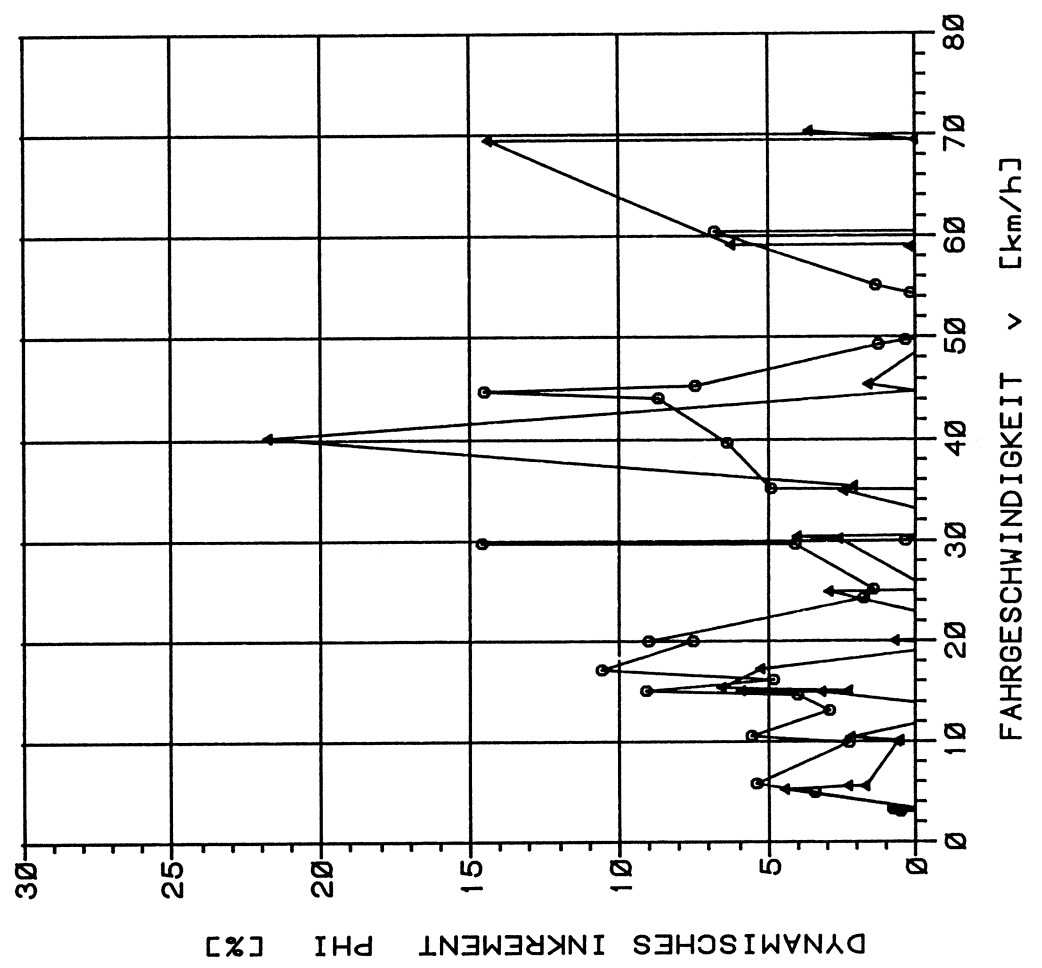
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	13R 10 KoA	17.04 MI	15.50	51.0
+	13R 8 KoA	17.04 MI	17.42	44.3
+	13R 6 KoA	17.04 MI	21.16	44.8



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 22

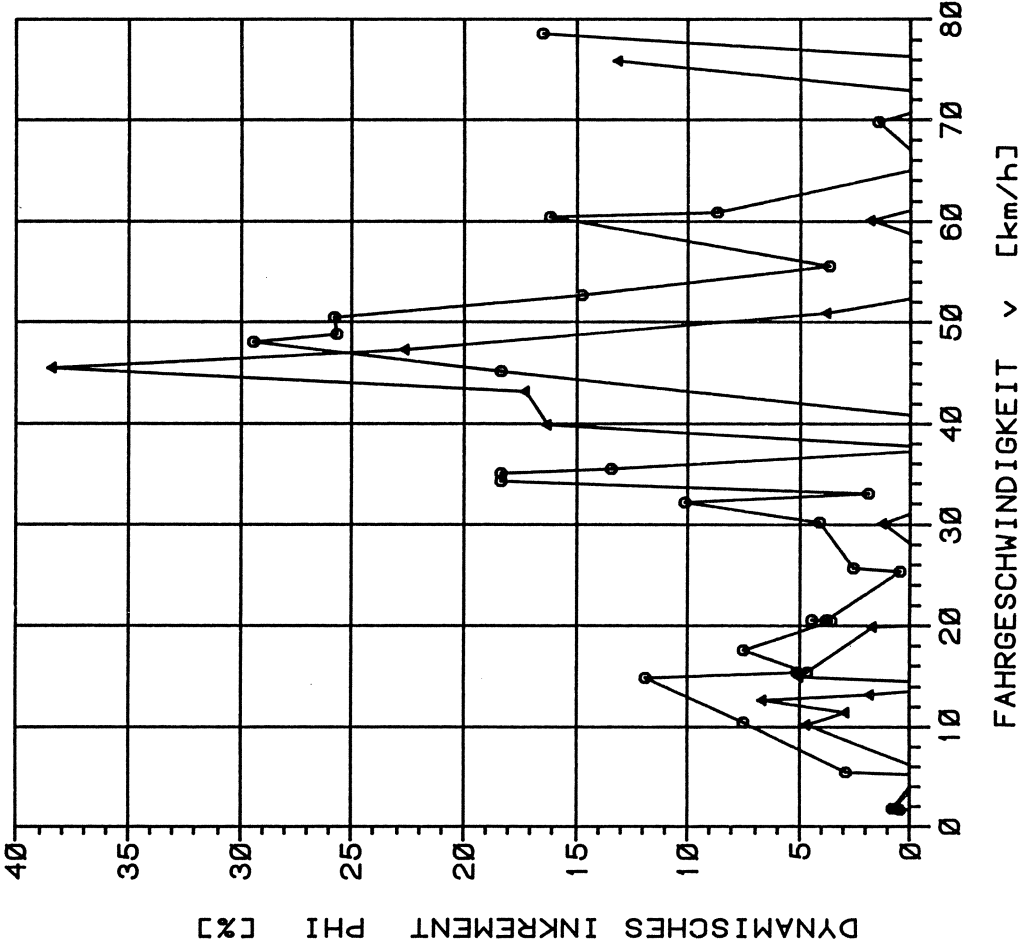
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	20R 10 KoA	26.69 MI	14.53	29.6
+	20R 6 KoA	26.69 MI	21.69	40.1



A7.76
A7.75

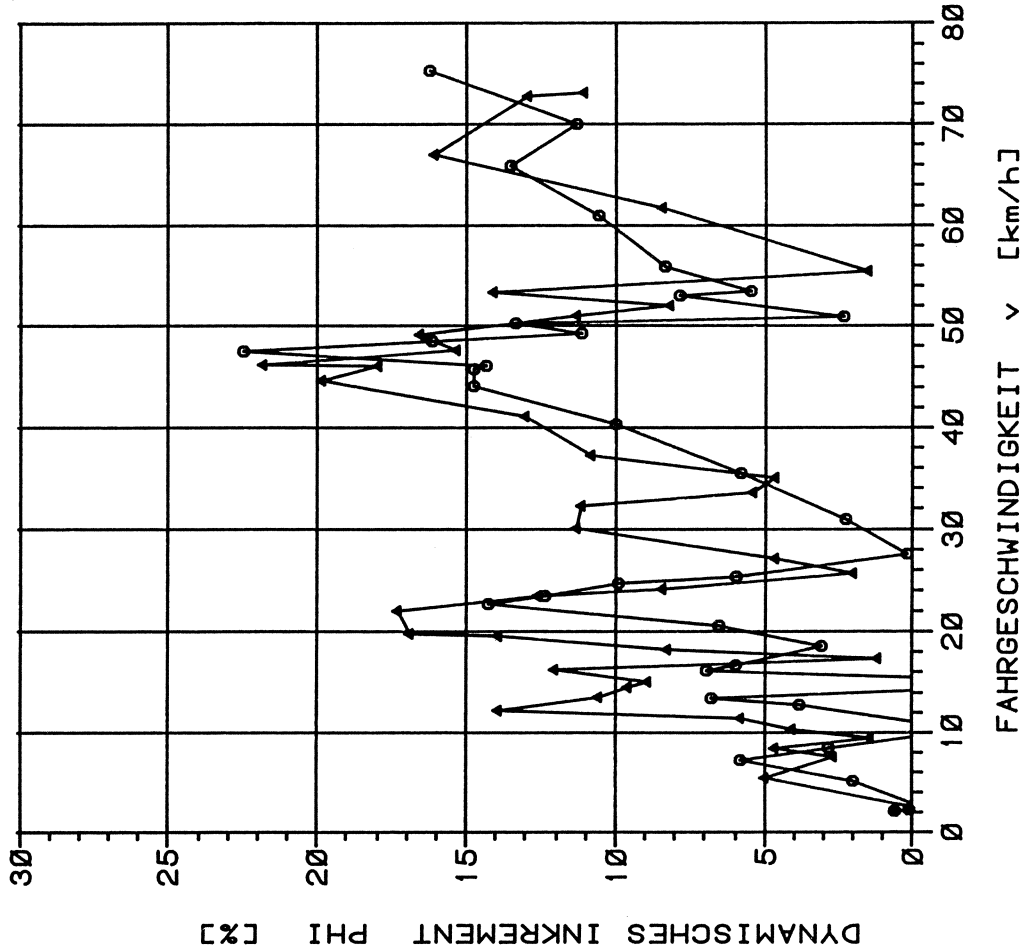
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	25R 10 KoA	22.04 MI	48.0
▲	DMS 22	25R 6 KoA	22.04 MI	45.5



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 22

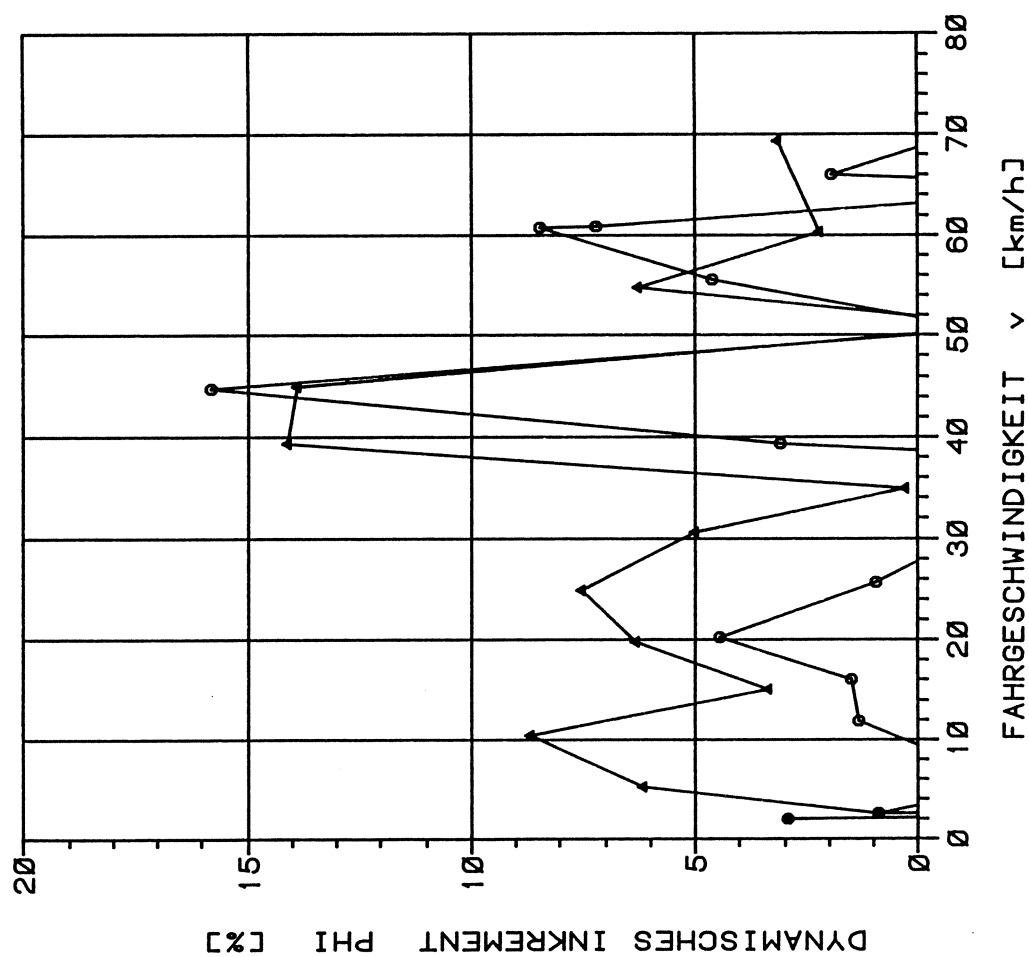
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	42R 10 KoA	18.52 MI	47.5
▲	DMS 22	42R 6 KoA	18.52 MI	46.1



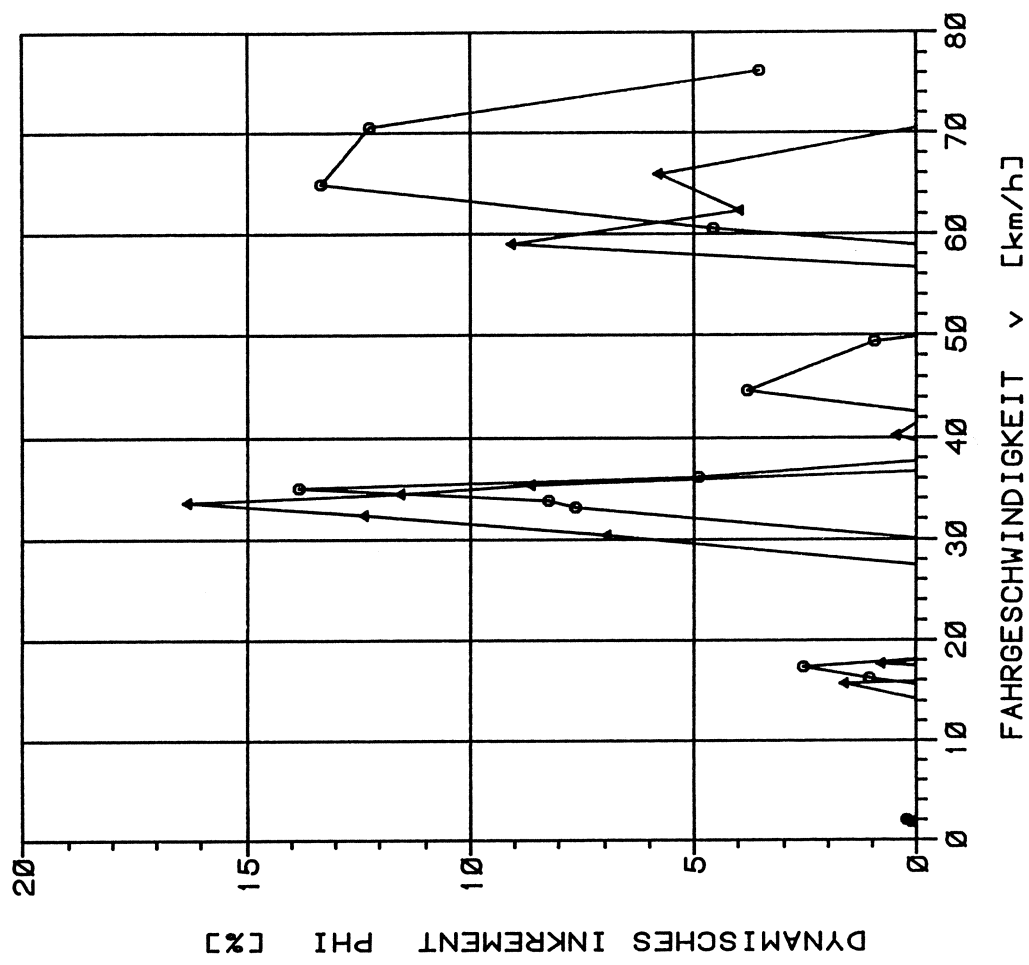
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 22

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	52R 10 KoA	28.45 MI	15.79
○	DMS 22	52R 6 KoA	28.45 MI	14.07
○				44.7
○				39.3



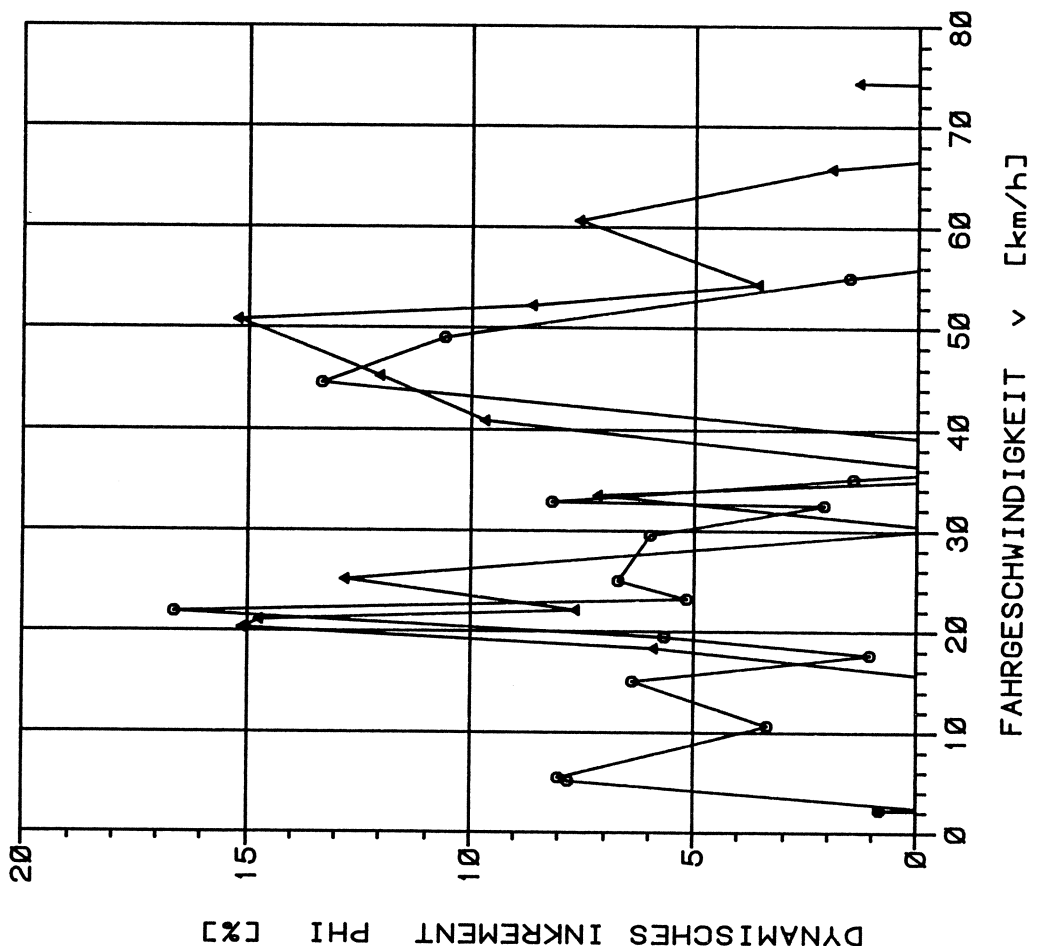
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	71R 10 KoA	16.84 MI	13.79
○	DMS 22	71R 6 KoA	16.84 MI	16.28
○				34.9
○				33.5



A7.80
A7.79

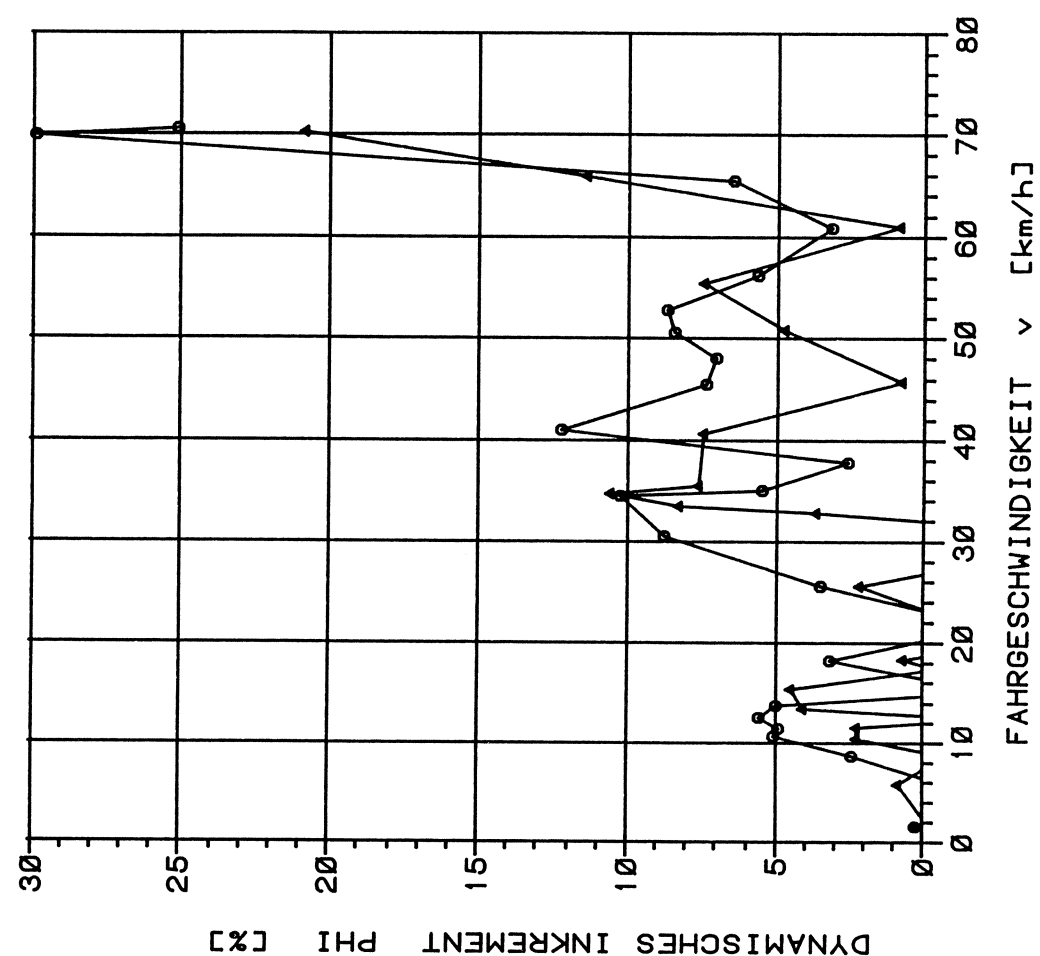
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	74R 10 KoA	19.22 MI	21.8
▲	DMS 22	74R 6 KoA	19.22 MI	50.8



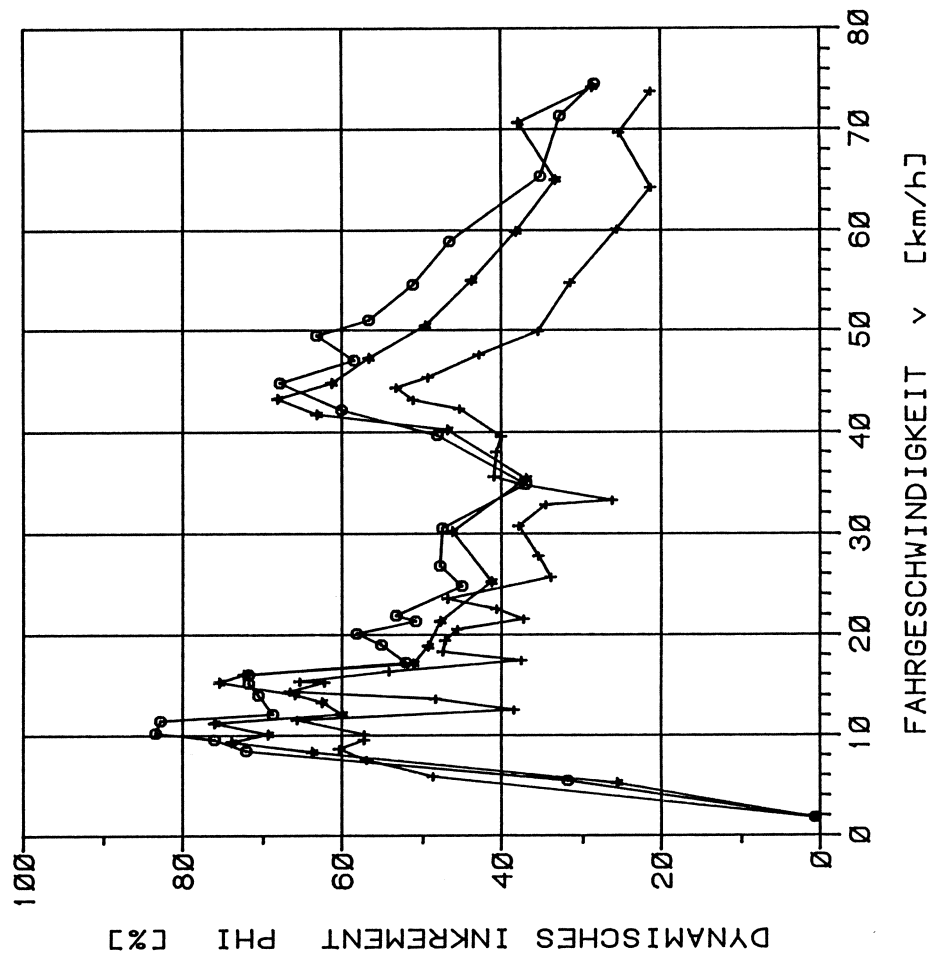
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	76R 10 KoA	24.65 MI	69.8
▲	DMS 22	76R 6 KoA	24.65 MI	70.1



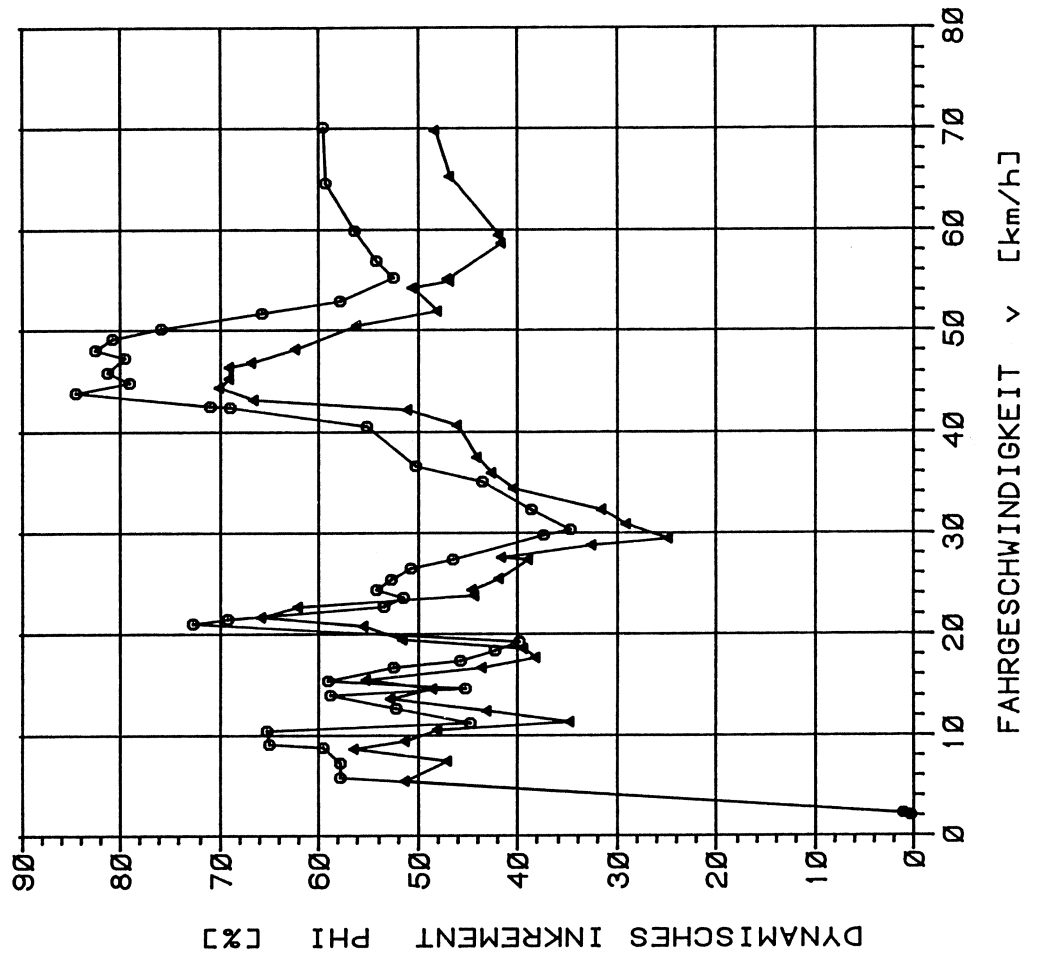
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	11R 10 KmA	-1.80 MM	83.52	10.2
+	11R 8 KmA	-1.80 MM	76.15	11.2
+	11R 6 KmA	-1.80 MM	66.40	14.4



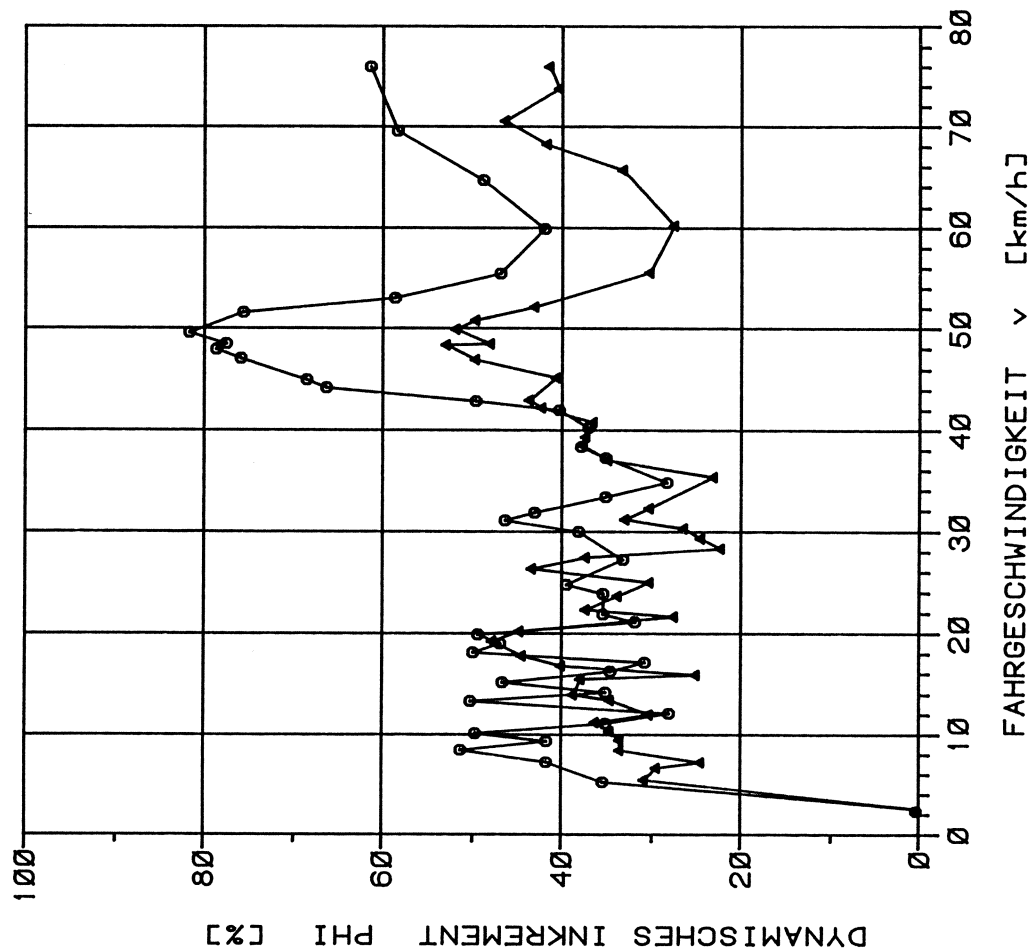
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	12R 10 KmA	-1.74 MM	84.27	43.8
+	12R 6 KmA	-1.74 MM	69.80	44.4



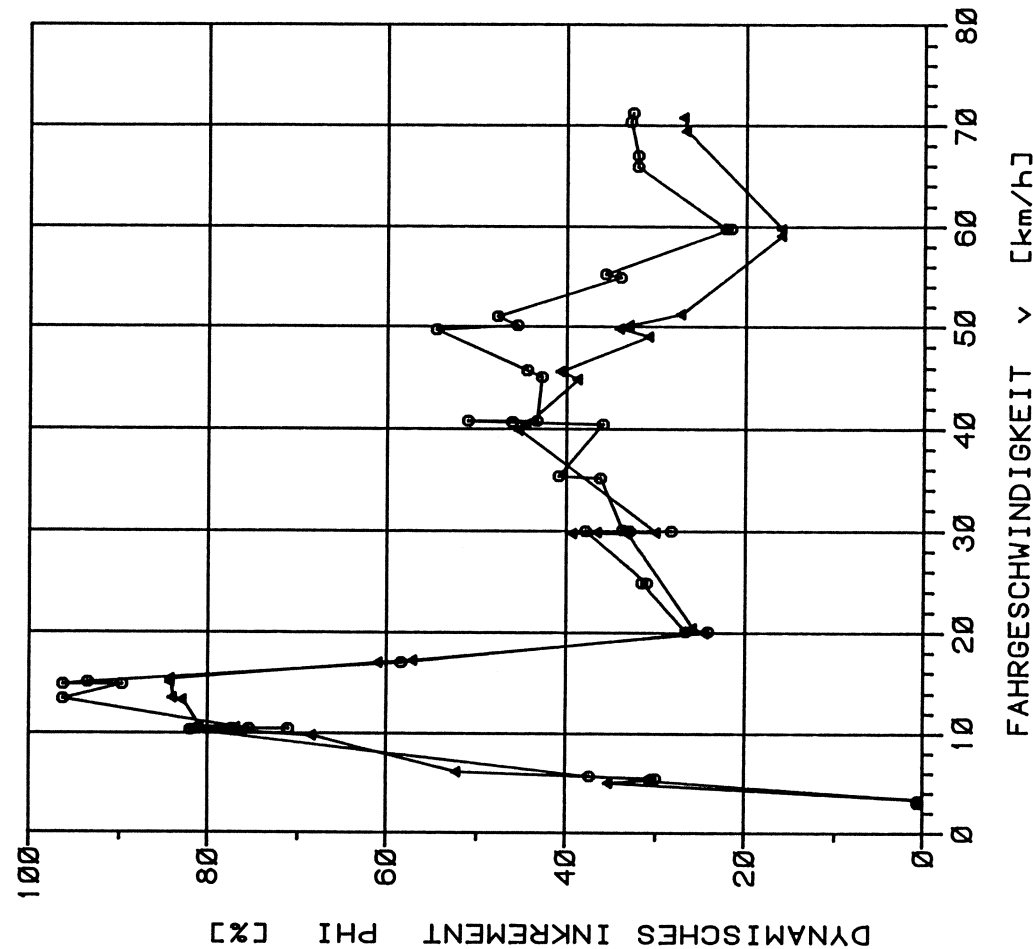
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	13R 10 KmA	-1.79 MM	81.56	49.6
▲	13R 6 KmA	-1.79 MM	52.77	48.3



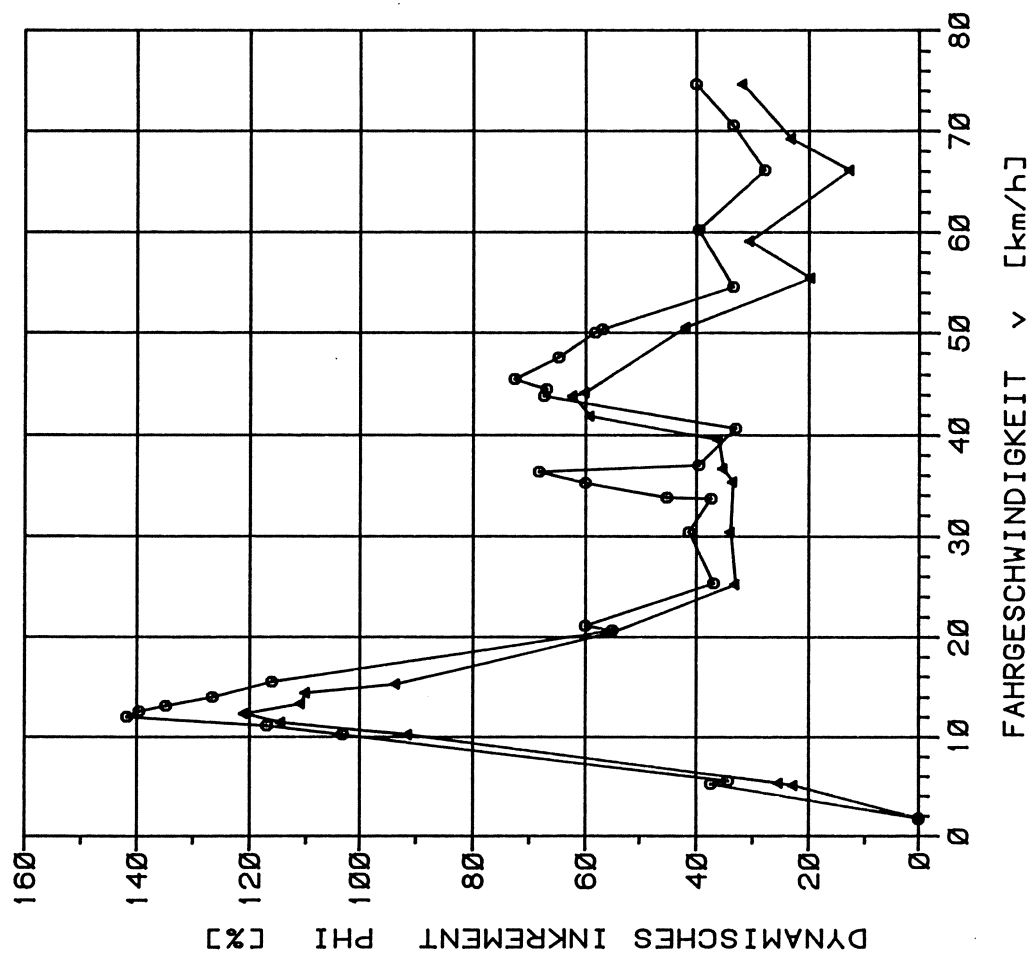
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 2ØR, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	2ØR 10 KmA	-2.94 MM	96.26	14.8
▲	2ØR 6 KmA	-2.94 MM	84.19	15.3



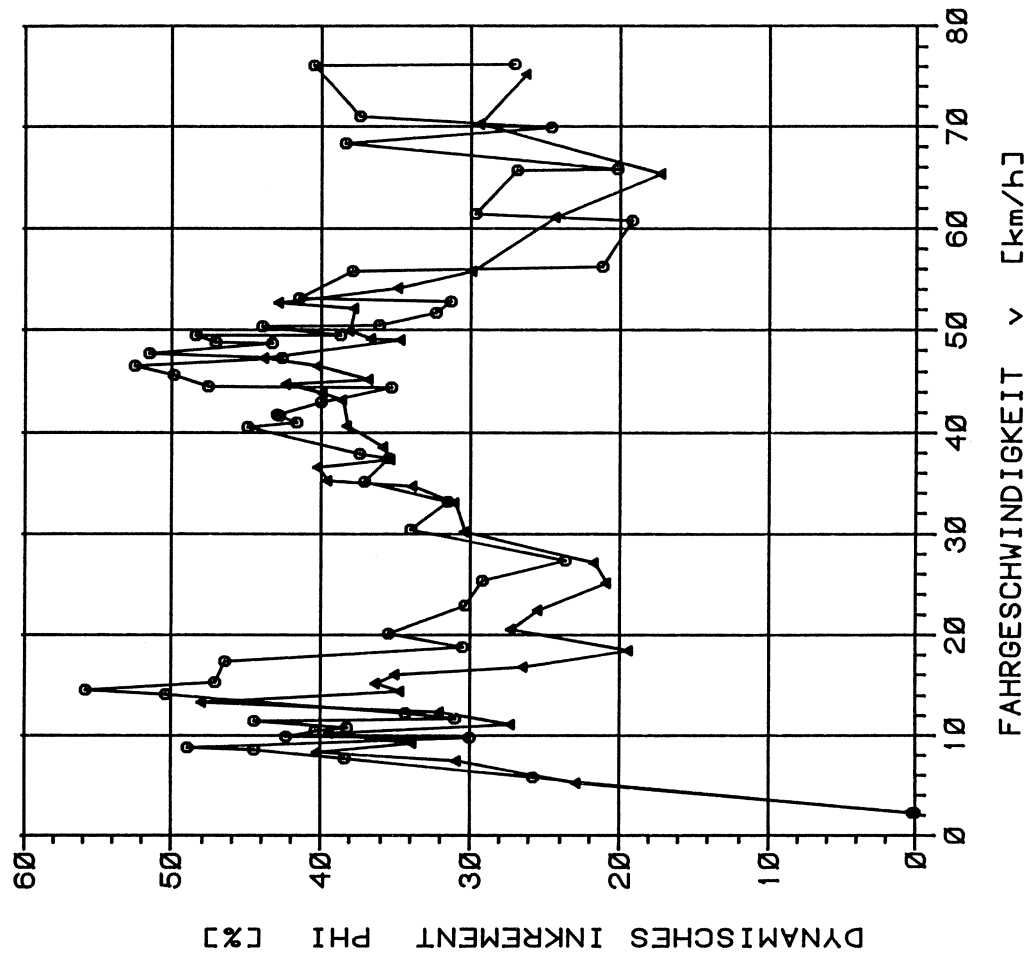
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	25R 10 KmA	-2.89 MM	141.59	11.9
▲	25R 6 KmA	-2.89 MM	120.40	12.2



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	42R 10 KmA	-2.75 MM	55.79	14.4
▲	42R 6 KmA	-2.75 MM	47.89	13.3

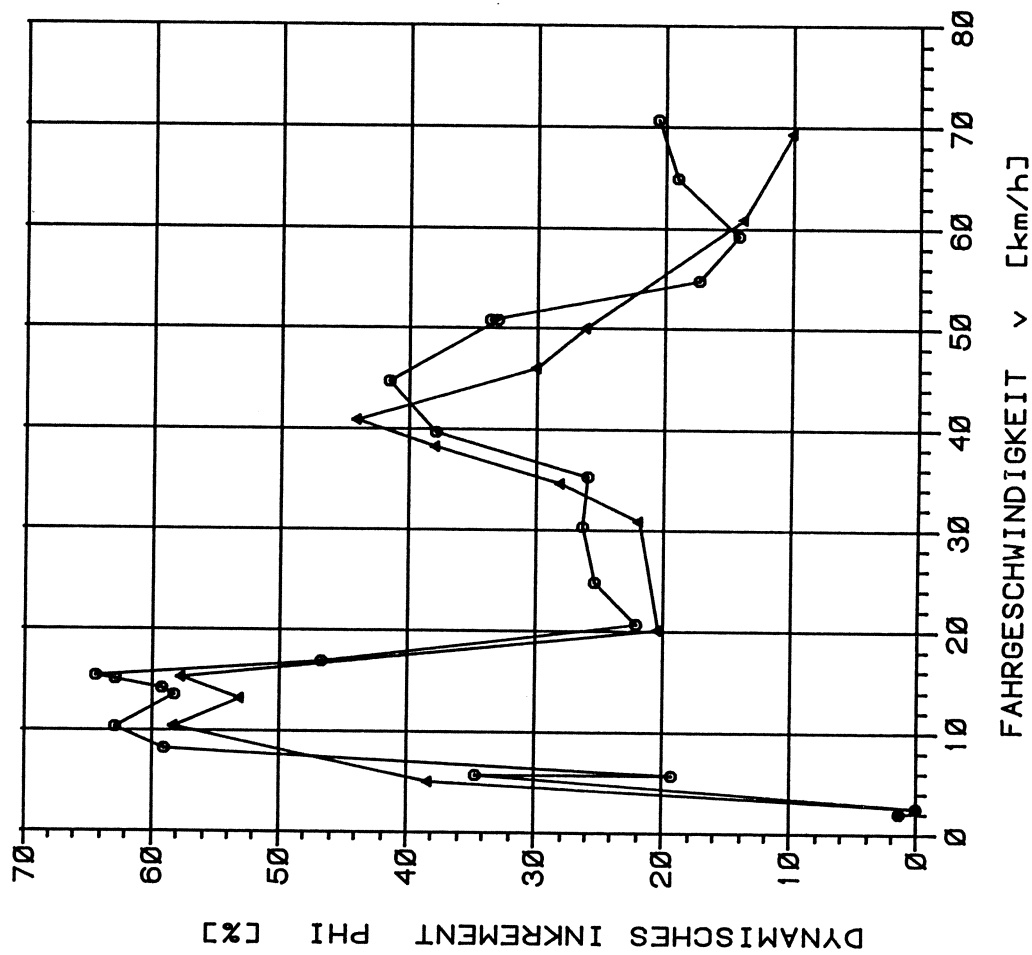


VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, WG Ø1

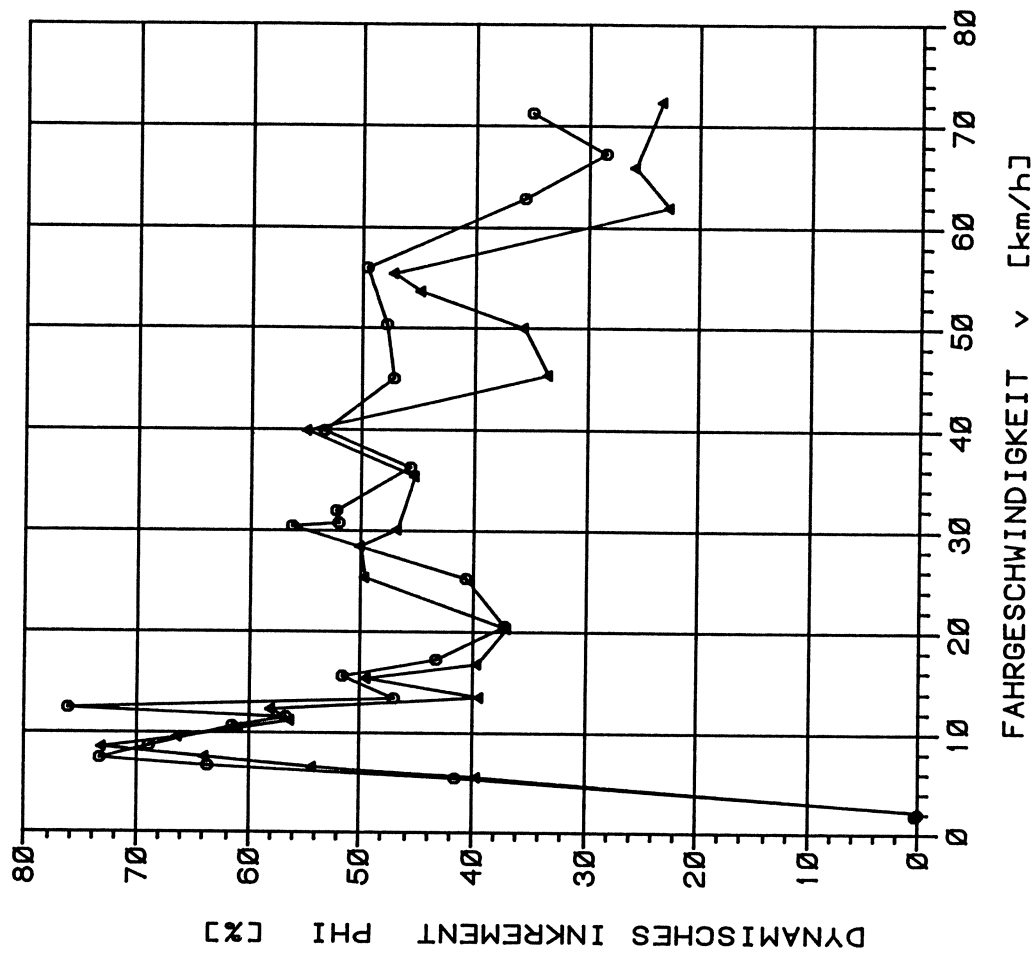
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, WG Ø1

A7.88
A7.87

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	52R 10 KmA	-4.07 MM	64.21
○	WG Ø1	52R 6 KmA	-4.07 MM	58.20
○	WG Ø1	52R 10 KmA	-4.07 MM	15.3
○	WG Ø1	52R 6 KmA	-4.07 MM	10.4

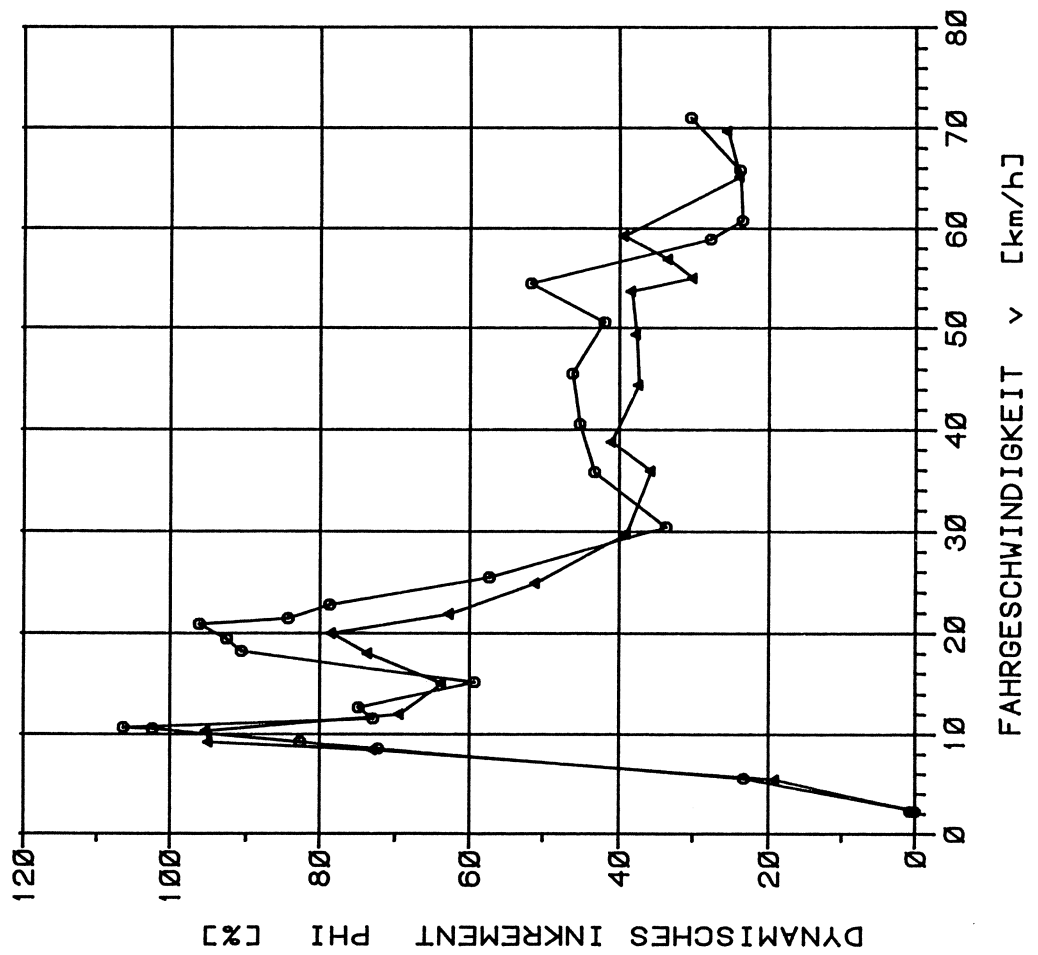


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	71R 10 KmA	-2.46 MM	76.01
○	WG Ø1	71R 6 KmA	-2.46 MM	73.05
○	WG Ø1	71R 10 KmA	-2.46 MM	12.4
○	WG Ø1	71R 6 KmA	-2.46 MM	8.5



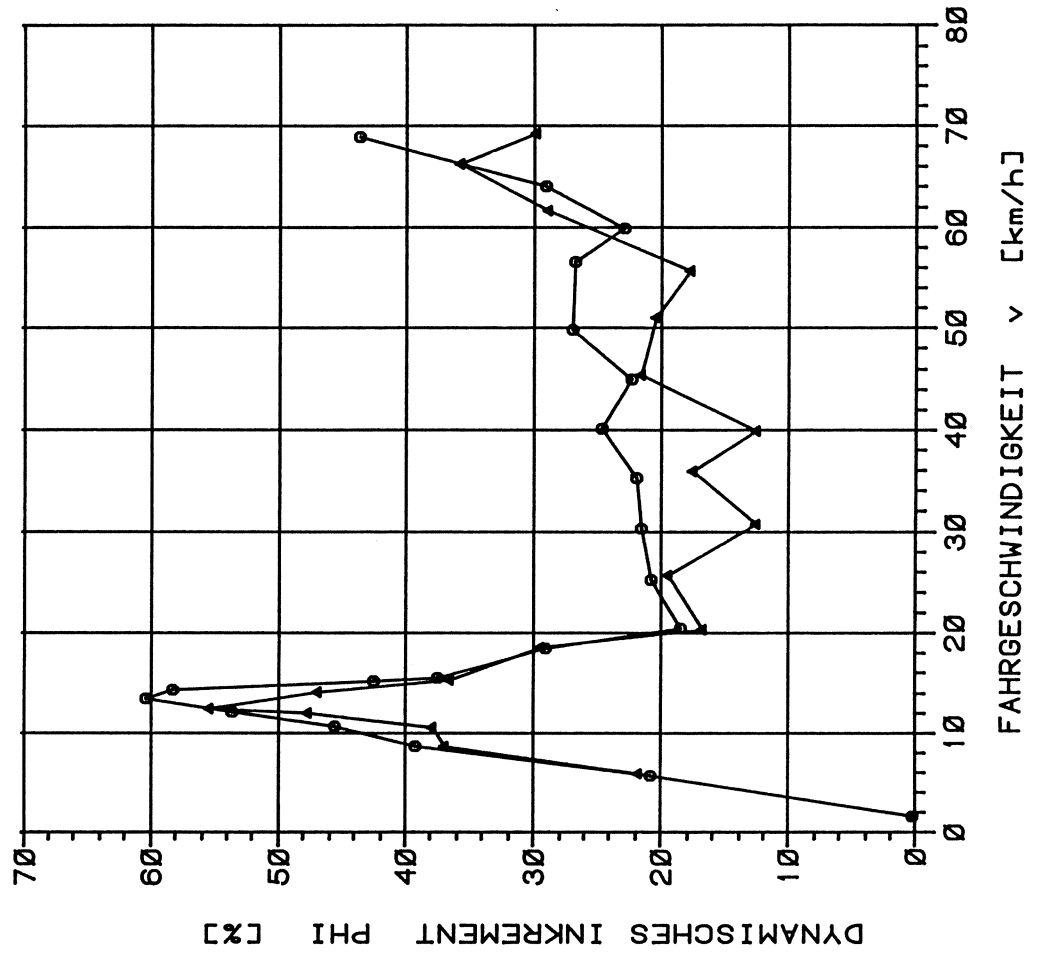
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	74R 10 KmA	-2.98 MM	106.24	10.6
▲	74R 6 KmA	-2.98 MM	94.87	10.3



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, WG Ø1

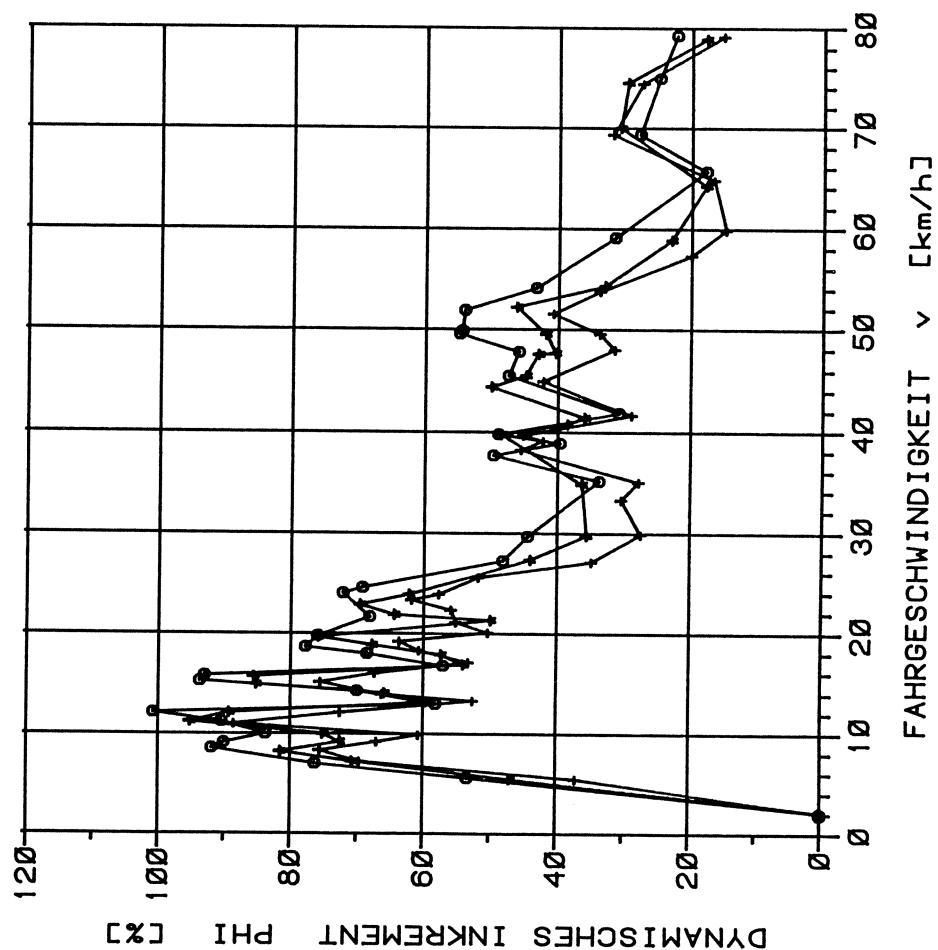
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	76R 10 KmA	-3.68 MM	60.31	13.3
▲	76R 6 KmA	-3.68 MM	55.29	12.4



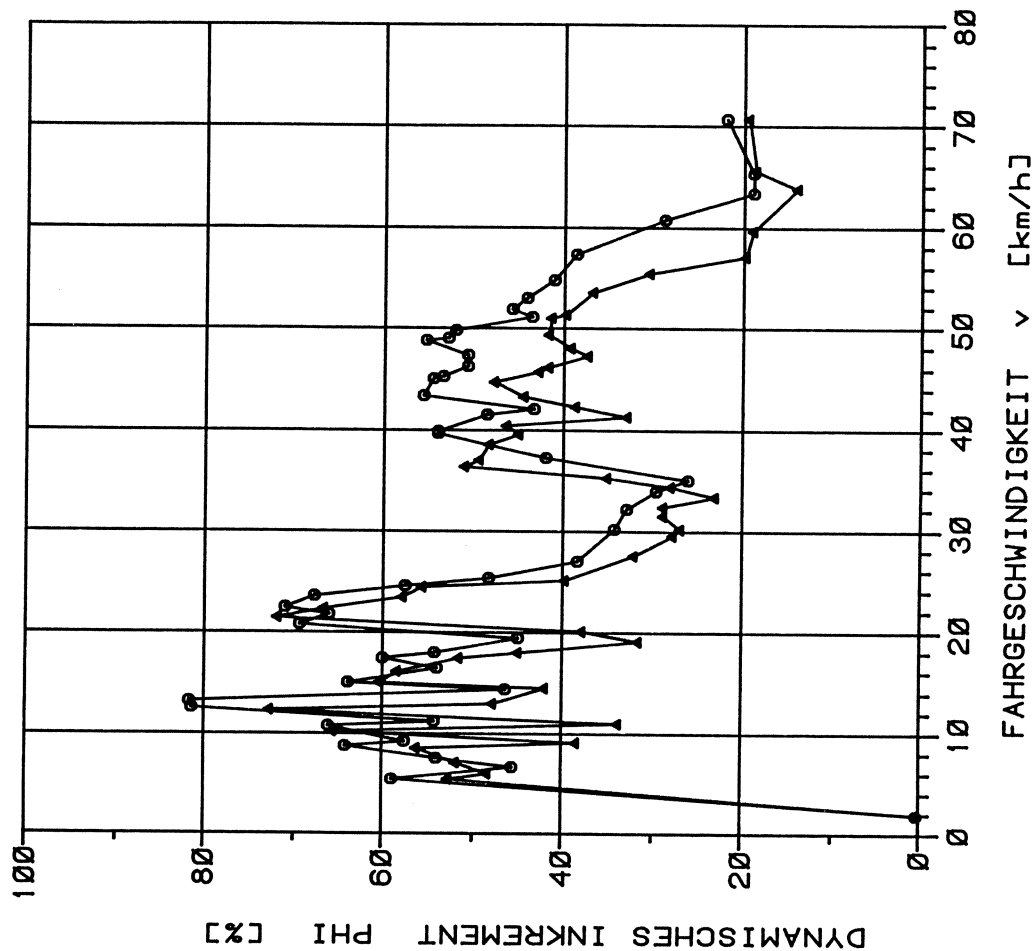
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, WG Ø2

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	11R 10 AmA	-1.05 MM	100.57
+	WG Ø2	11R 8 AmA	-1.05 MM	94.96
+	WG Ø2	11R 6 AmA	-1.05 MM	88.40
				12.1
				11.2
				10.9

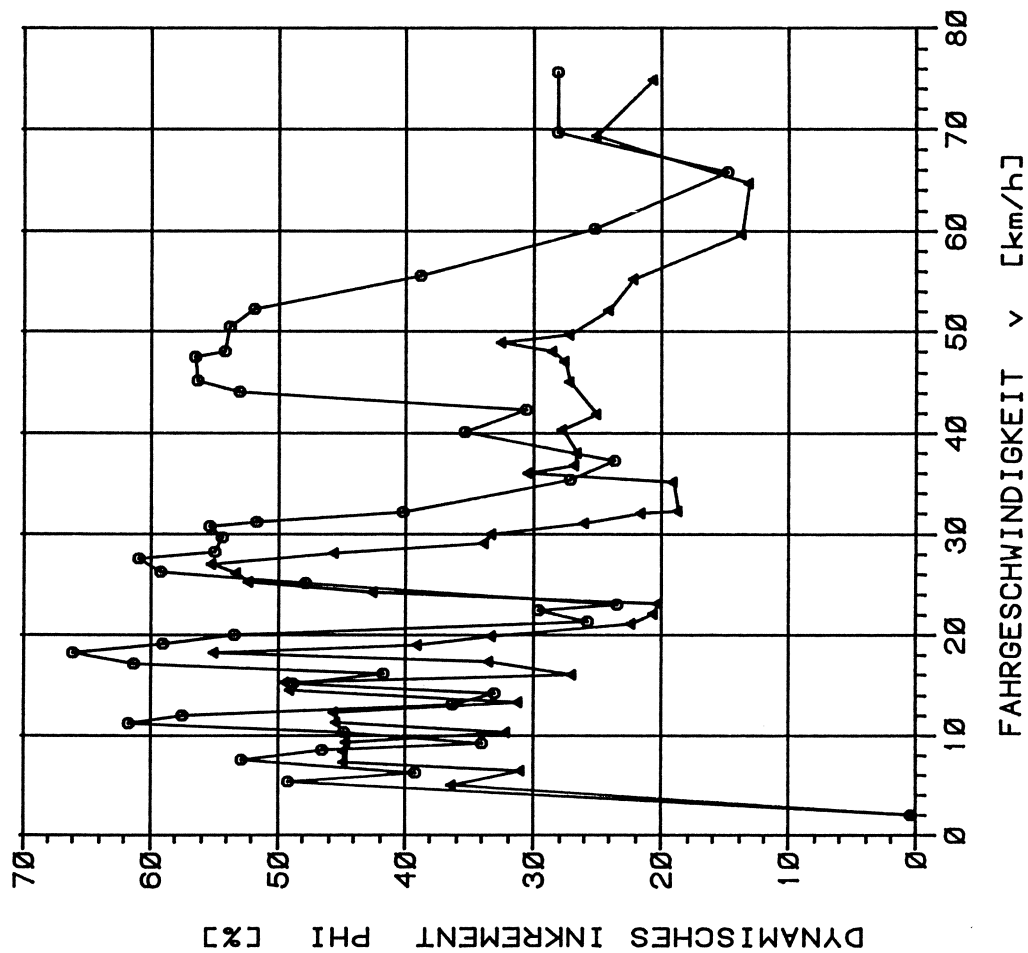


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	12R 10 AmA	-1.03 MM	81.65
+	WG Ø2	12R 6 AmA	-1.03 MM	72.65
				13.1
				12.3



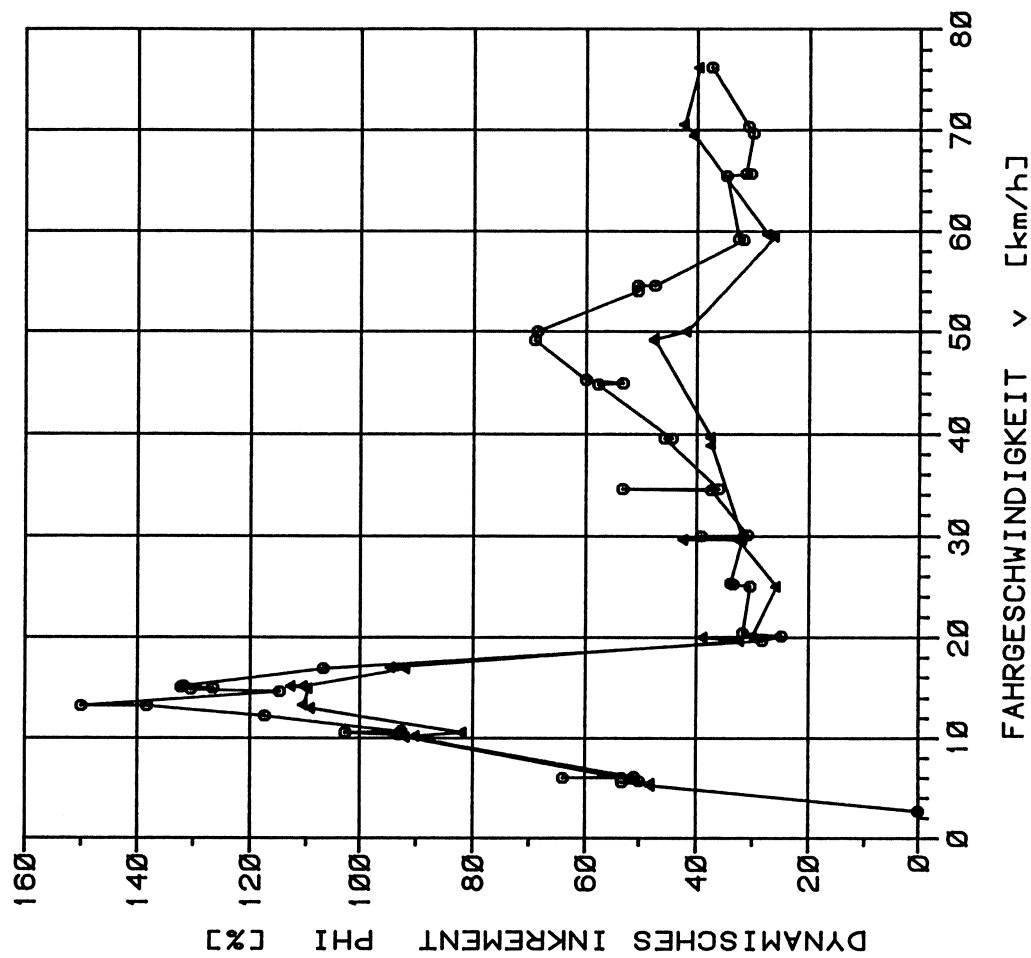
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	13R 10 AmA	-1.03 MM	66.04
▲	WG Ø2	13R 6 AmA	-1.03 MM	54.99
				18.2
				27.0



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 2ØR, WG Ø2

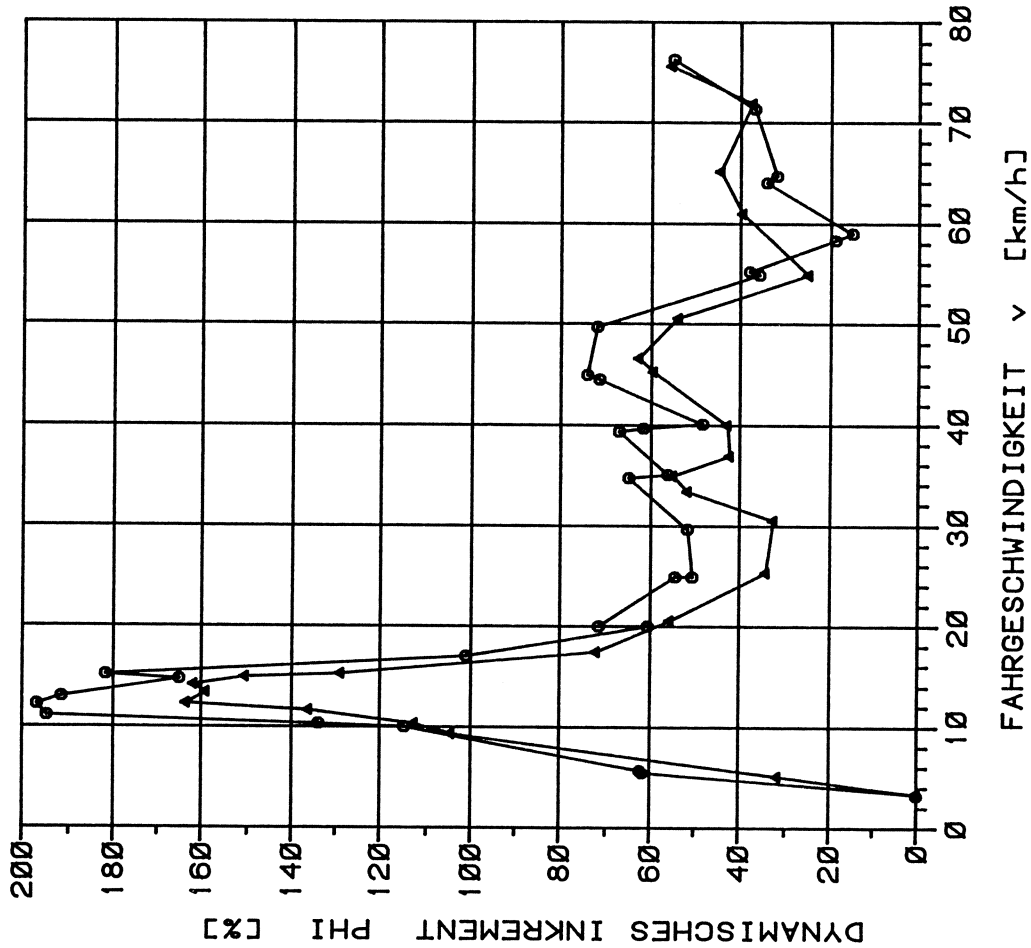
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	2ØR 10 AmA	-1.75 MM	149.80
▲	WG Ø2	2ØR 6 AmA	-1.75 MM	112.14
				13.2
				15.1



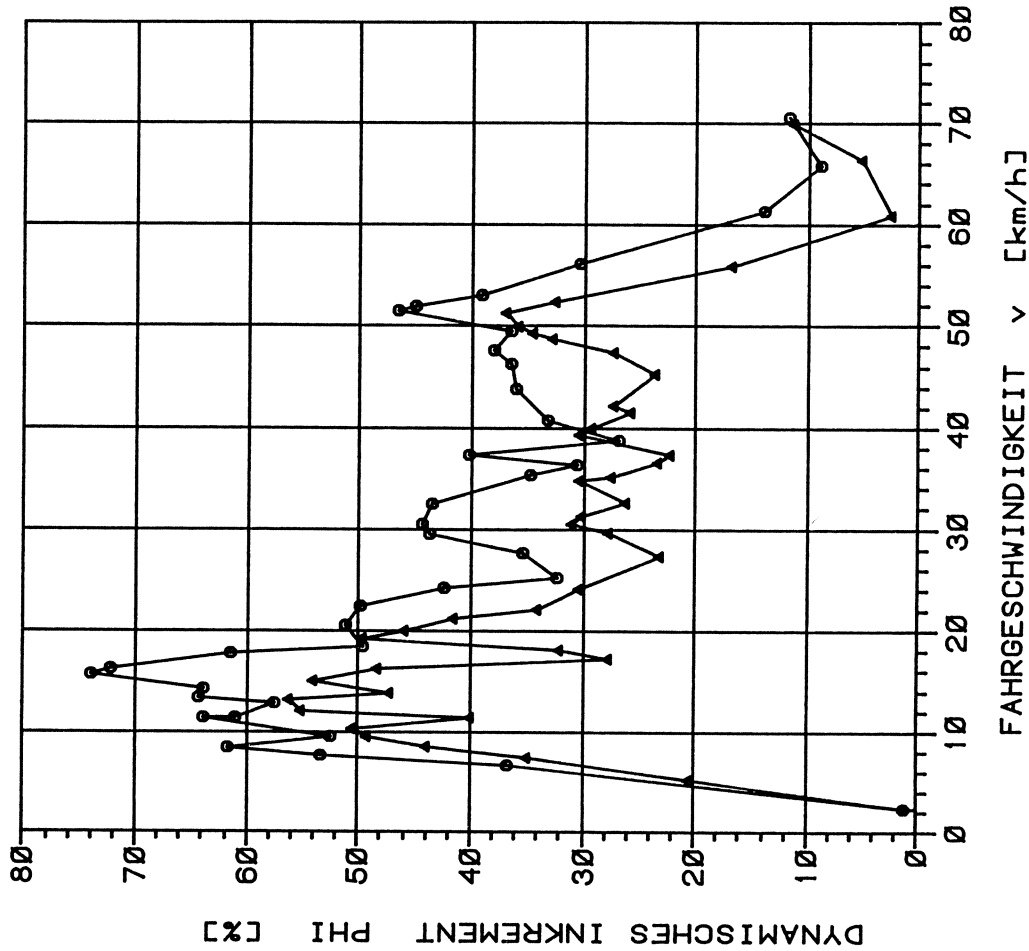
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, WG Ø2

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG Ø2	25R 10 AmA	-1.76 MM	196.94	12.1
WG Ø2	25R 6 AmA	-1.76 MM	163.29	12.3

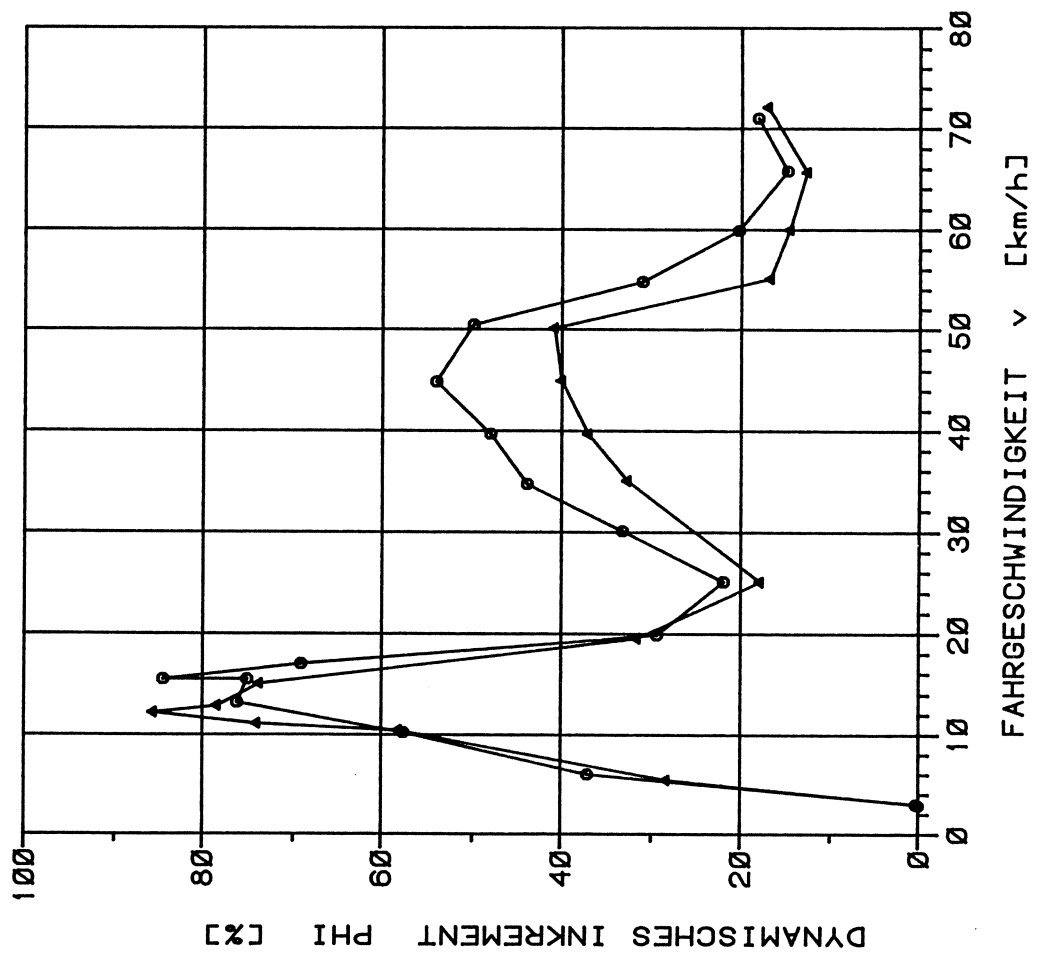


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG Ø2	42R 10 AmA	-1.72 MM	73.79	15.7
WG Ø2	42R 6 AmA	-1.72 MM	56.17	13.1



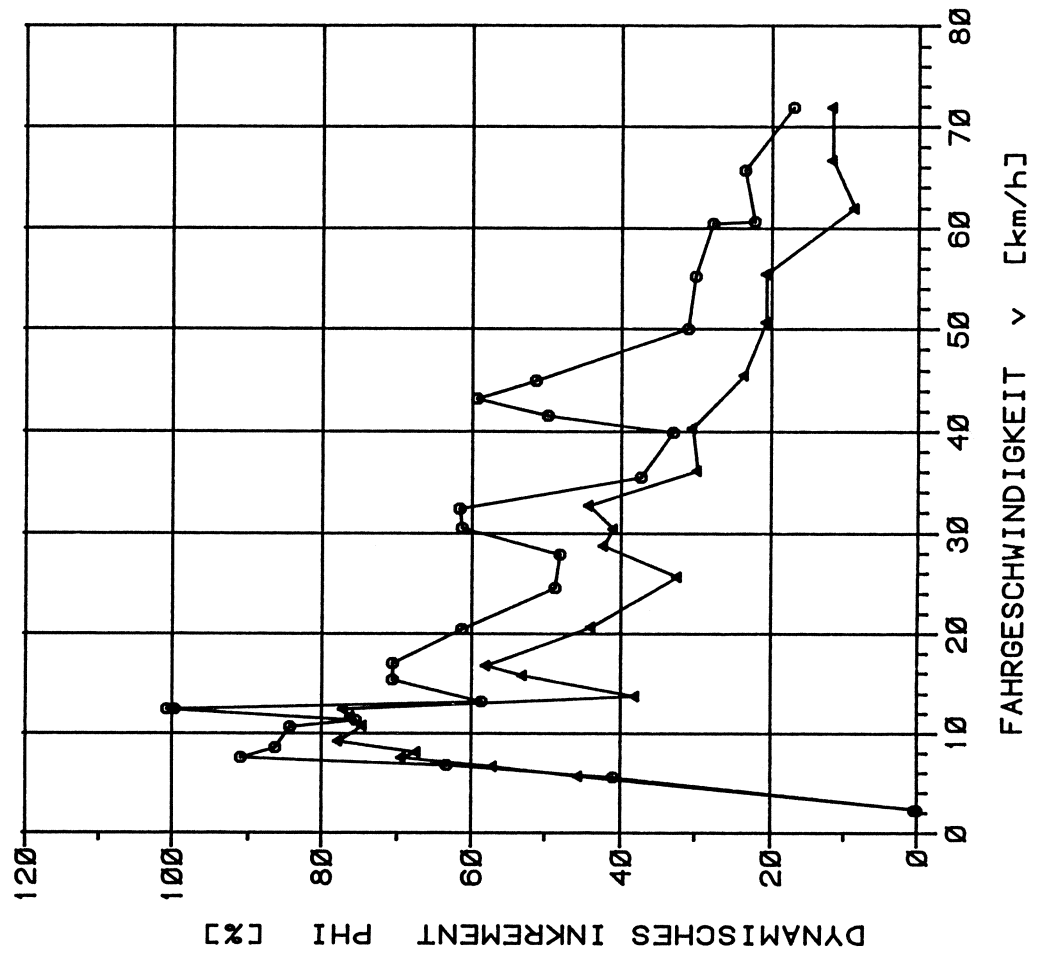
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2 52R 10 AmA	-2.52 MM	84.38	15.5
△	WG Ø2 52R 6 AmA	-2.52 MM	85.45	12.2



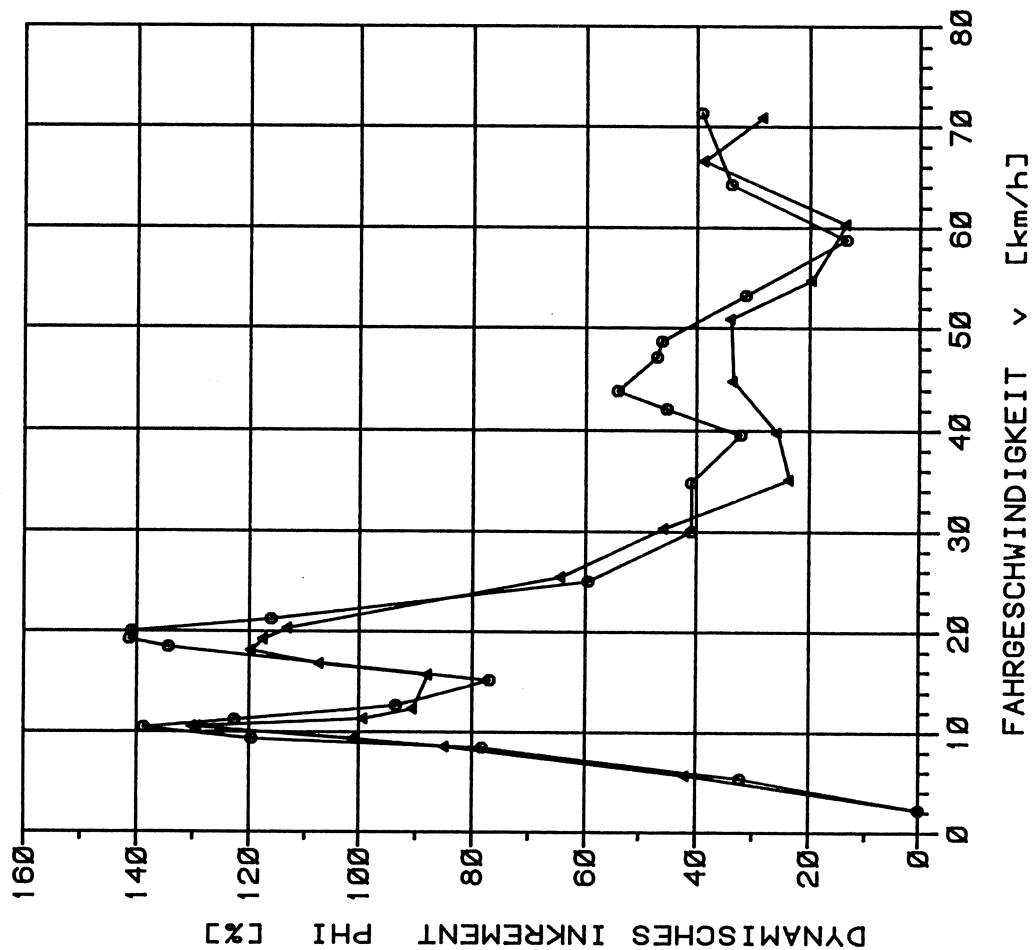
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2 71R 10 AmA	-1.51 MM	100.55	12.4
△	WG Ø2 71R 6 AmA	-1.51 MM	77.57	9.2



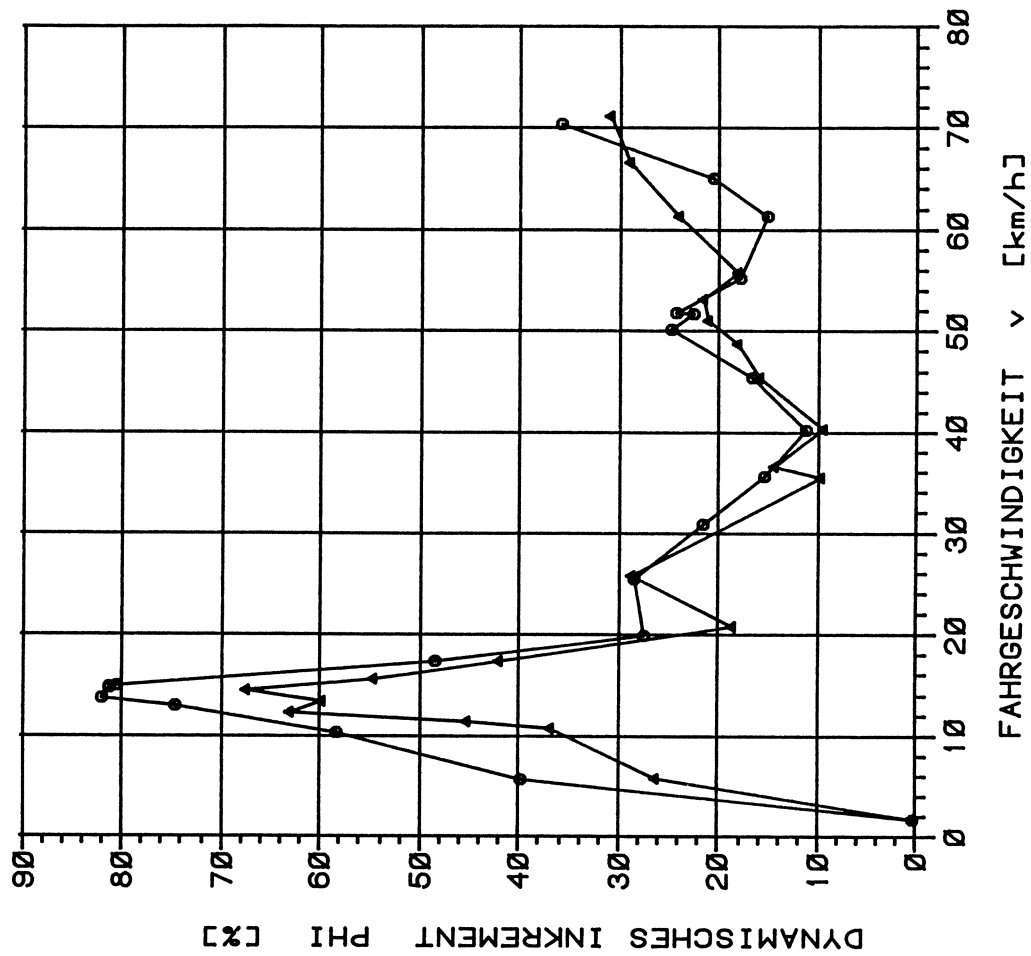
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	74R 10 AmA	-1.83 MM	141.18
▲	WG Ø2	74R 6 AmA	-1.83 MM	129.85



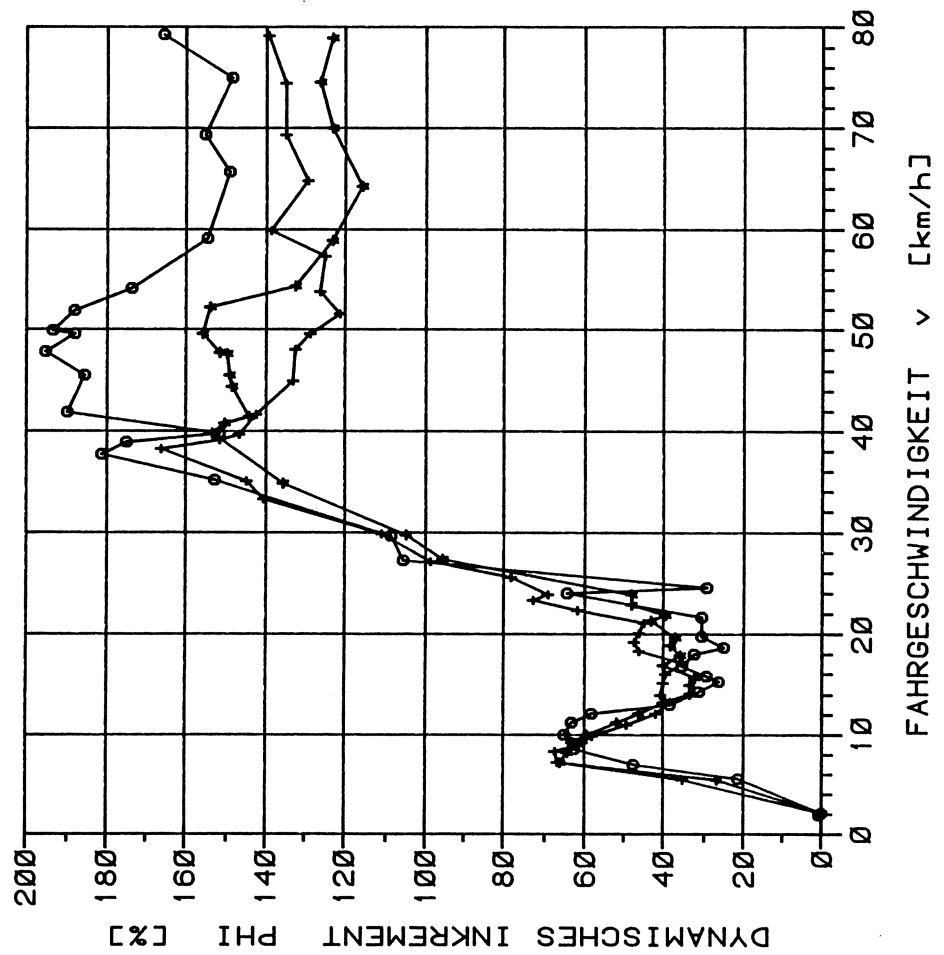
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	76R 10 AmA	-2.22 MM	81.76
▲	WG Ø2	76R 6 AmA	-2.22 MM	67.22



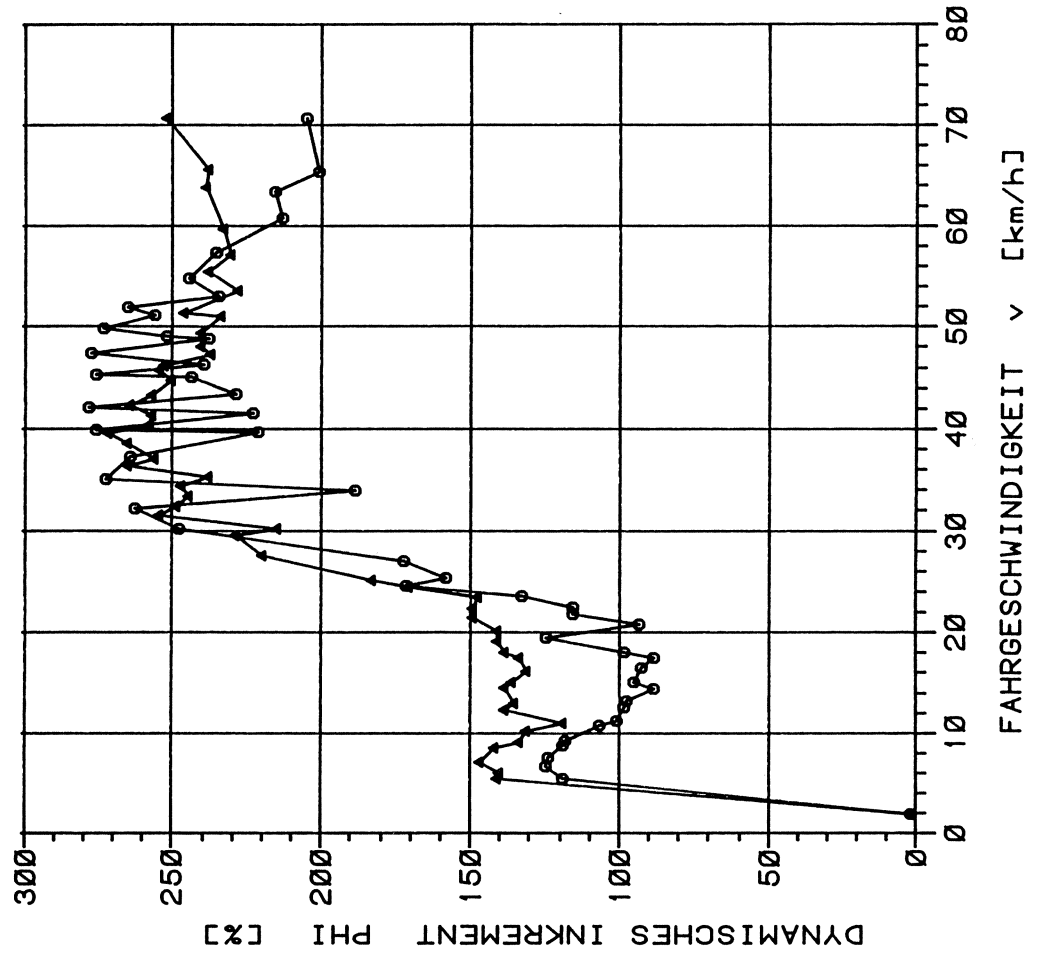
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 11R 10 AmA	9.05 MI	194.98	47.8
+	DMS 42 11R 8 AmA	9.05 MI	155.98	49.6
+	DMS 42 11R 6 AmA	9.05 MI	166.21	38.2



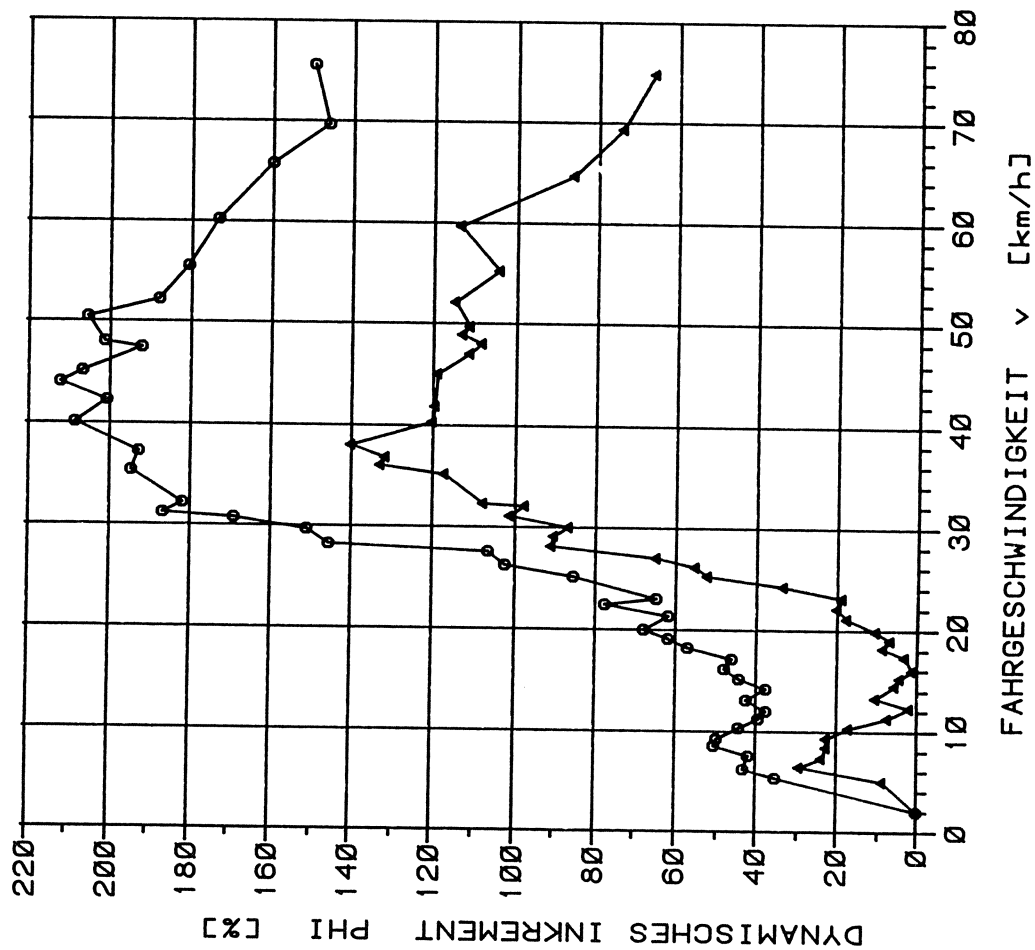
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 12R 10 AmA	5.62 MI	277.52	42.0
+	DMS 42 12R 6 AmA	5.62 MI	271.47	39.5



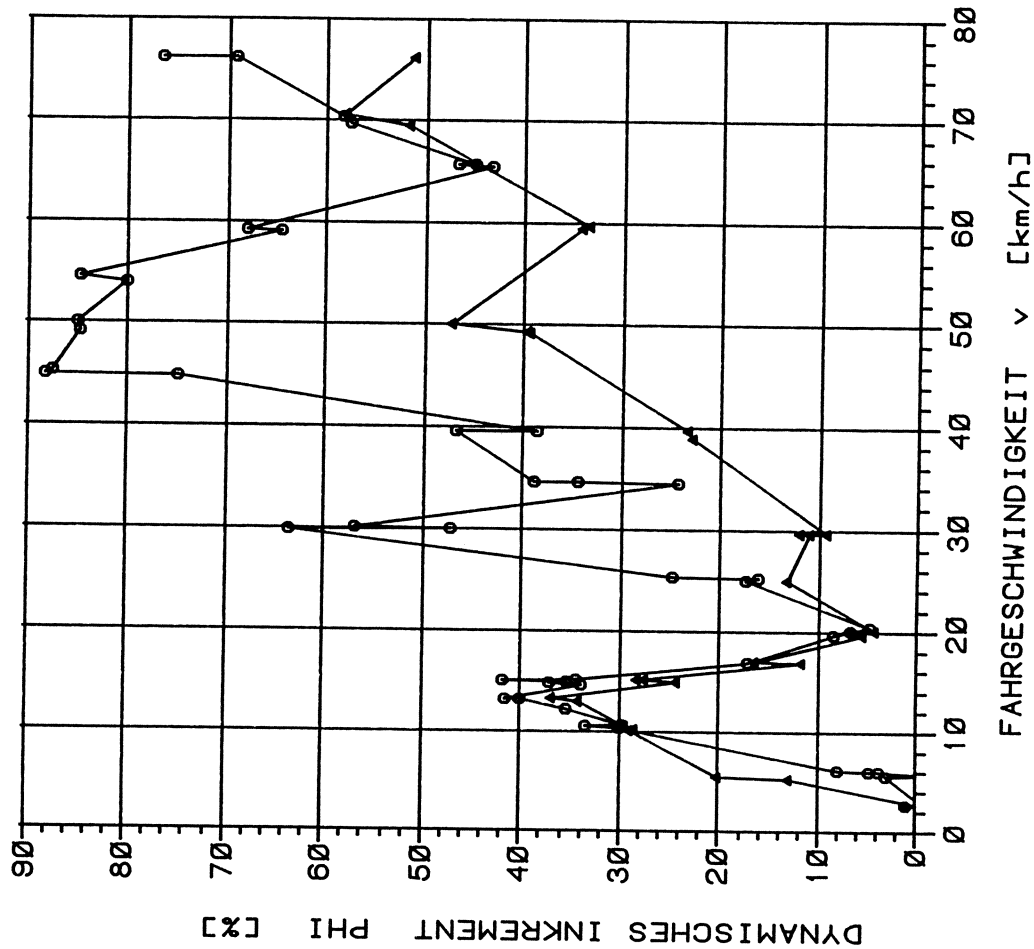
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 13R 10 AmA	8.94 MI	211.67	44.0
▲	DMS 42 13R 6 AmA	8.94 MI	139.70	37.9



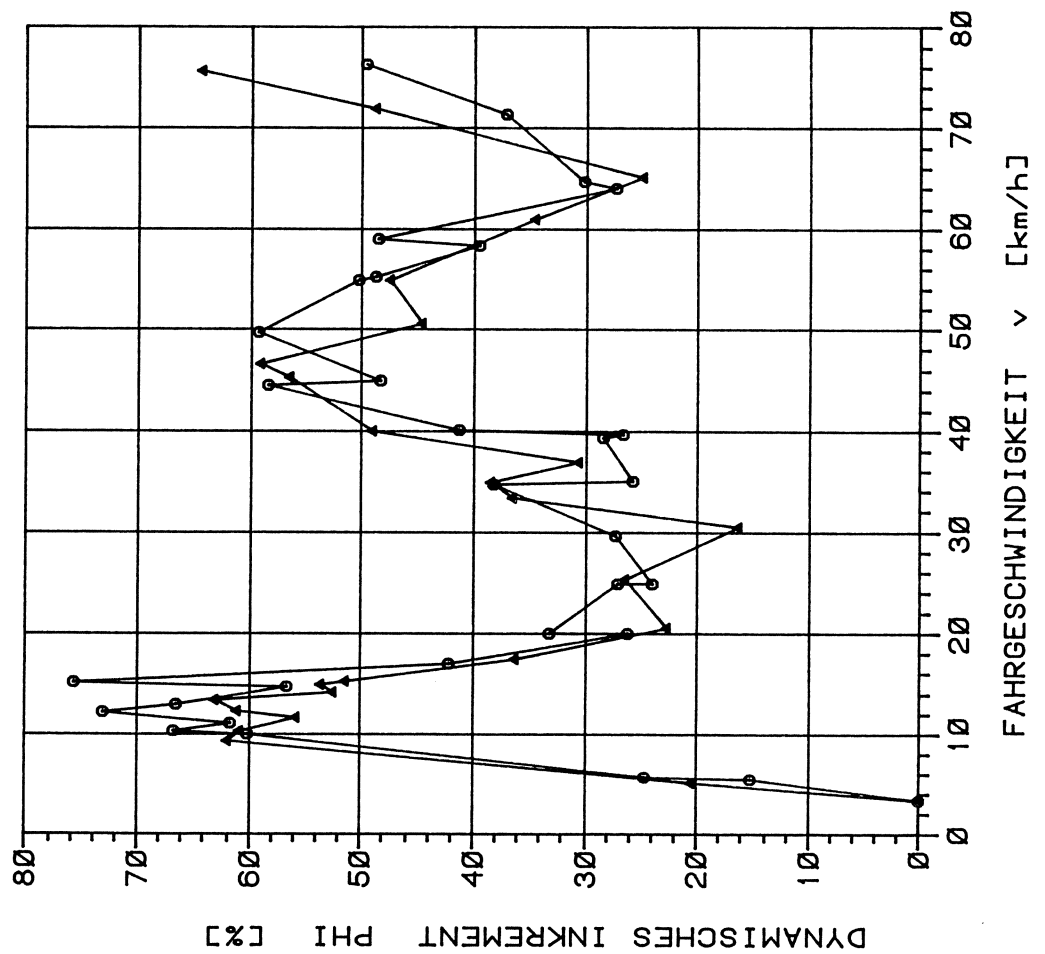
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 20R 10 AmA	16.74 MI	88.01	44.9
▲	DMS 42 20R 6 AmA	16.74 MI	57.85	70.5



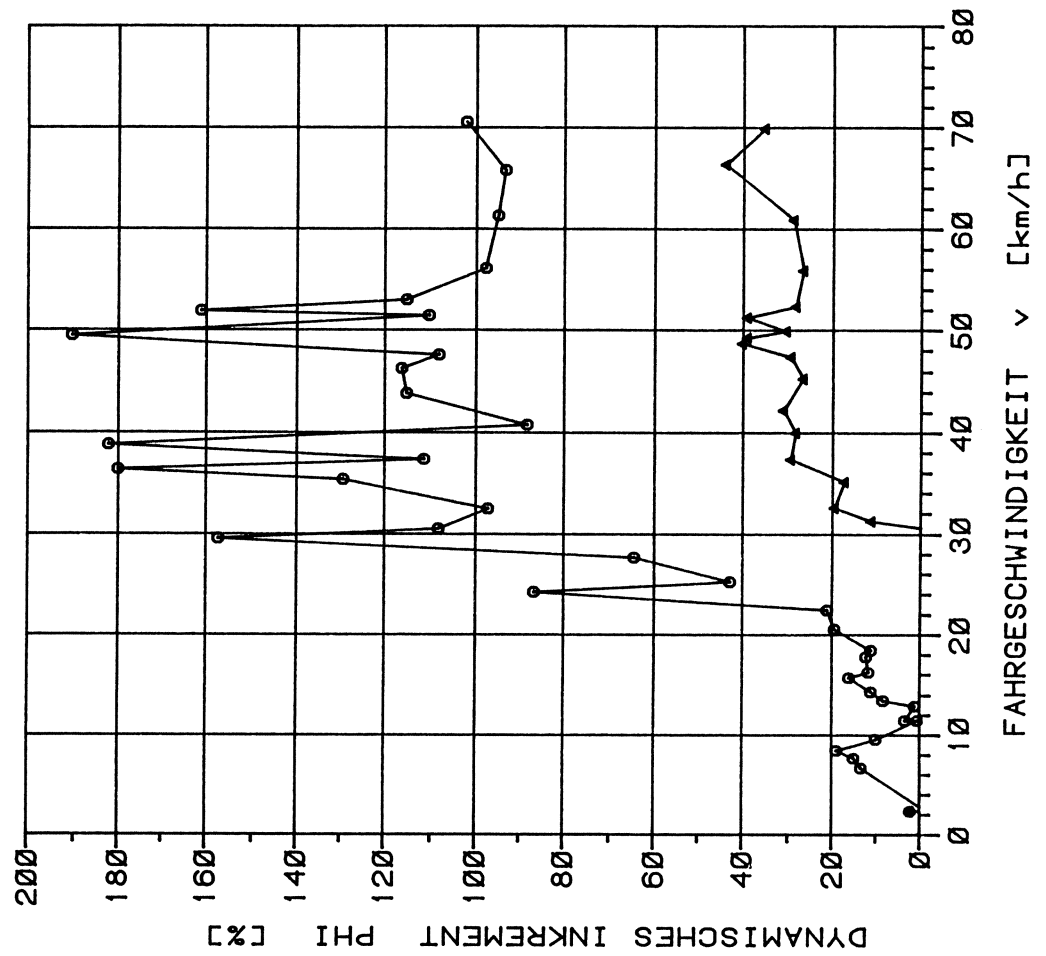
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	25R 10 AmA	14.63 MI	75.67
▲	DMS 42	25R 6 AmA	14.63 MI	64.22
				15.1
				75.6



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 42

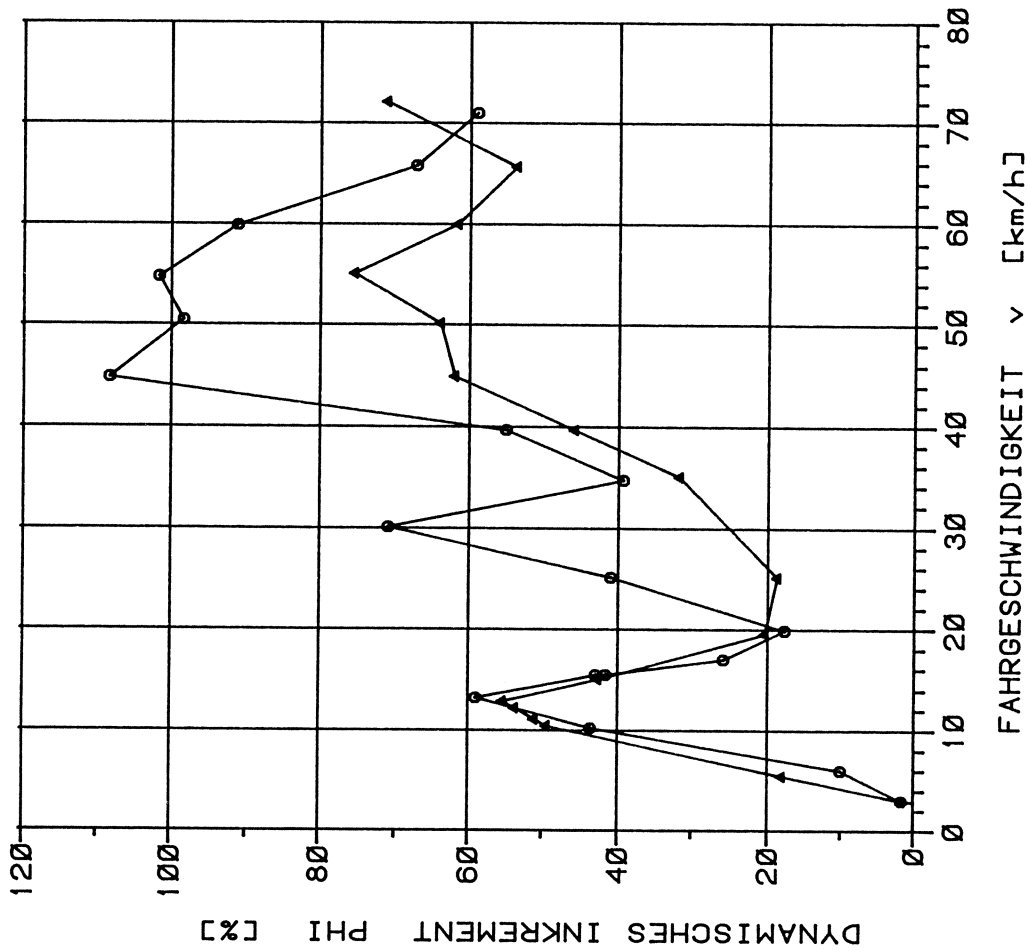
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	42R 10 AmA	7.32 MI	190.33
▲	DMS 42	42R 6 AmA	7.32 MI	43.70
				49.4
				66.3



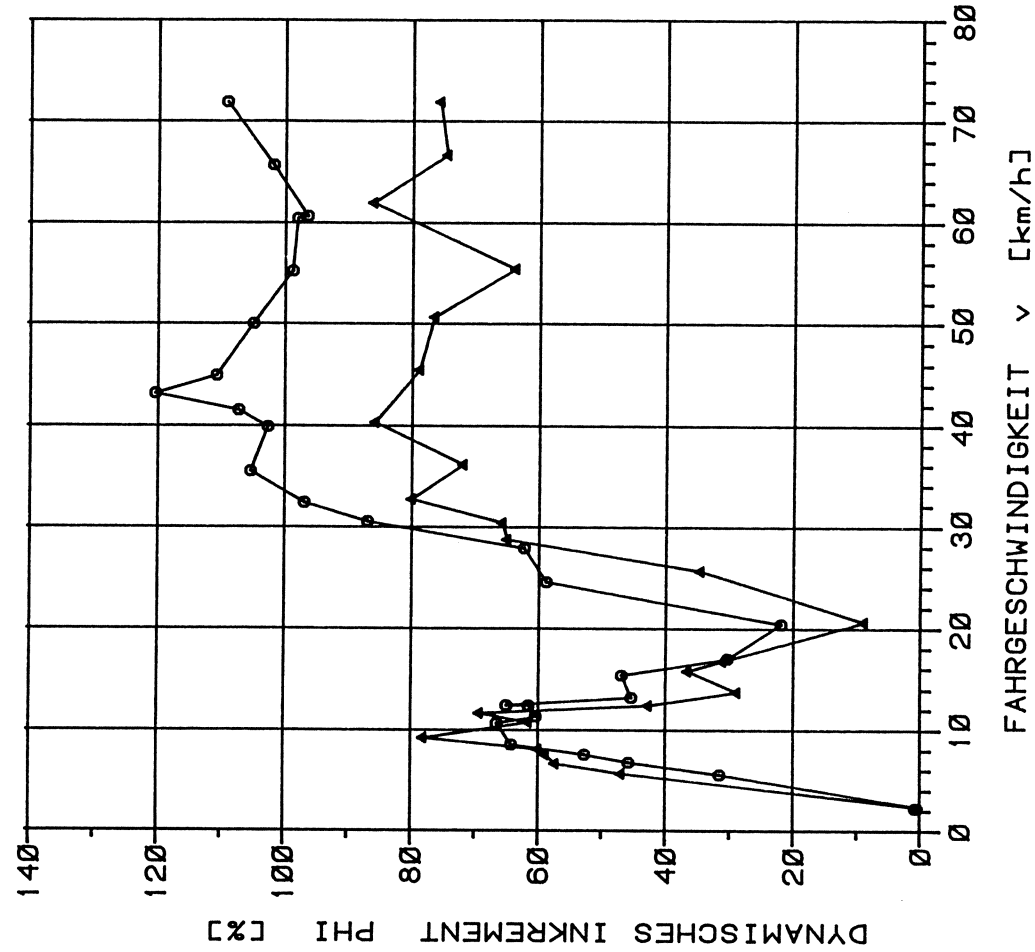
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 42

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 52R 10 AmA	15.05 MI	108.32	44.8
▲	DMS 42 52R 6 AmA	15.05 MI	75.29	55.1

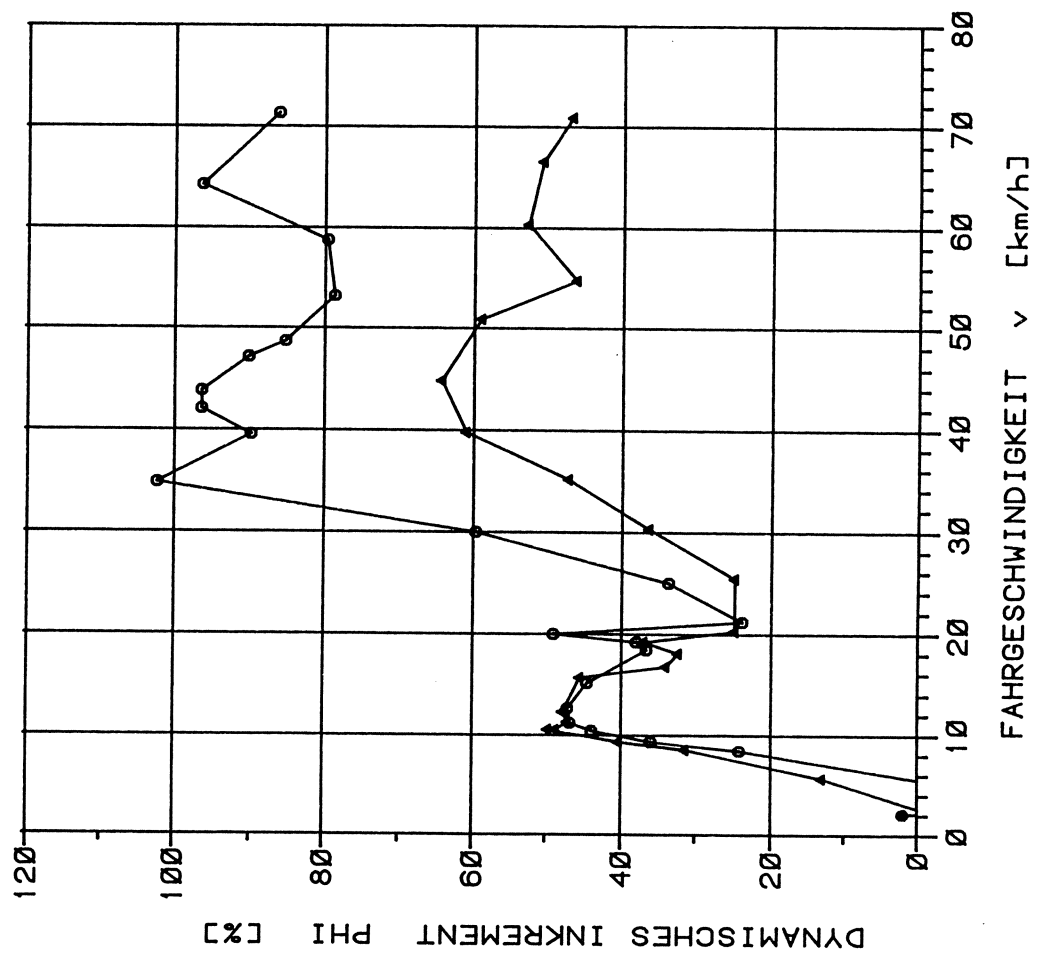


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 71R 10 AmA	9.72 MI	120.15	43.1
▲	DMS 42 71R 6 AmA	9.72 MI	85.87	61.9



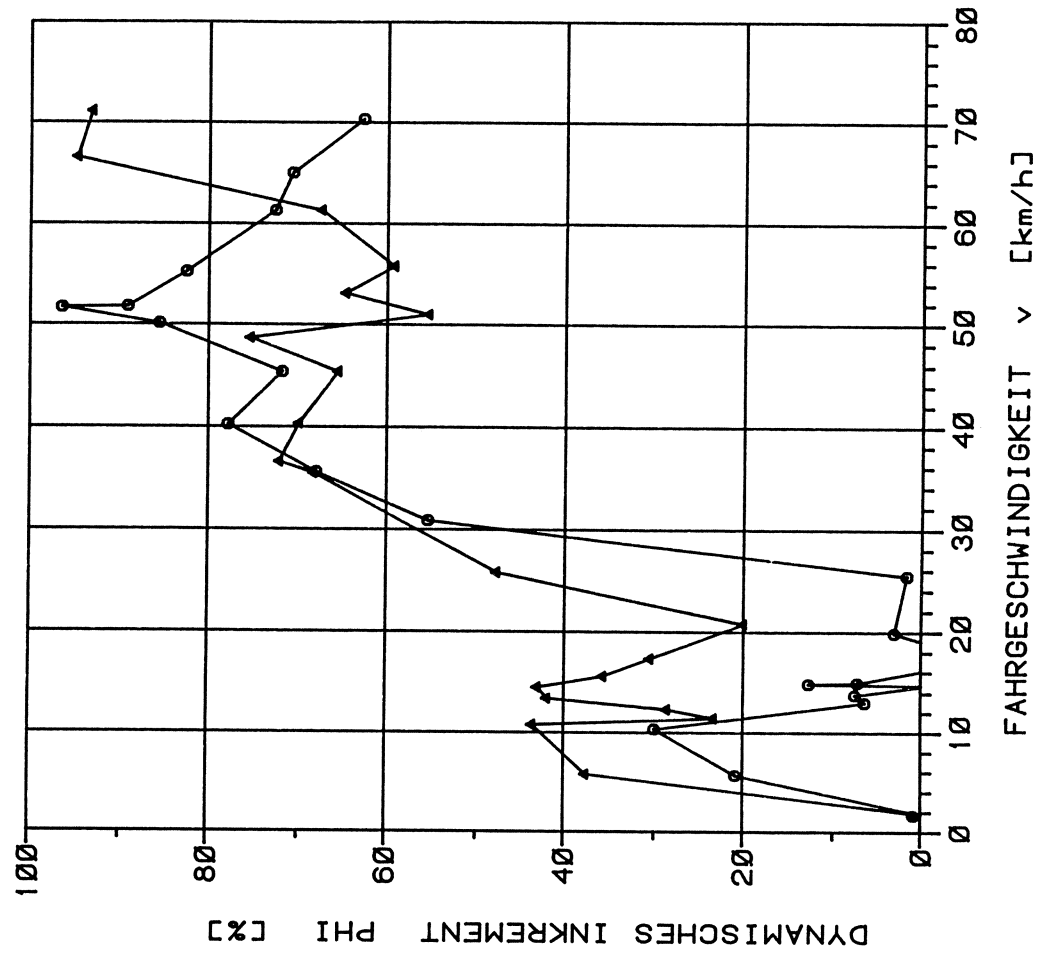
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	74R 10 AmA	11.62 MI	102.27
▲	DMS 42	74R 6 AmA	11.62 MI	64.15
				34.7
				44.8



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	76R 10 AmA	10.25 MI	96.48
▲	DMS 42	76R 6 AmA	10.25 MI	94.66
				51.7
				66.5



A7.112
A7.111

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 52+

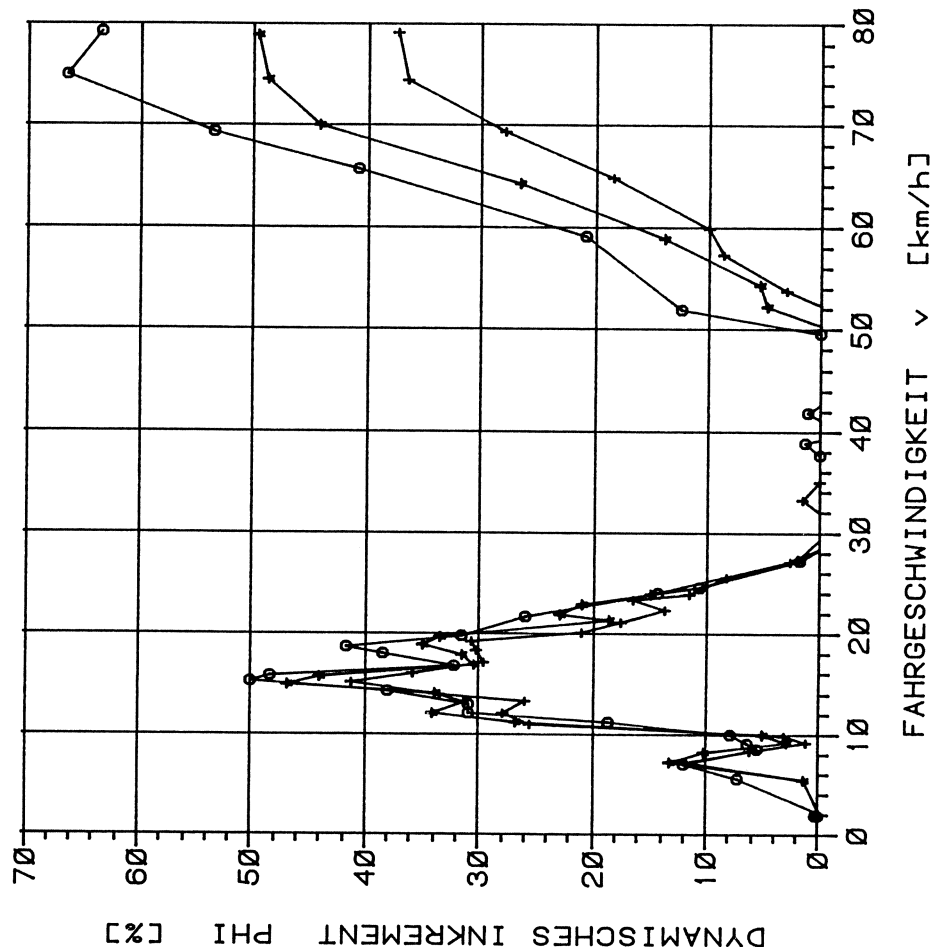
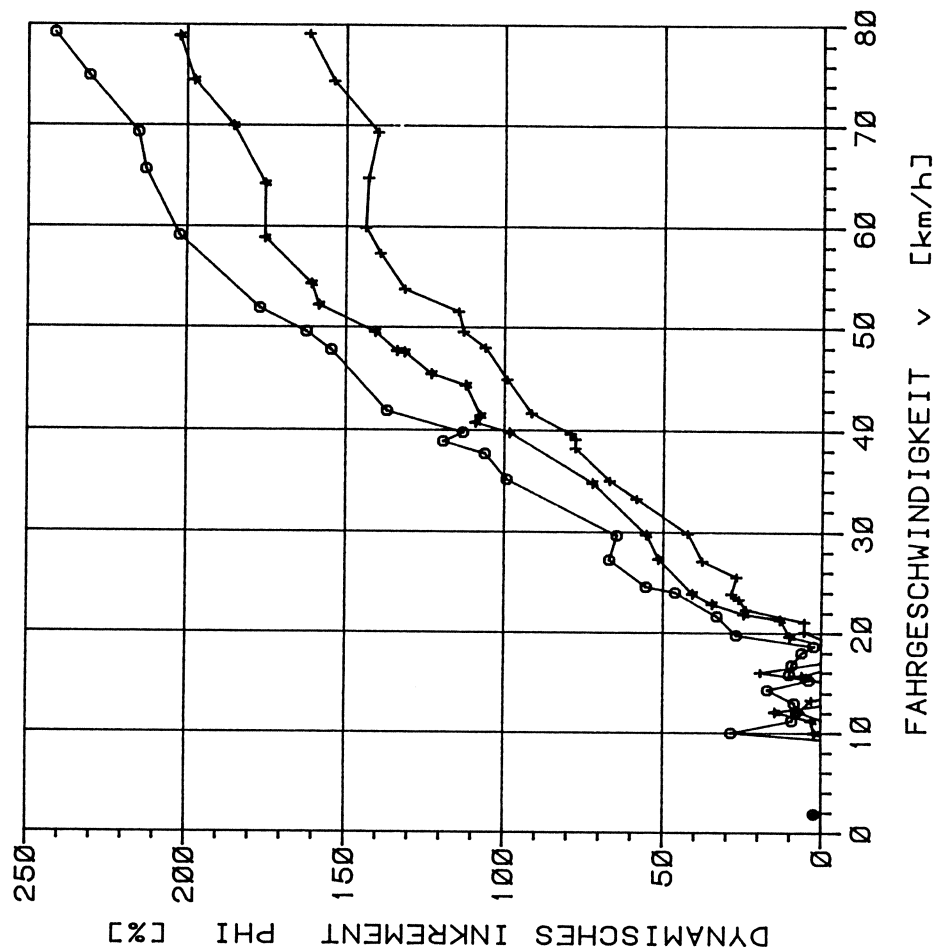
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	11R 10 AmA	13.19 MI	241.89
+	DMS 52	11R 8 AmA	13.19 MI	202.26
+	DMS 52	11R 6 AmA	13.19 MI	161.88

79.3
78.9
79.1

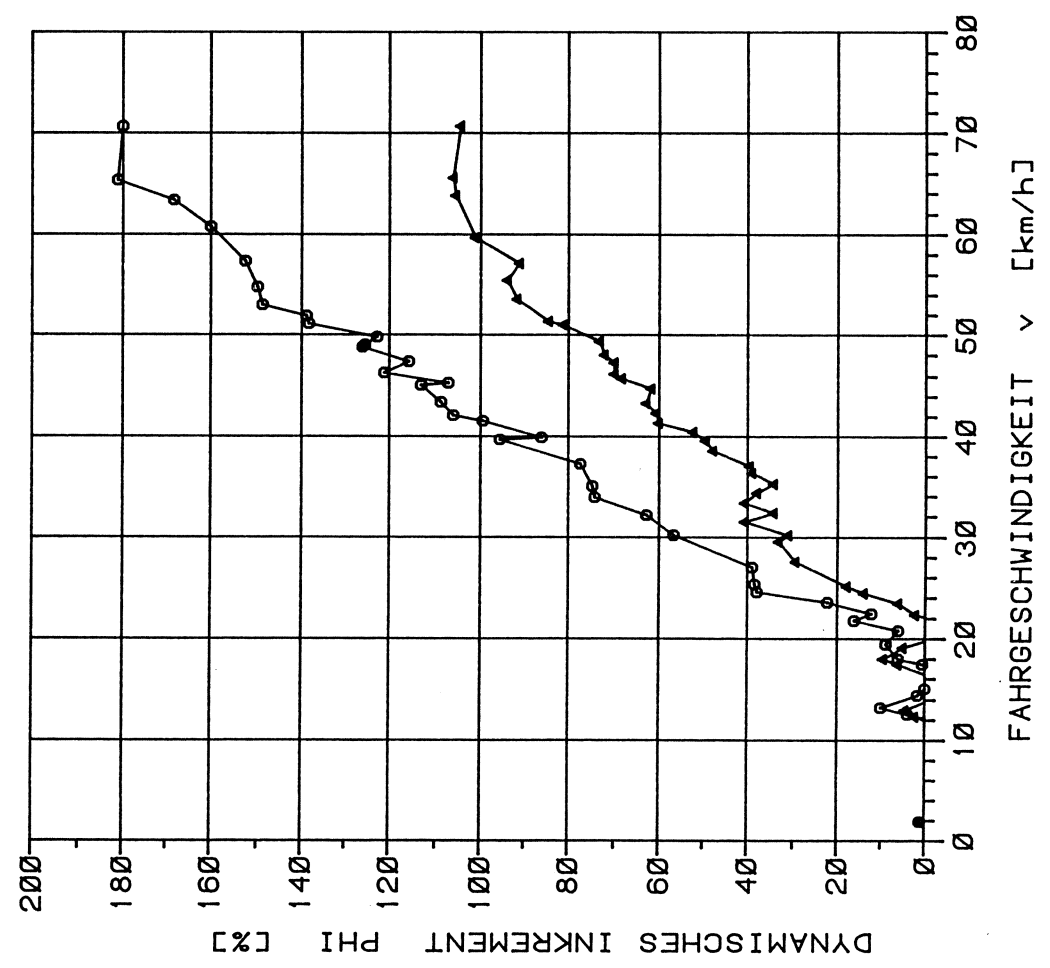
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	11R 10 AmA	-17.16 MI	66.34
+	DMS 52	11R 8 AmA	-17.16 MI	49.63
+	DMS 52	11R 6 AmA	-17.16 MI	41.24

74.9
78.9
15.1



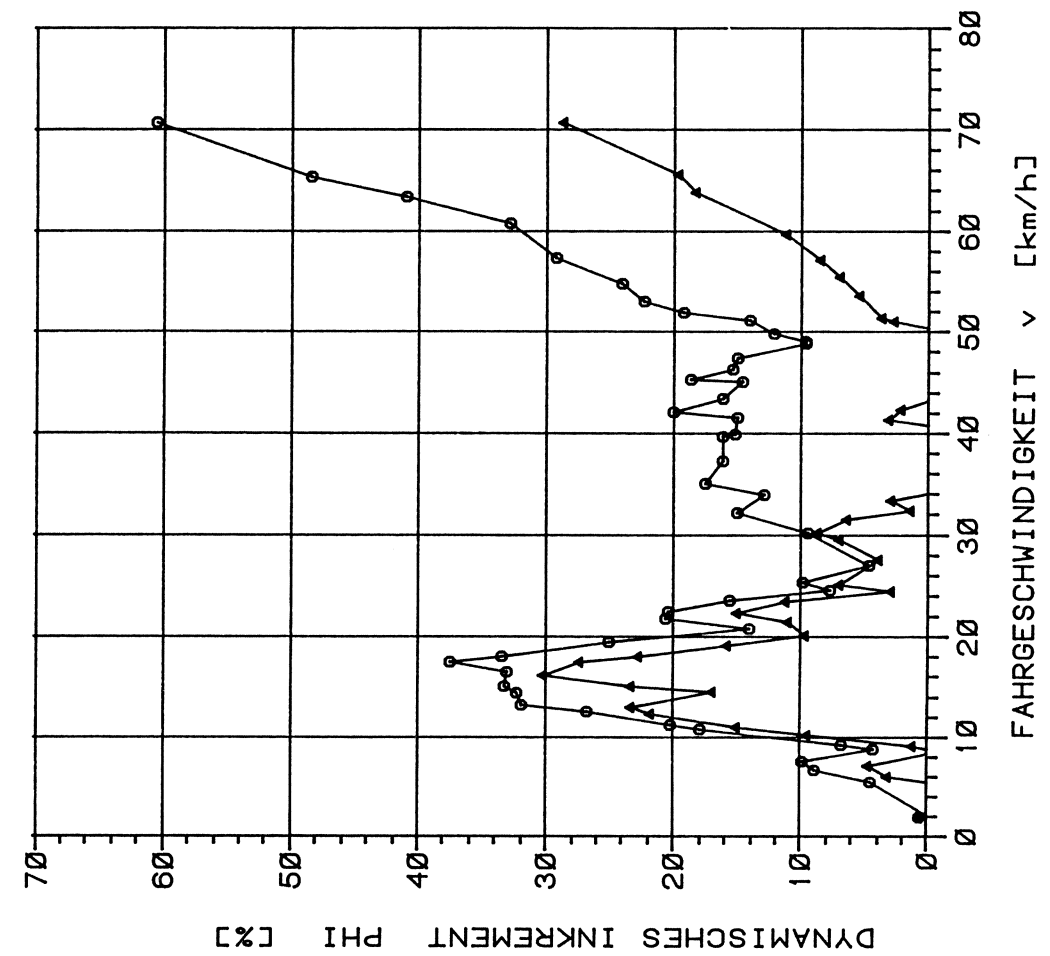
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	12R 10 AmA	16.57 MI	181.03
○	DMS 52	12R 6 AmA	16.57 MI	105.80
				65.3
				65.5



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 52-

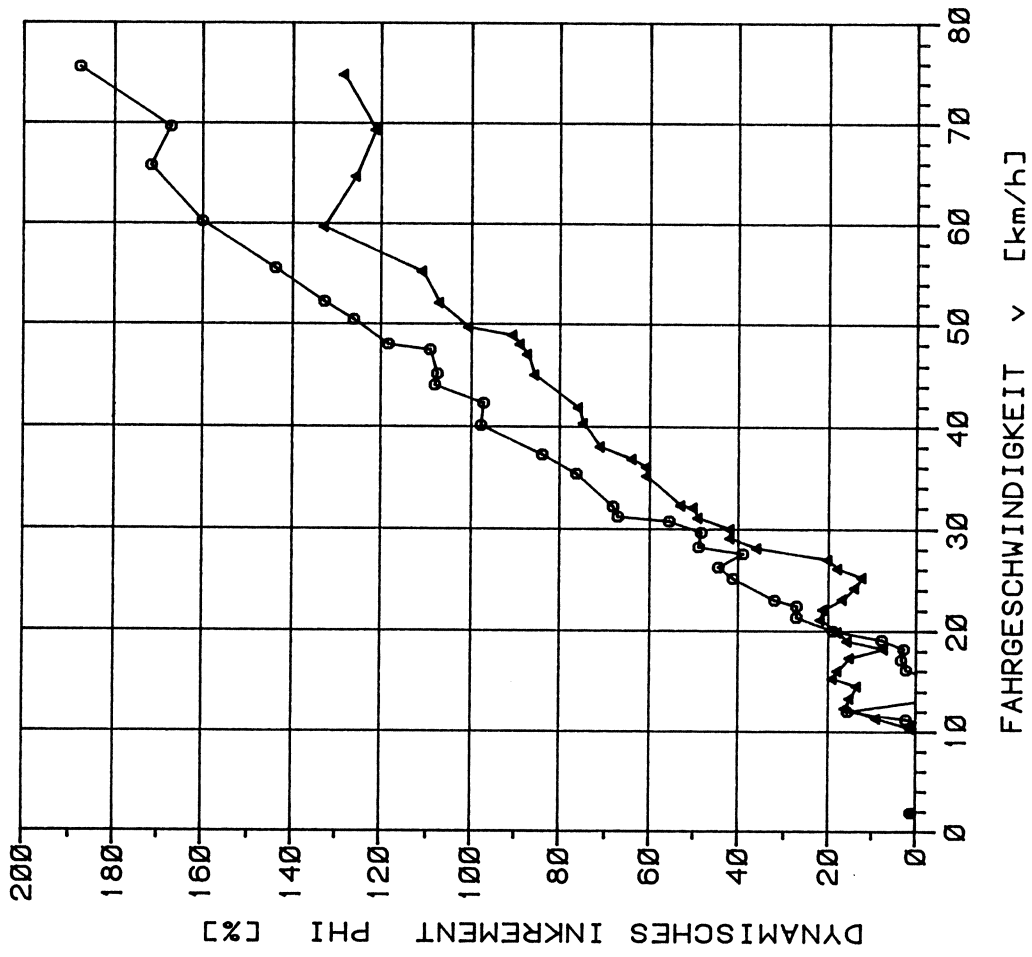
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	12R 10 AmA	-16.78 MI	60.47
○	DMS 52	12R 6 AmA	-16.78 MI	30.20
				70.6
				16.1



A7.116
A7.115

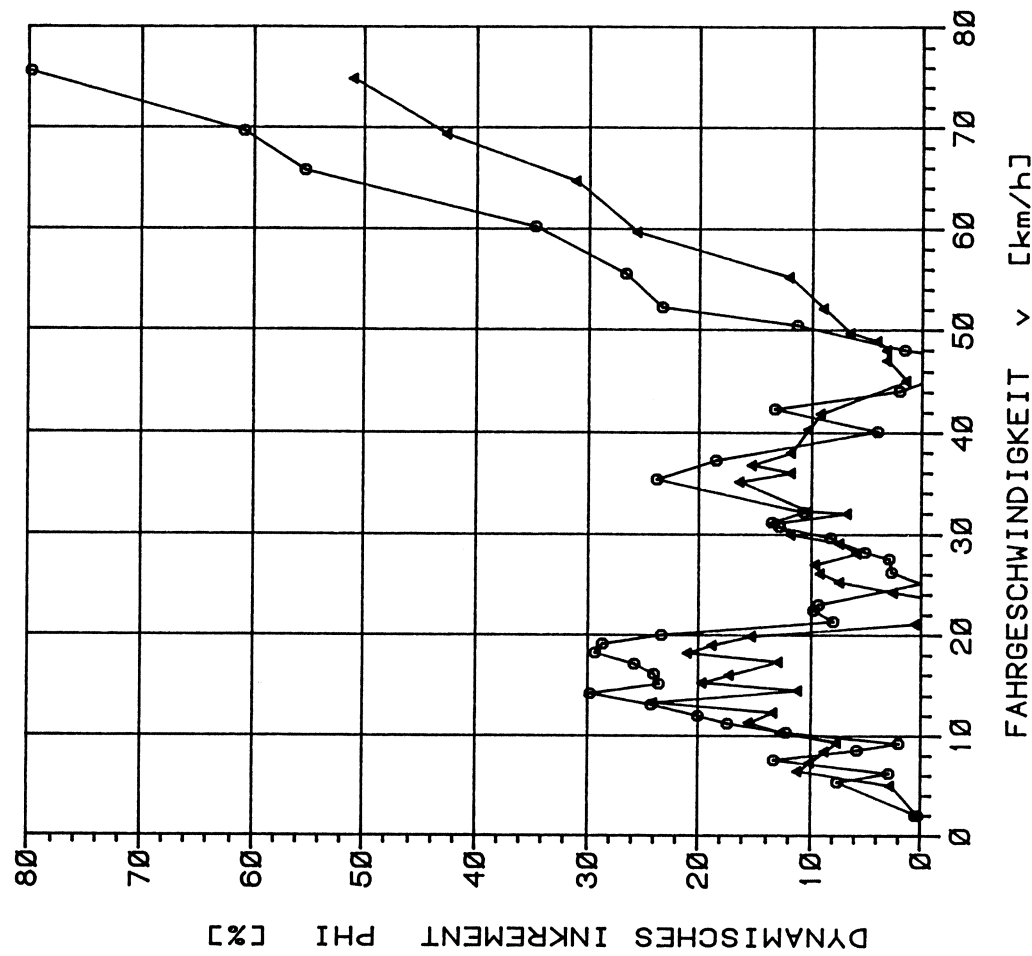
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	13R 10 AmA	16.25 MI	187.43	75.6
▲—	13R 6 AmA	16.25 MI	132.33	59.6



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 52-

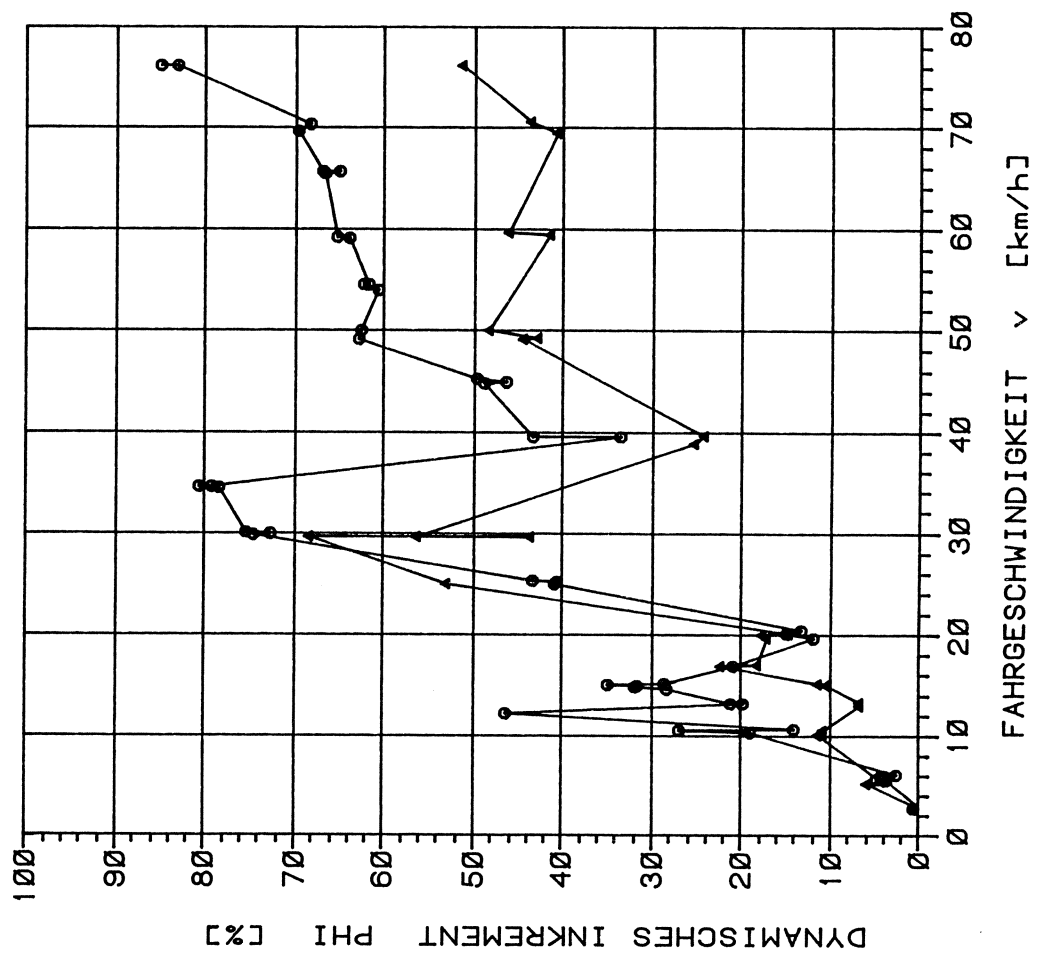
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	13R 10 AmA	-16.18 MI	79.84	75.6
▲—	13R 6 AmA	-16.18 MI	50.95	74.8



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 52+

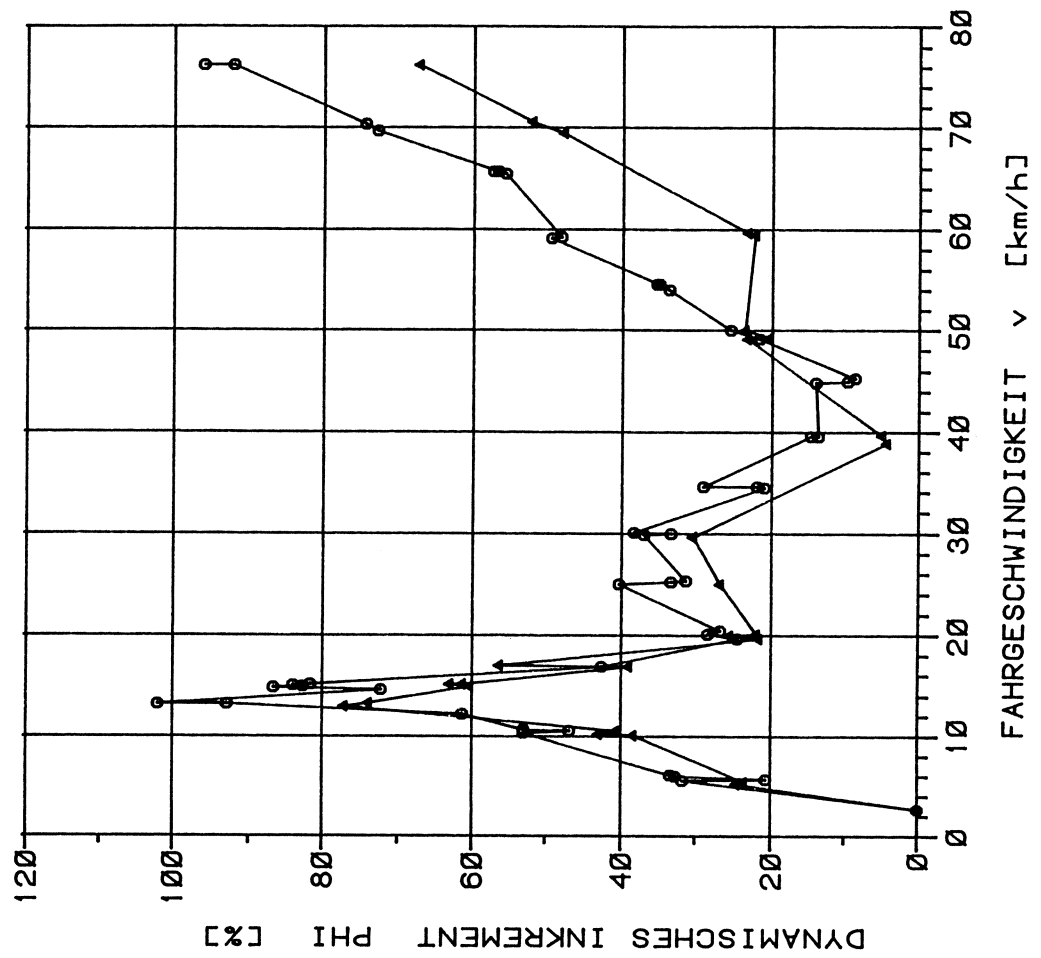
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 20R 10 AmA	3.60 MI	849.99	76.1
▲	DMS 52 20R 6 AmA	3.60 MI	681.87	29.5

X10



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 52-

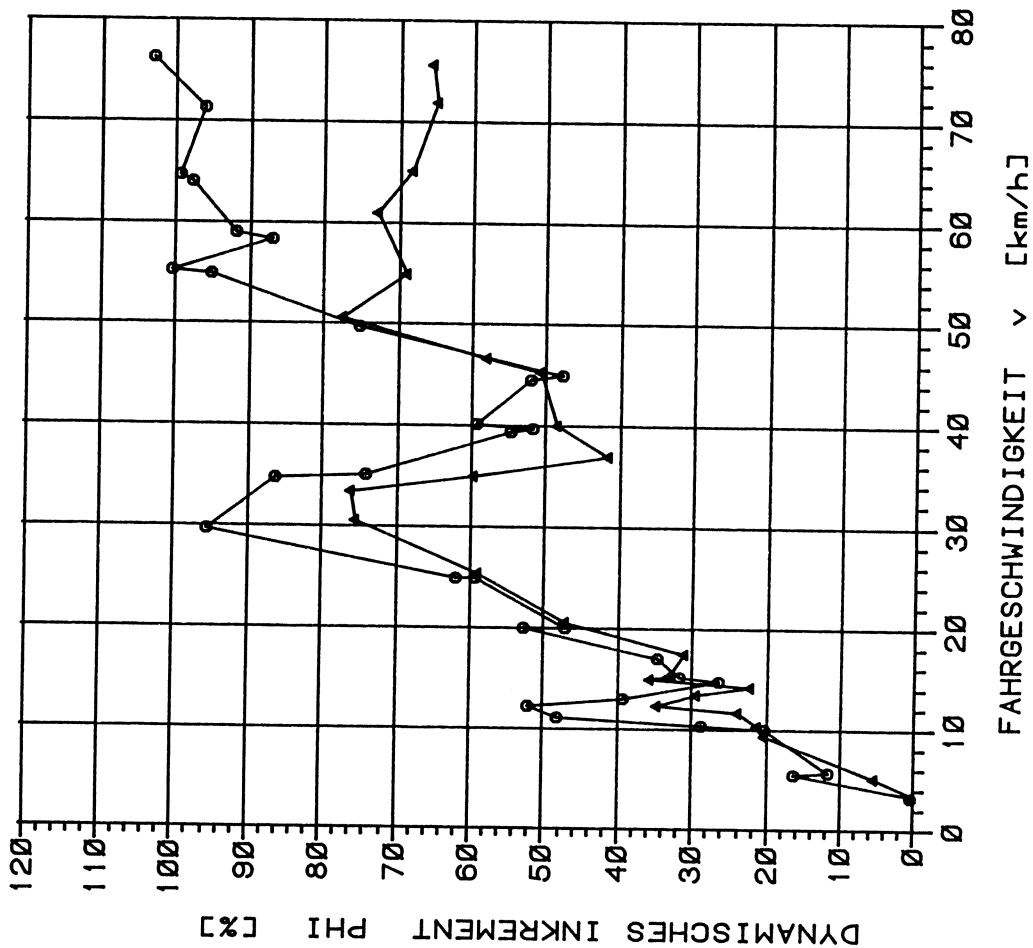
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 20R 10 AmA	-22.07 MI	102.05	13.2
▲	DMS 52 20R 6 AmA	-22.07 MI	76.87	12.9



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 52+

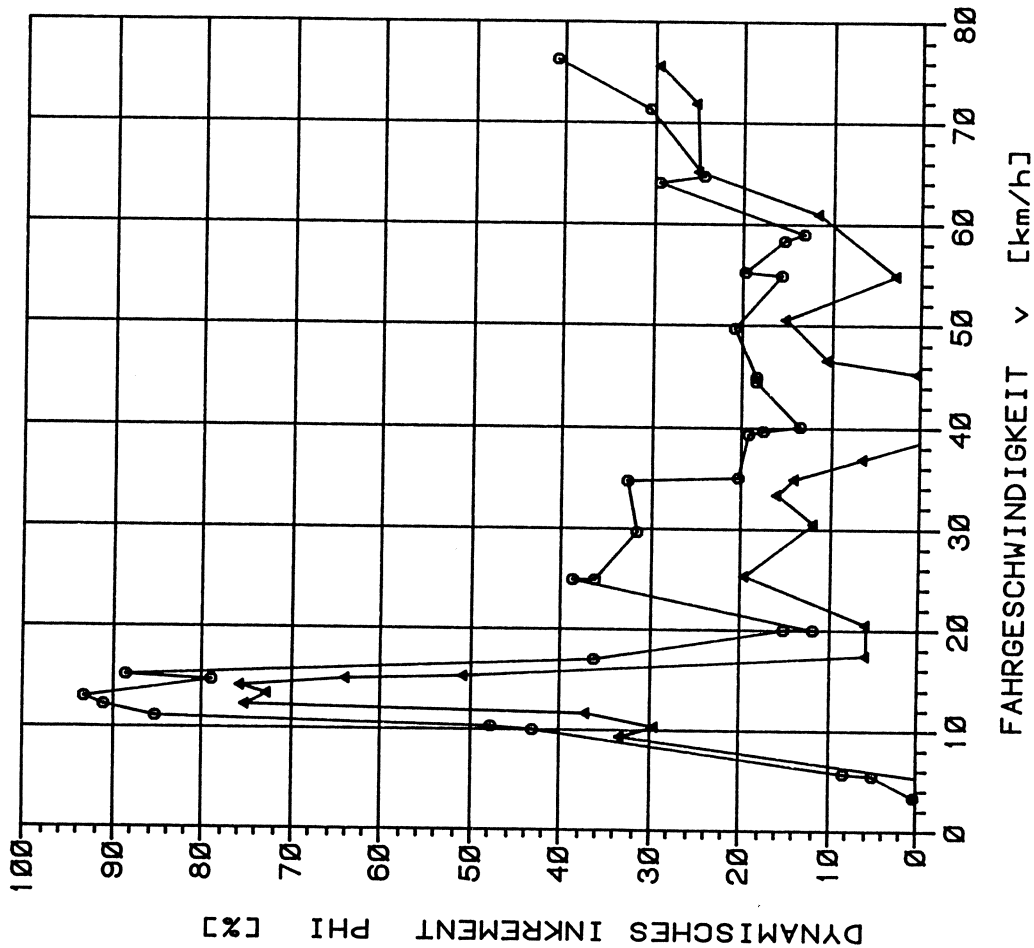
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
○	DMS 52 25R 10 AmA	2.74 MI	1027.60 76.3
▲	DMS 52 25R 6 AmA	2.74 MI	771.00 50.5

X10



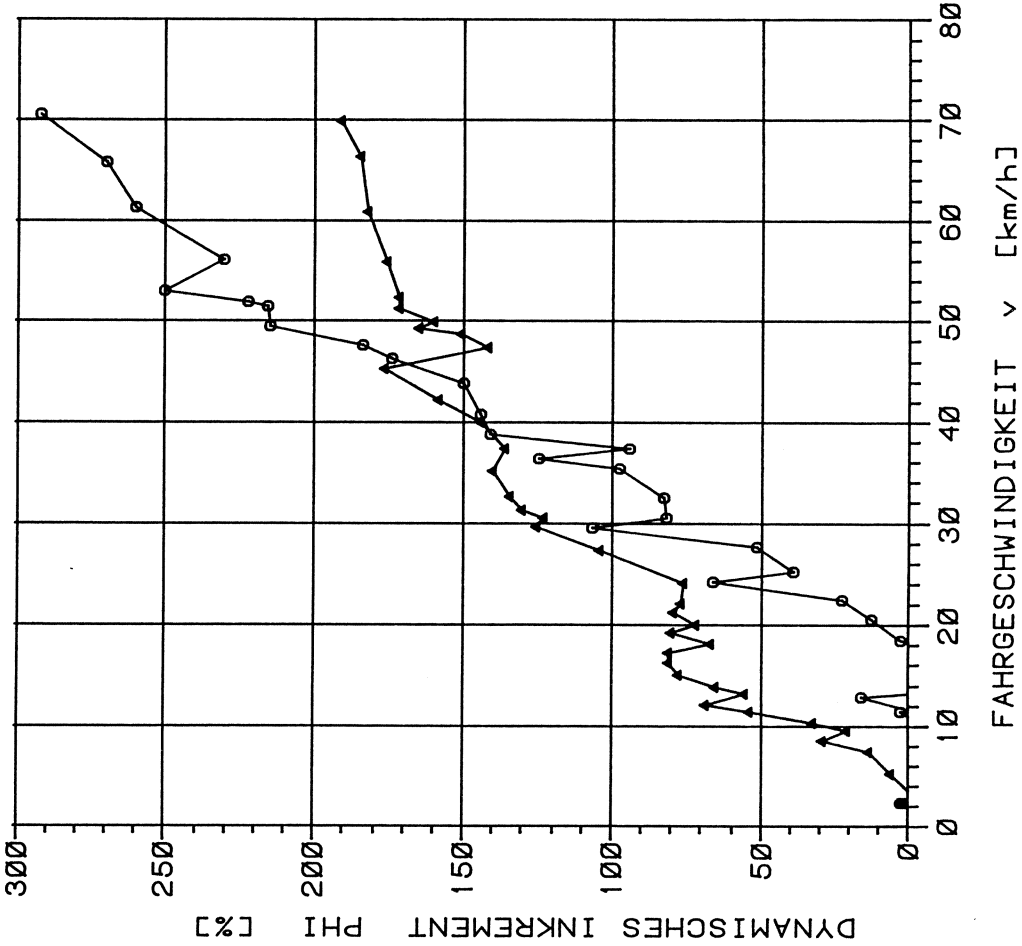
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%] BEI v=[km/h]
○	DMS 52 25R 10 AmA	-24.16 MI	93.27 12.9
▲	DMS 52 25R 6 AmA	-24.16 MI	75.51 14.1



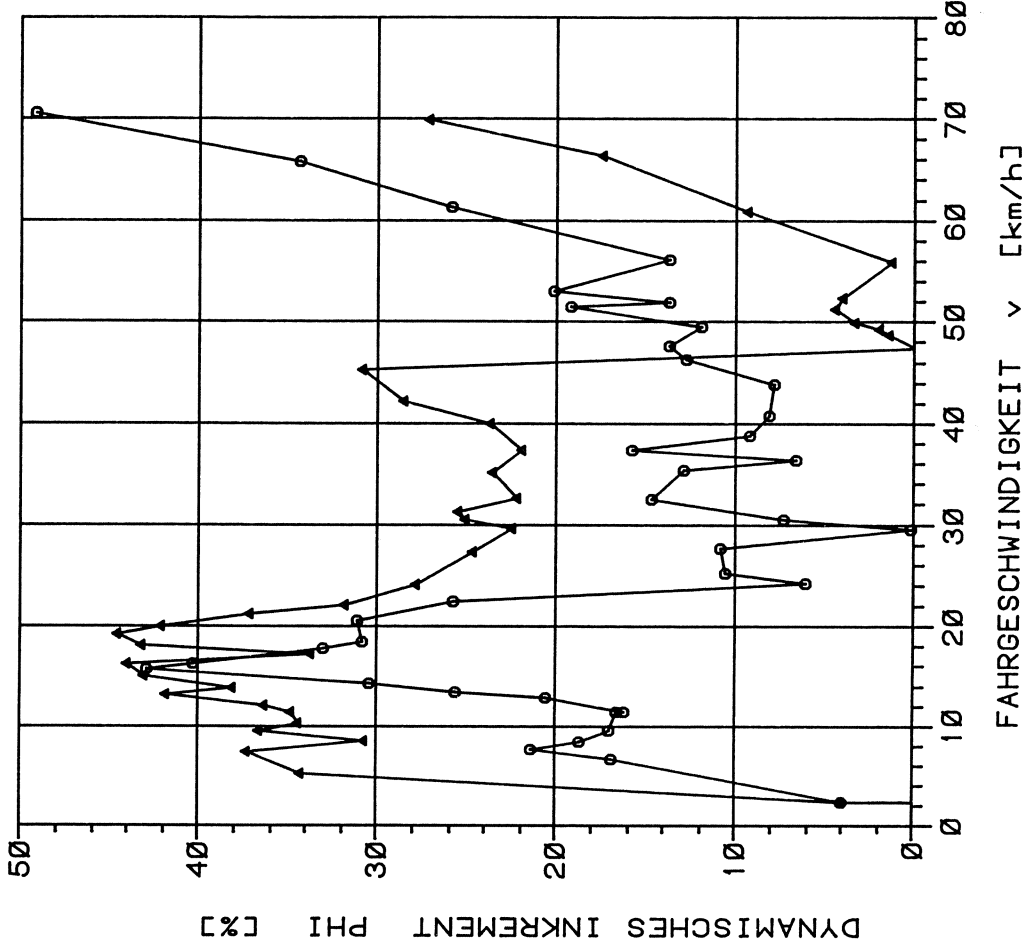
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 42R 10 AmA	10.96 MI	291.69	70.6
▲	DMS 52 42R 6 AmA	10.96 MI	190.79	69.9



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 42R 10 AmA	-22.30 MI	49.21	70.6
▲	DMS 52 42R 6 AmA	-22.30 MI	44.57	19.2

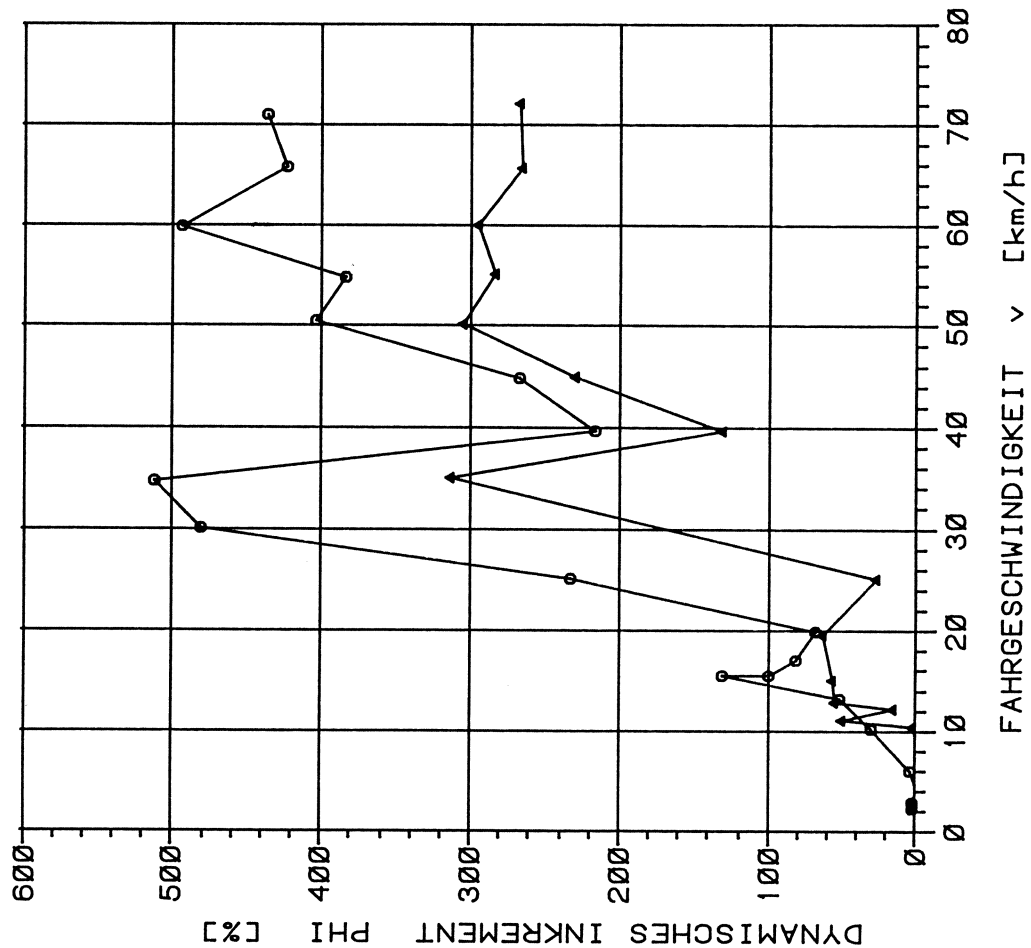


A7.124
A7.123

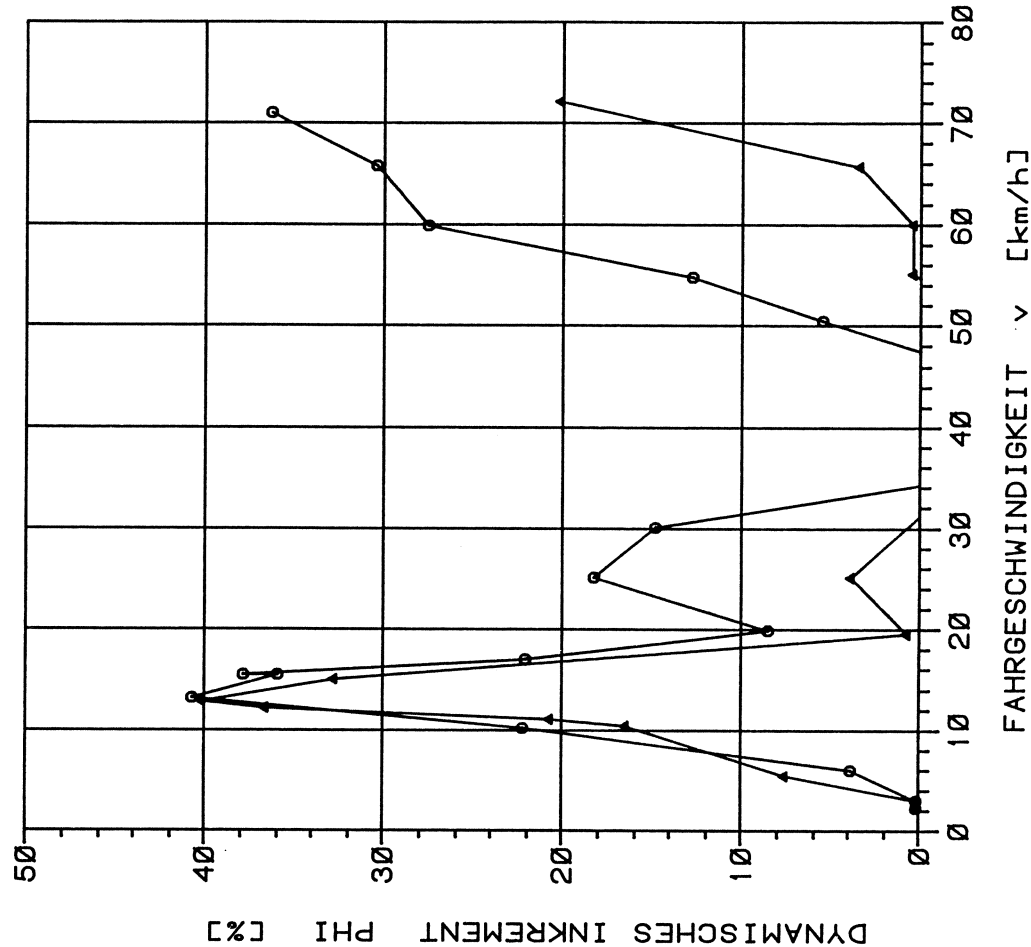
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 52+

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	52R 10 AmA	4.18 MI	511.26
▲	DMS 52	52R 6 AmA	4.18 MI	312.62
				34.6
				34.9

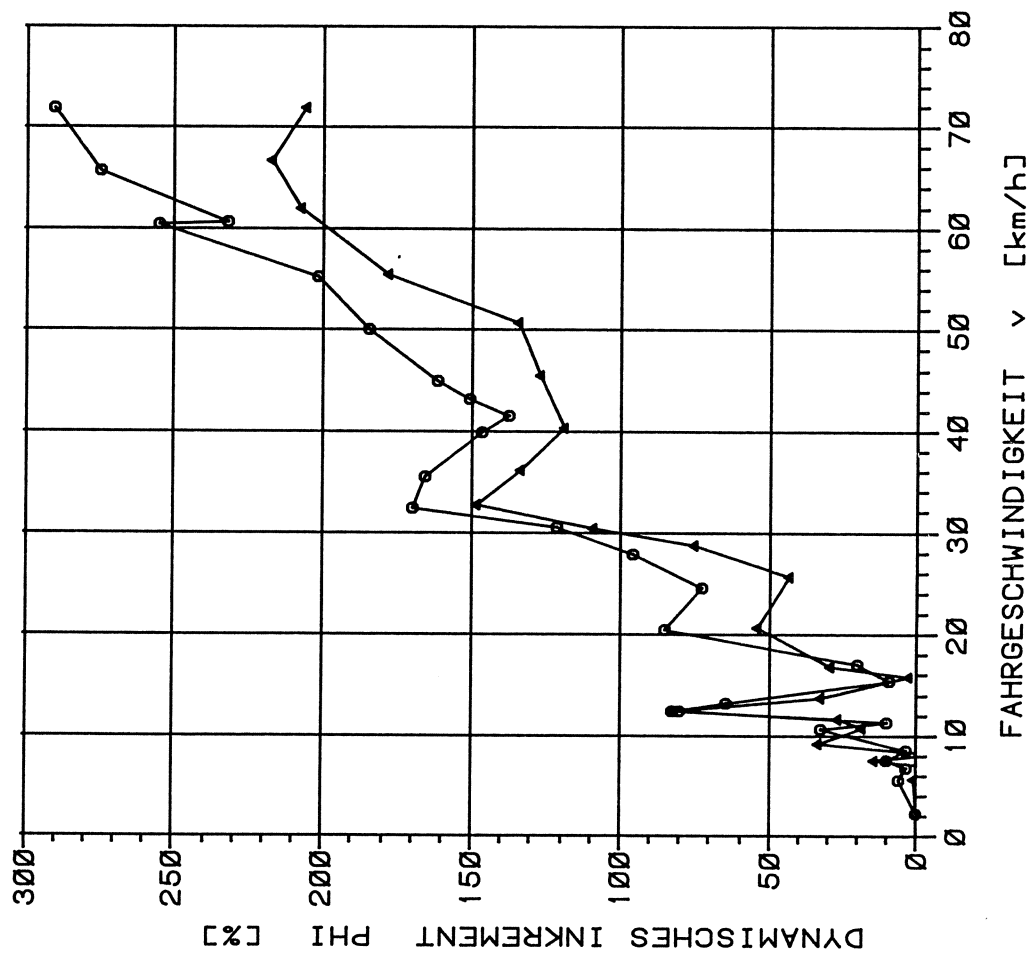


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	52R 10 AmA	-33.69 MI	40.71
▲	DMS 52	52R 6 AmA	-33.69 MI	40.10
				13.2
				12.8



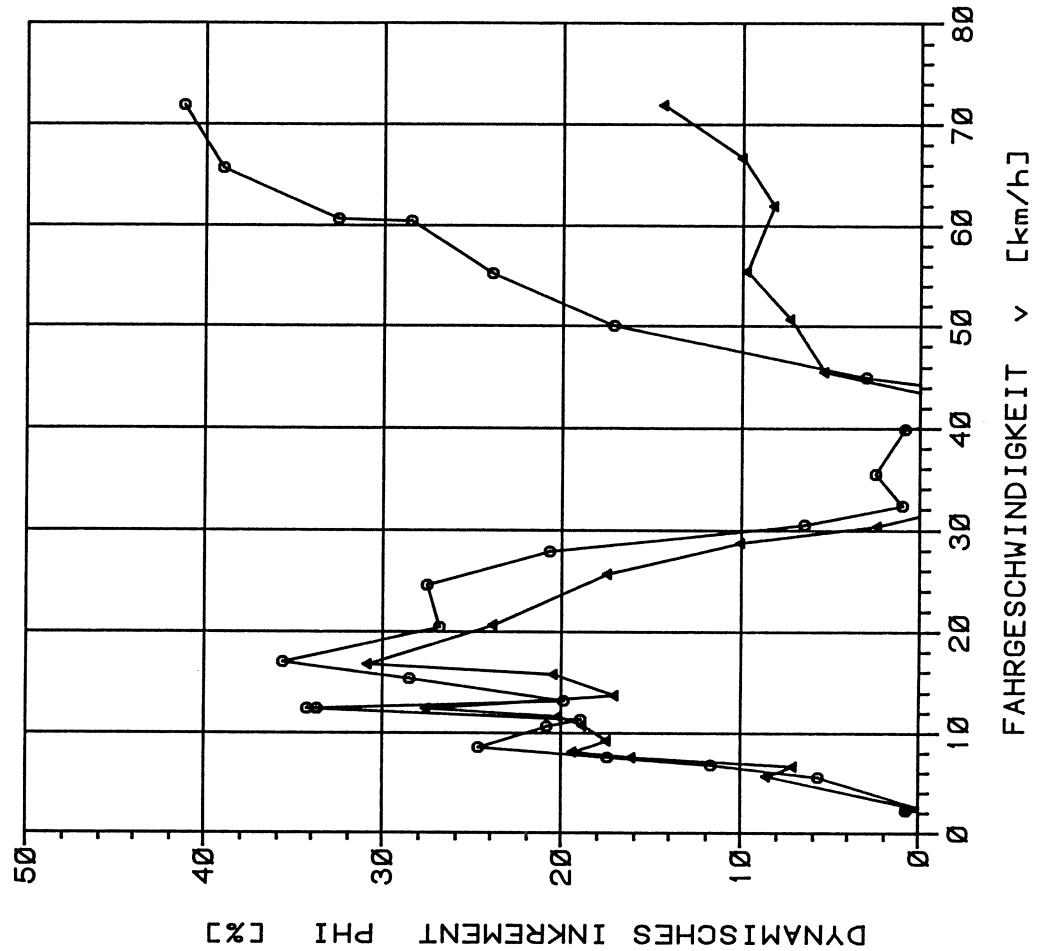
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	71R 10 AmA	10.83 MI	290.34
●	DMS 52	71R 6 AmA	10.83 MI	217.23
				71.8
				66.7



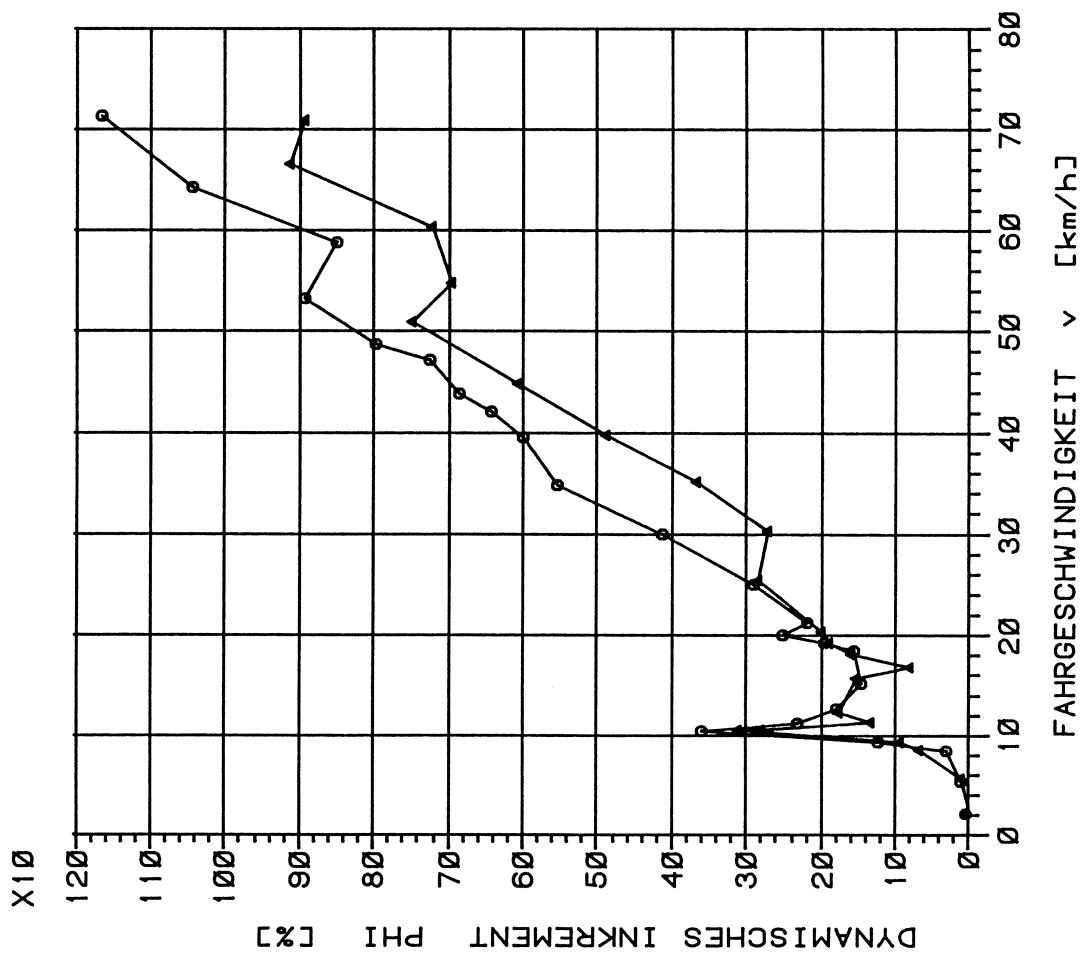
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	71R 10 AmA	-19.51 MI	41.25
●	DMS 52	71R 6 AmA	-19.51 MI	30.82
				71.8
				16.8



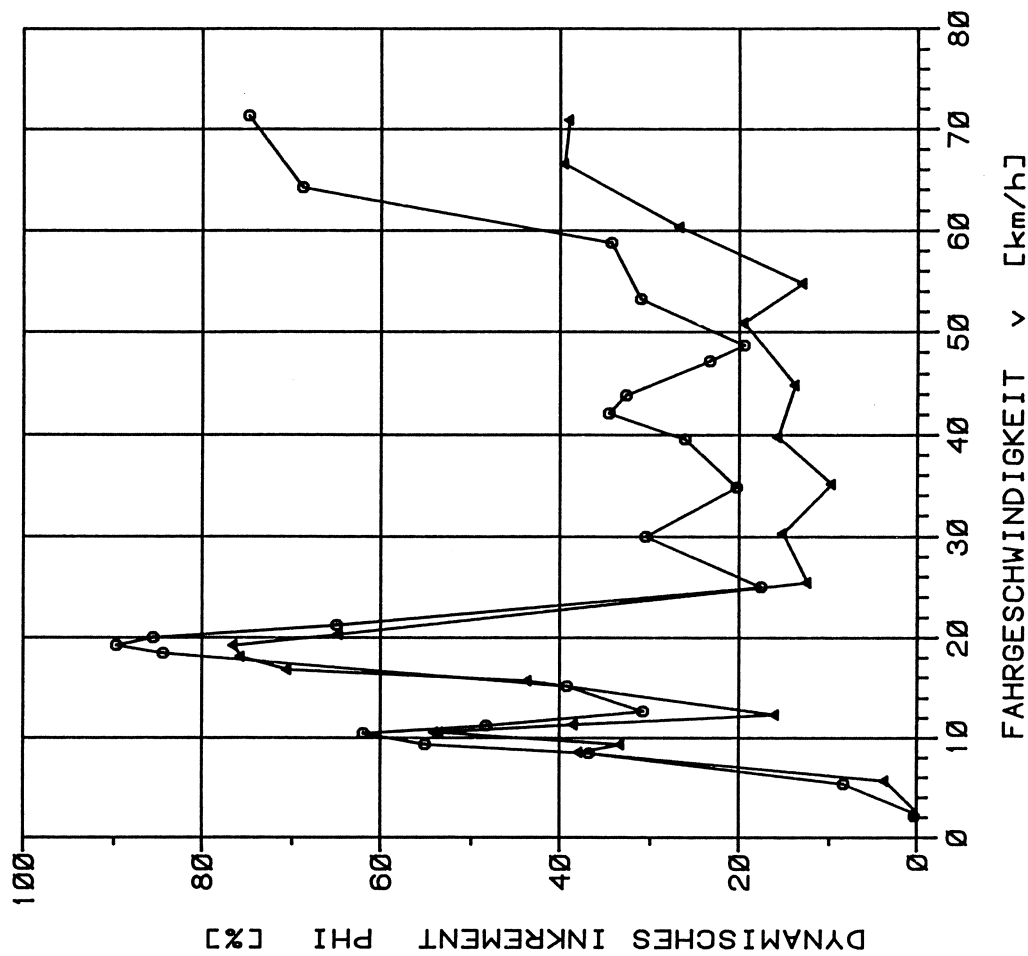
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	74R 10 AmA	3.06 MI	1164.68
→	DMS 52	74R 6 AmA	3.06 MI	911.57



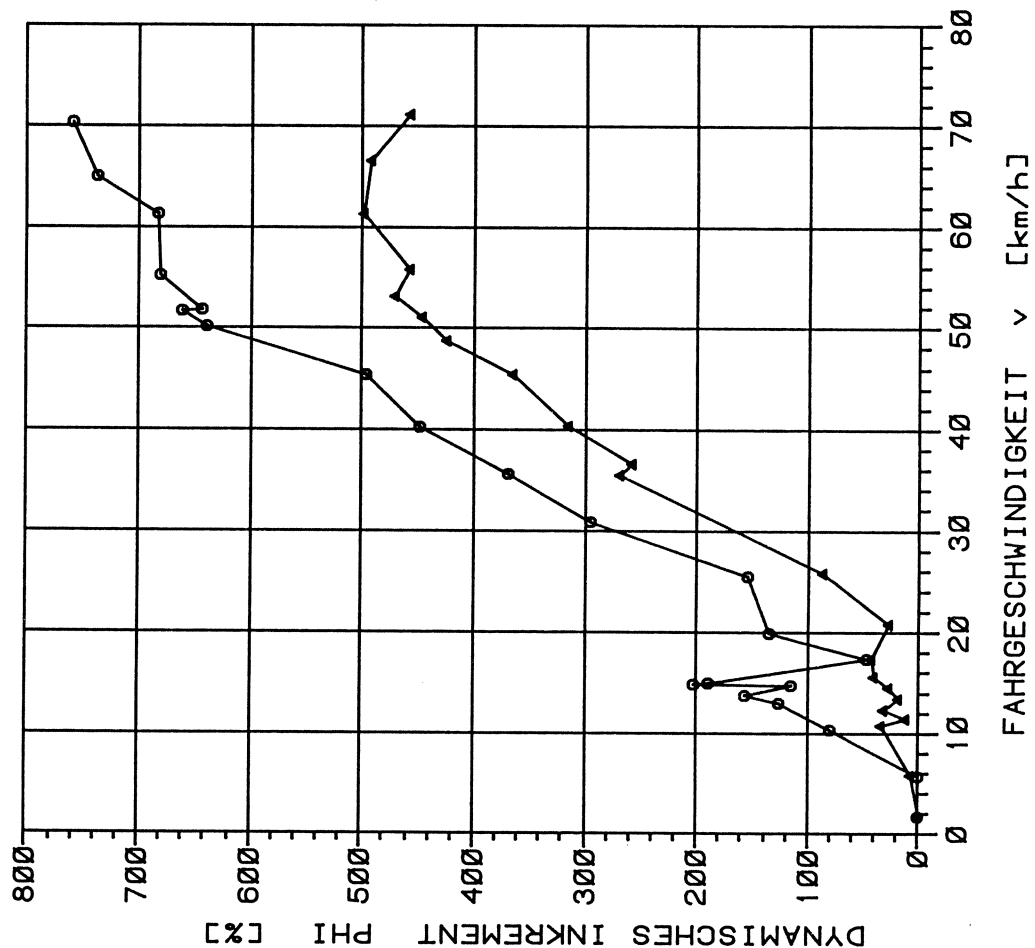
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	74R 10 AmA	-20.61 MI	89.56
→	DMS 52	74R 6 AmA	-20.61 MI	76.32



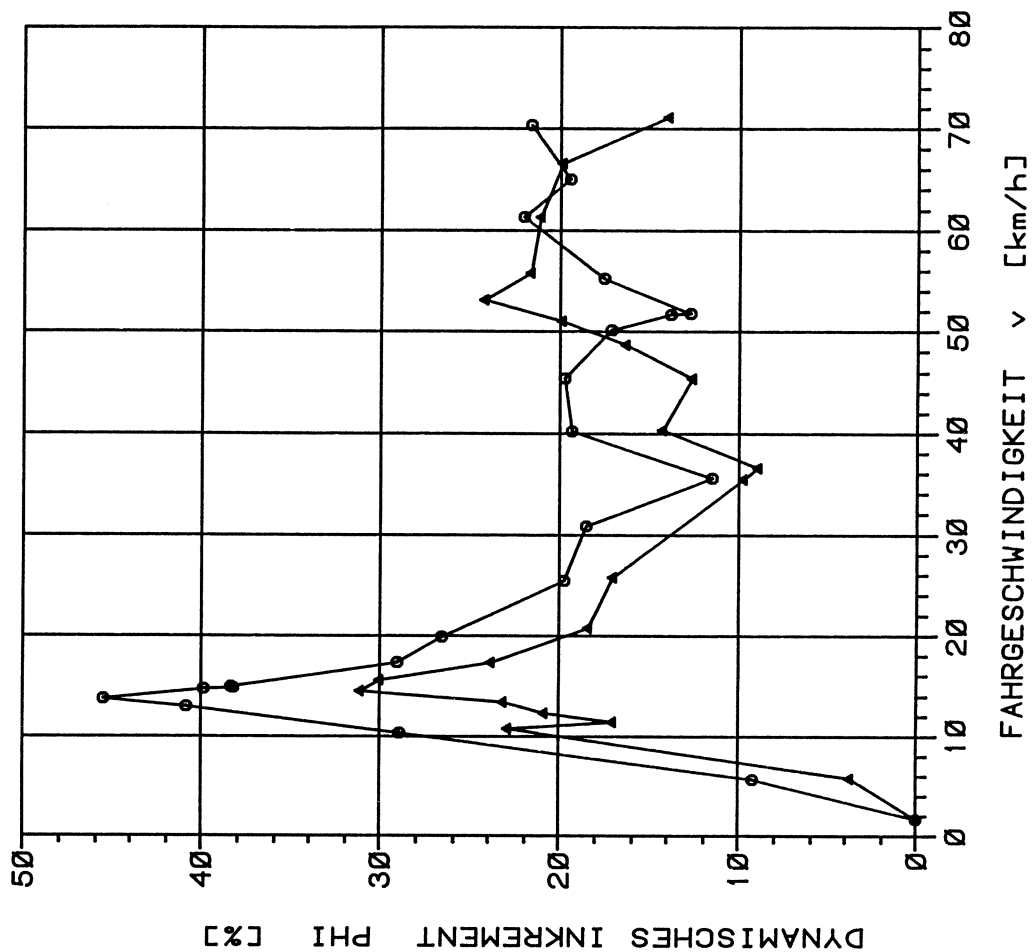
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	76R 10 AmA	3.63 MI	70.3
▲	DMS 52	76R 6 AmA	3.63 MI	61.3



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52	76R 10 AmA	-23.31 MI	45.50
▲	DMS 52	76R 6 AmA	-23.31 MI	31.11

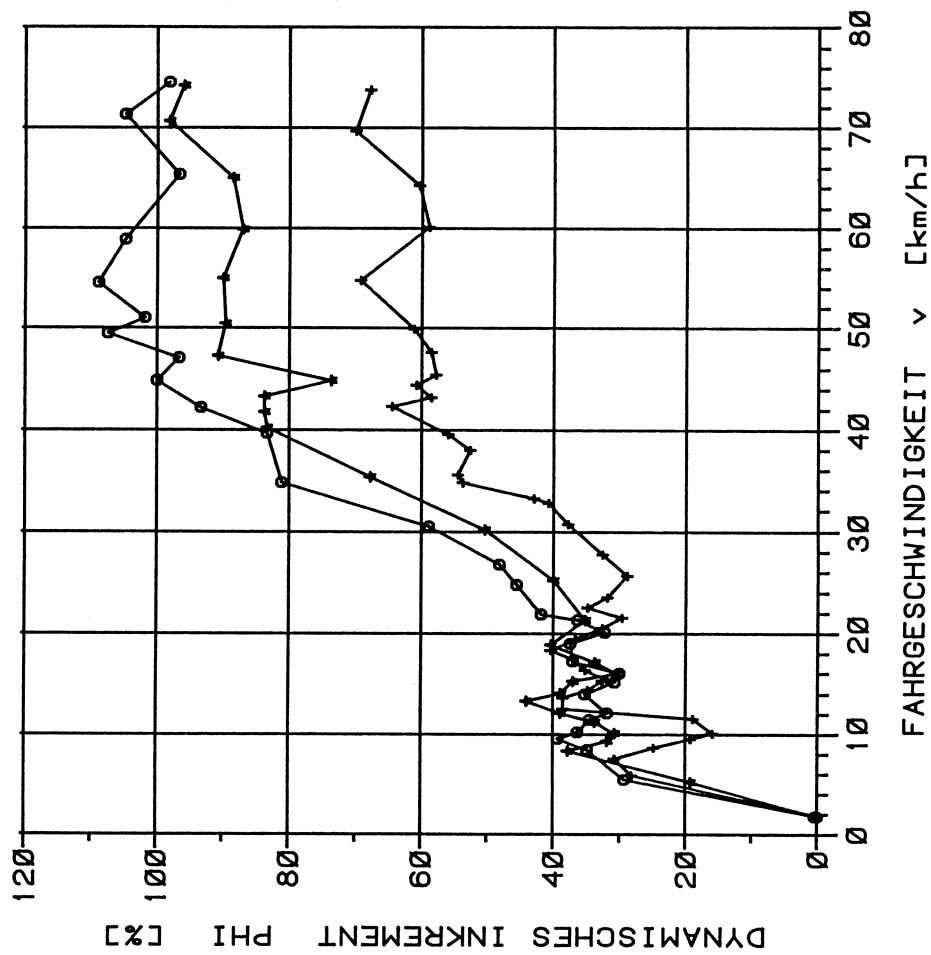


A7.132
A7.131

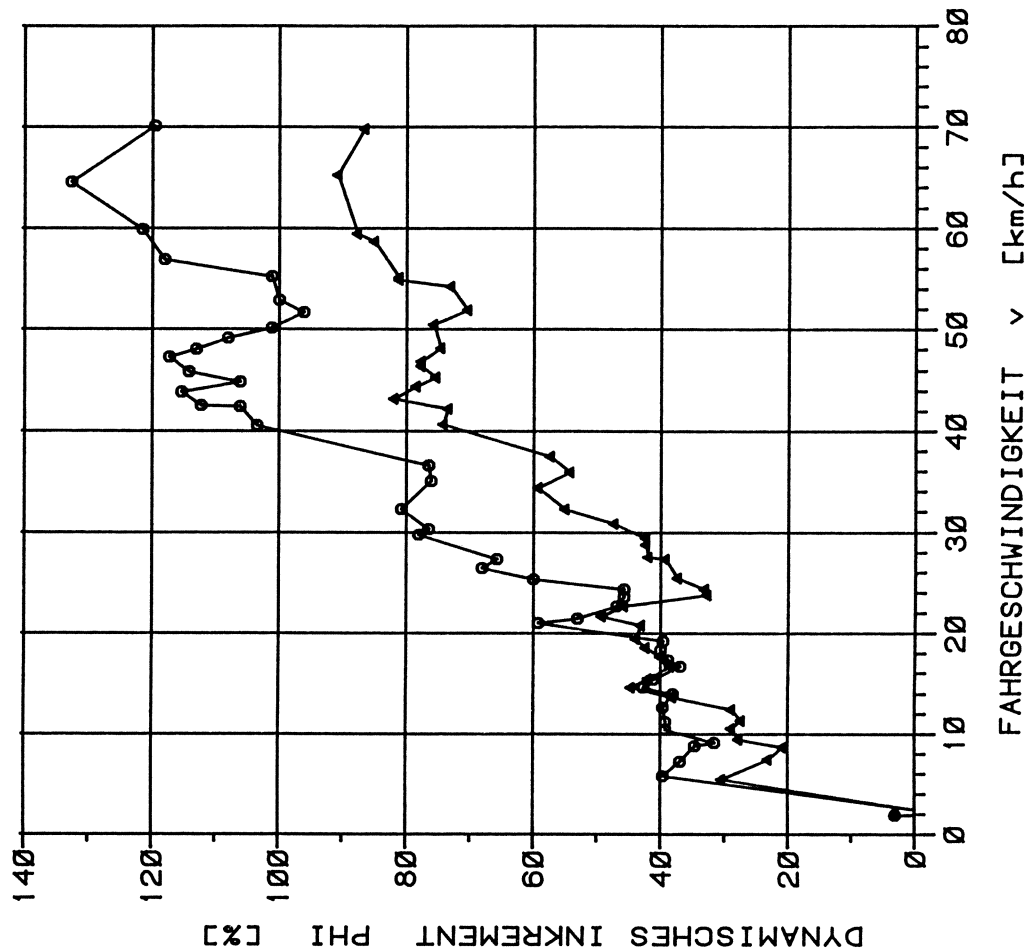
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 11R, DMS 22

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 12R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	11R 10 KmA	16.38 MI	108.63	54.5
+	11R 8 KmA	16.38 MI	97.69	70.6
+	11R 6 KmA	16.38 MI	69.64	69.6

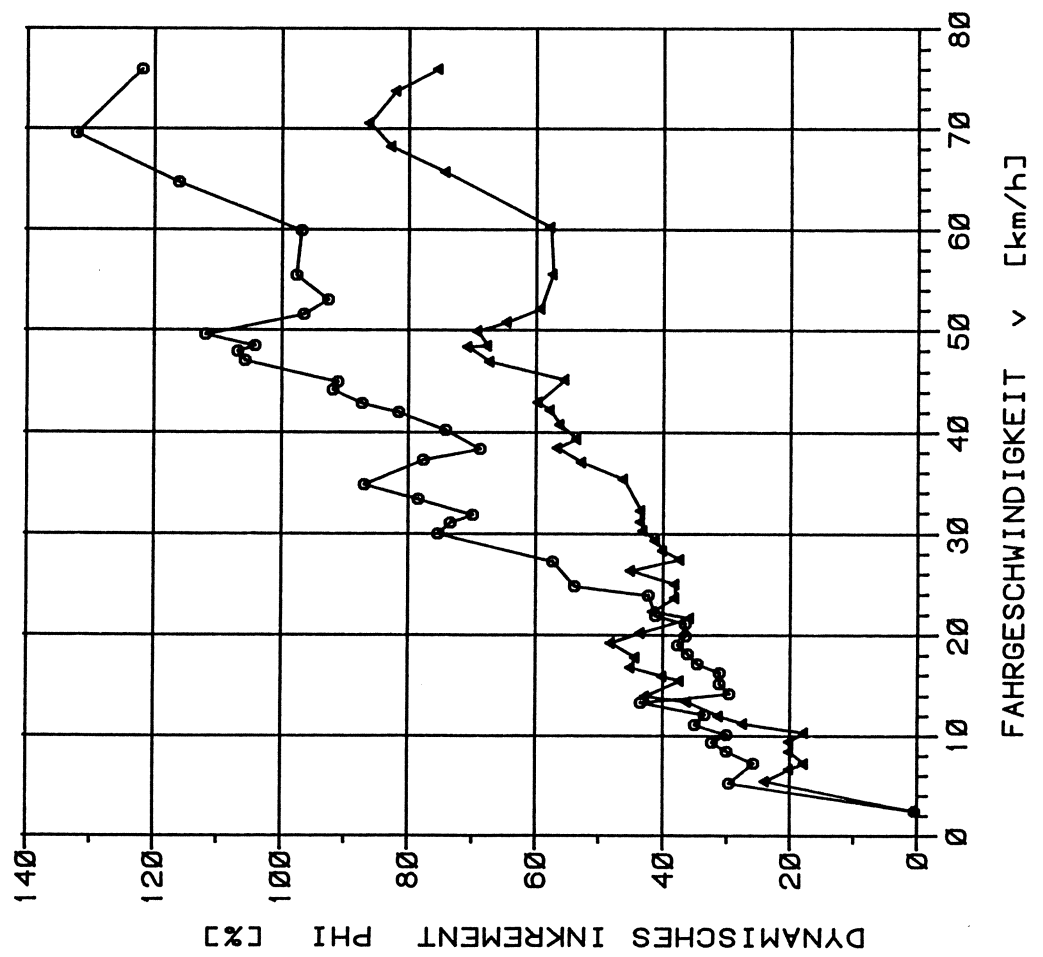


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	12R 10 KmA	16.67 MI	132.17	64.5
+	12R 6 KmA	16.67 MI	90.55	65.3



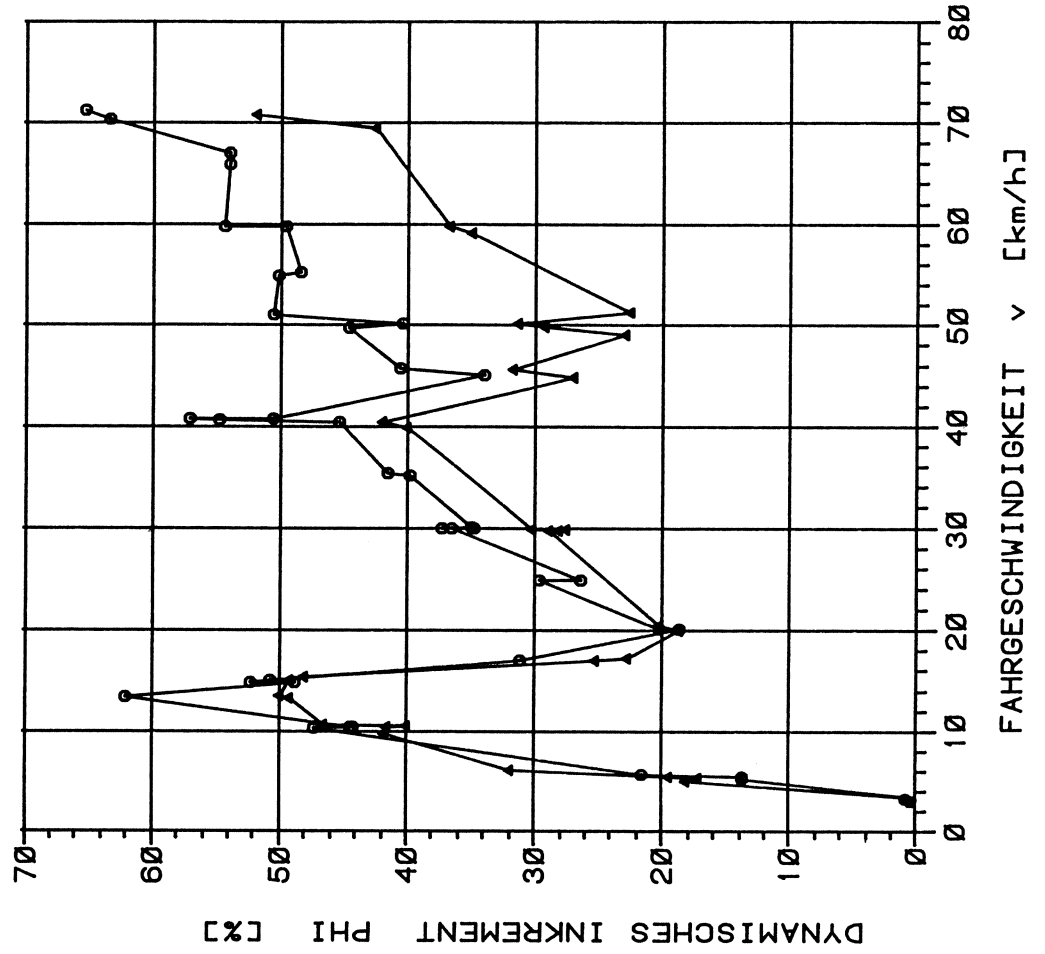
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 13R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	13R 10 KmA	17.04 MI	69.6
▲	DMS 22	13R 6 KmA	17.04 MI	70.6



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 20R, DMS 22

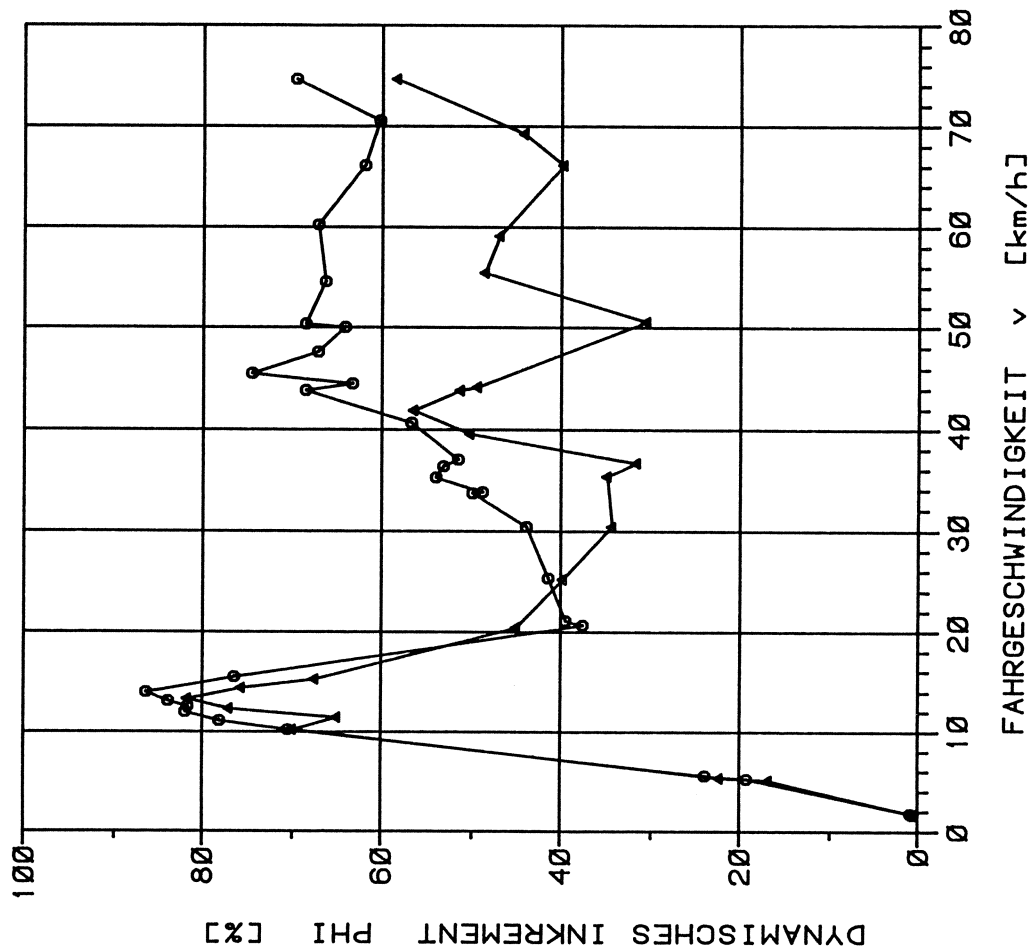
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	20R 10 KmA	26.69 MI	65.20
▲	DMS 22	20R 6 KmA	26.69 MI	70.7



A7.136
A7.135

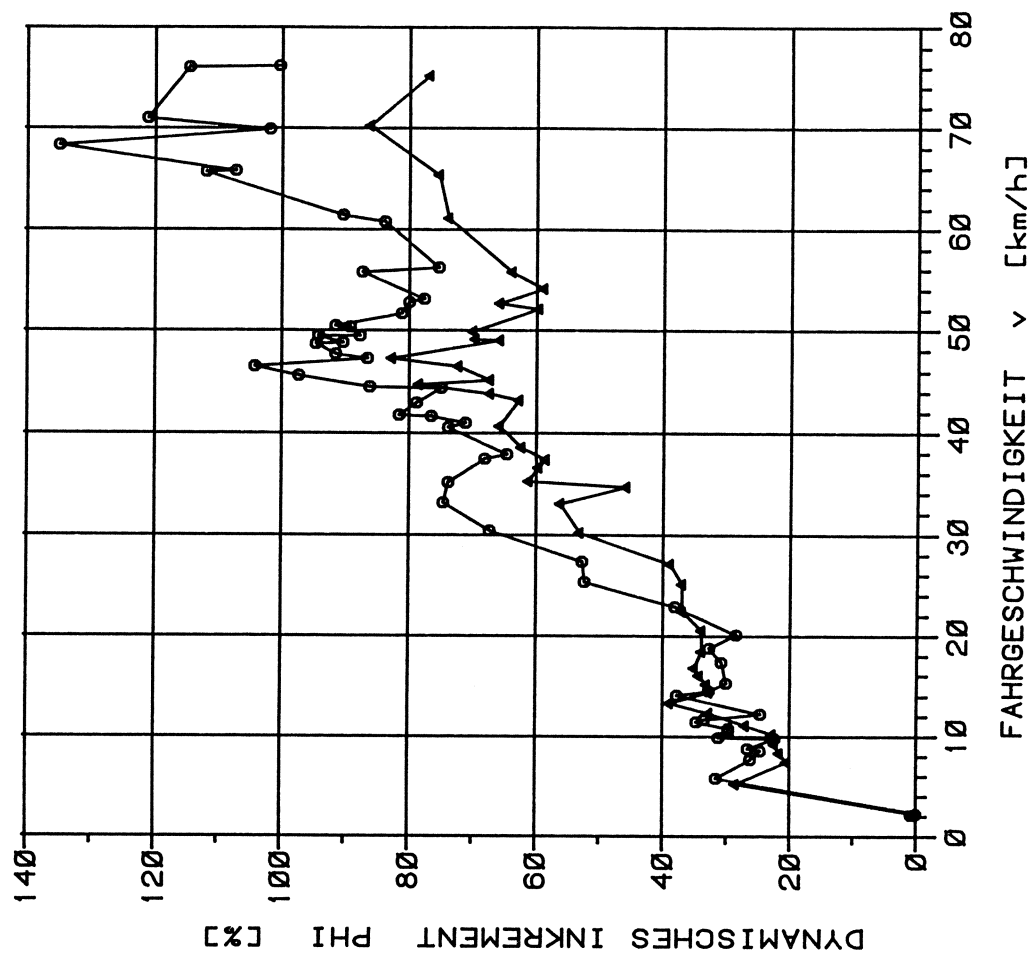
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 25R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	25R 10 KmA	22.04 MI	86.22
▲	DMS 22	25R 6 KmA	22.04 MI	81.65
				13.9
				13.3



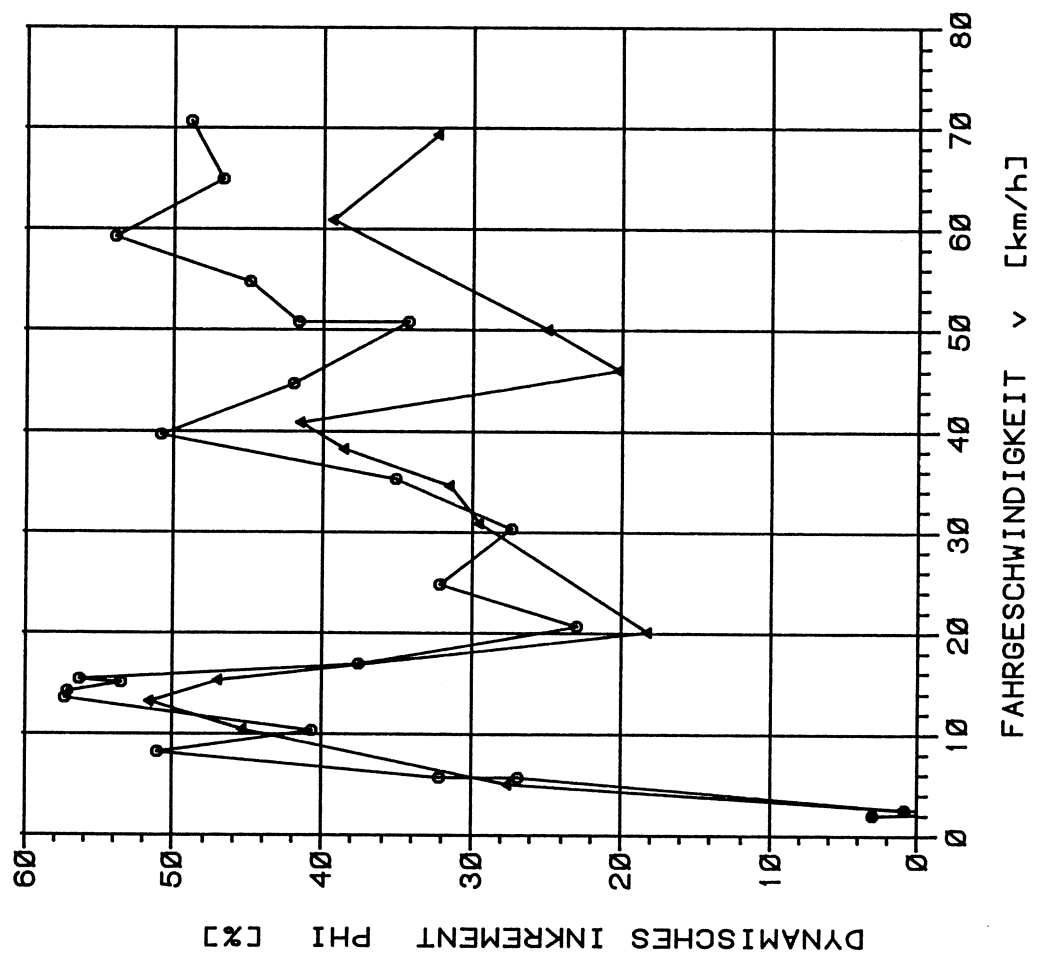
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 42R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	42R 10 KmA	18.52 MI	134.54
▲	DMS 22	42R 6 KmA	18.52 MI	85.97
				68.3
				70.1



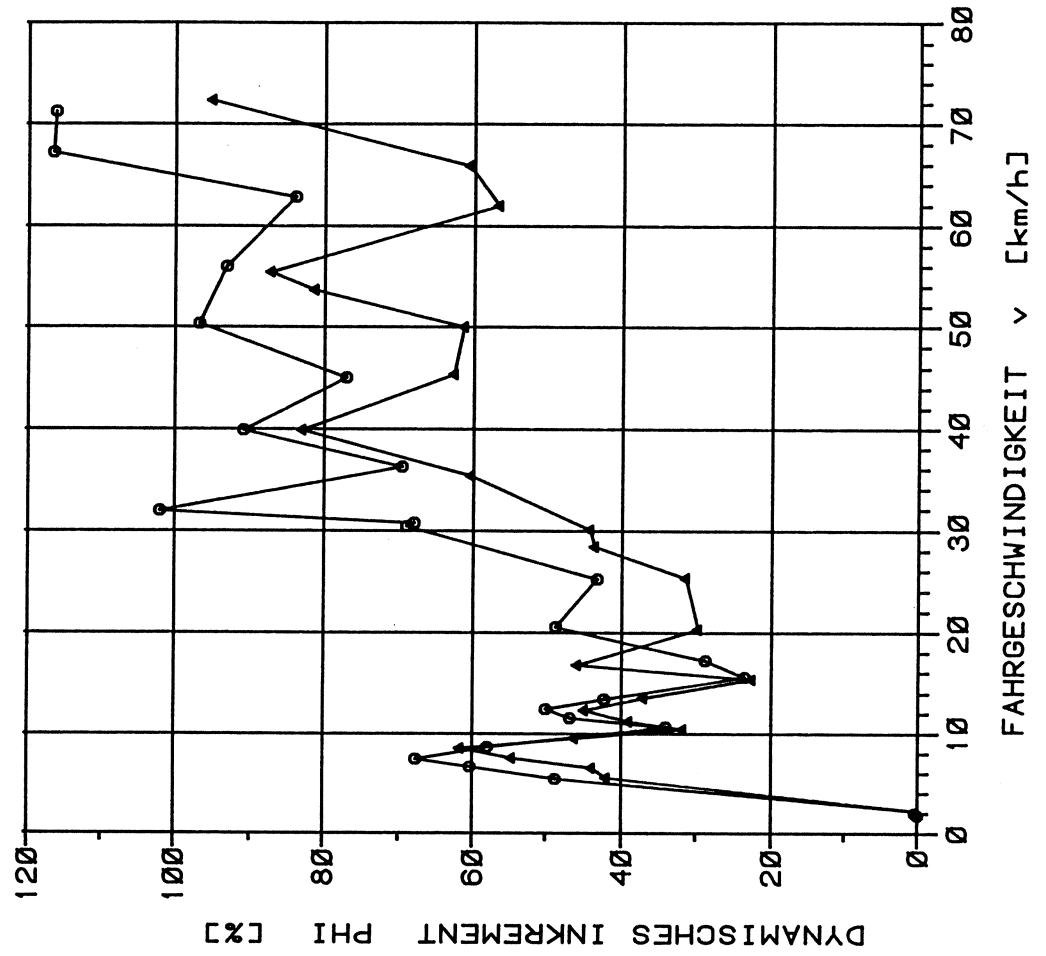
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 52R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	DMS 22 52R 10 KmA	28.45 MI	57.28	13.4
▲—	DMS 22 52R 6 KmA	28.45 MI	51.46	13.2



VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 71R, DMS 22

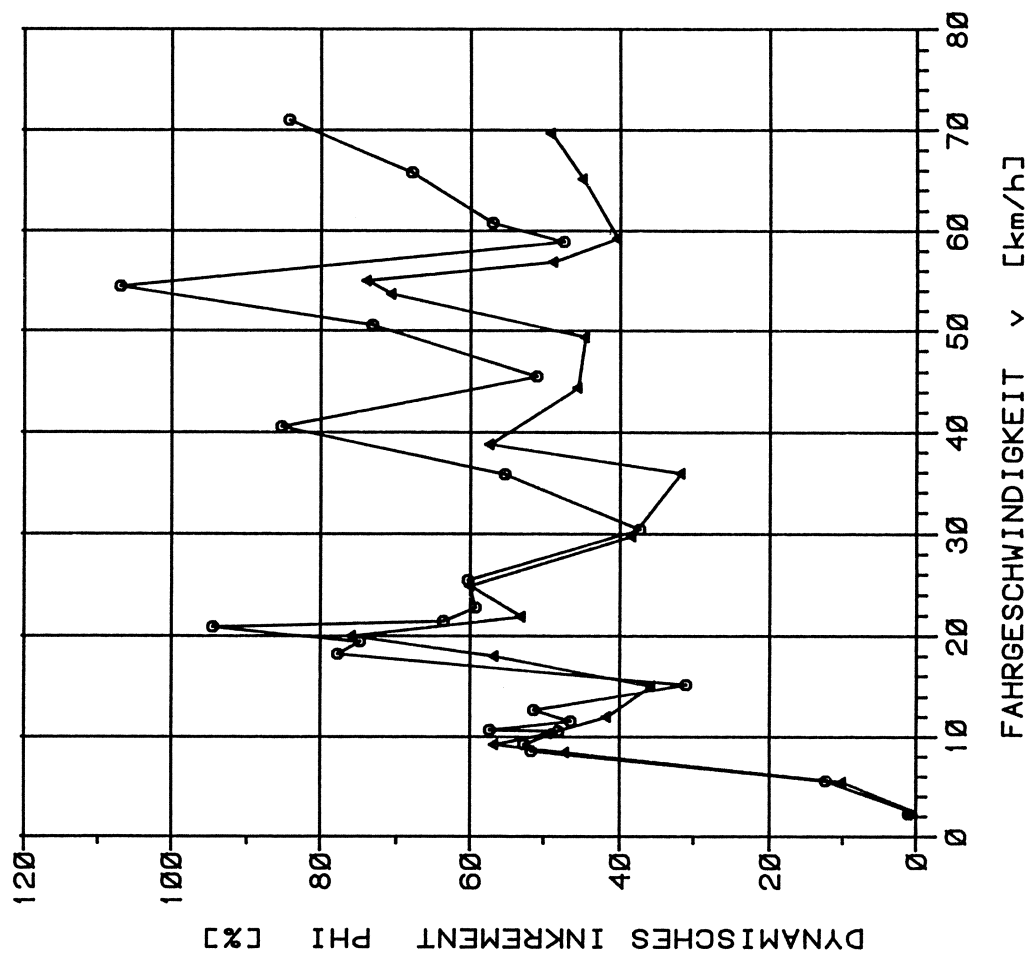
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	DMS 22 71R 10 KmA	16.84 MI	116.35	67.2
▲—	DMS 22 71R 6 KmA	16.84 MI	94.90	72.3



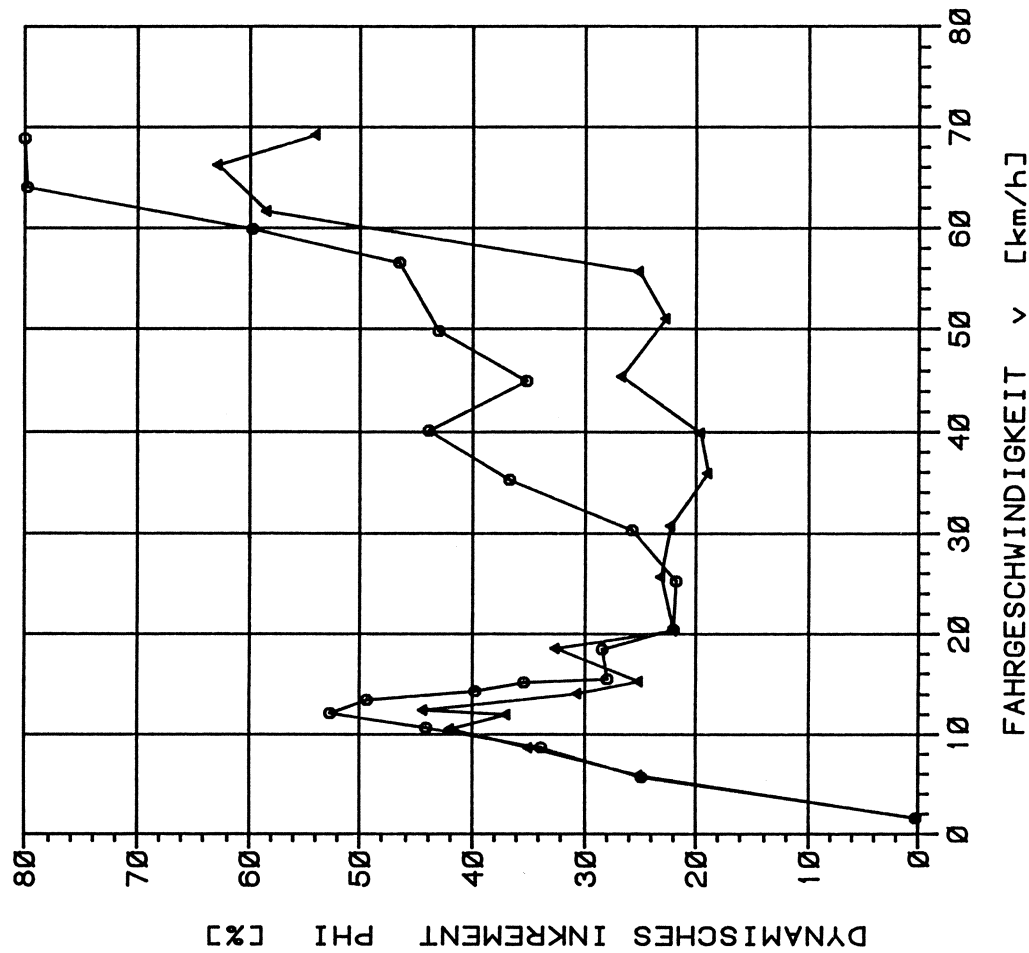
VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 74R, DMS 22

VAR. REIFENDRUCK, FAHRZEUG 76R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	74R 10 KmA	19.22 MI	106.70	54.5
▲	74R 6 KmA	19.22 MI	75.58	20.0



INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	76R 10 KmA	24.65 MI	79.96	68.9
▲	76R 6 KmA	24.65 MI	62.78	66.2



Anhang 8

Die Reaktion der Brücke: $\phi(v)$ -Funktionen in Abhängigkeit von der Fahrbahnoberfläche (Reifendruck 10 bar)

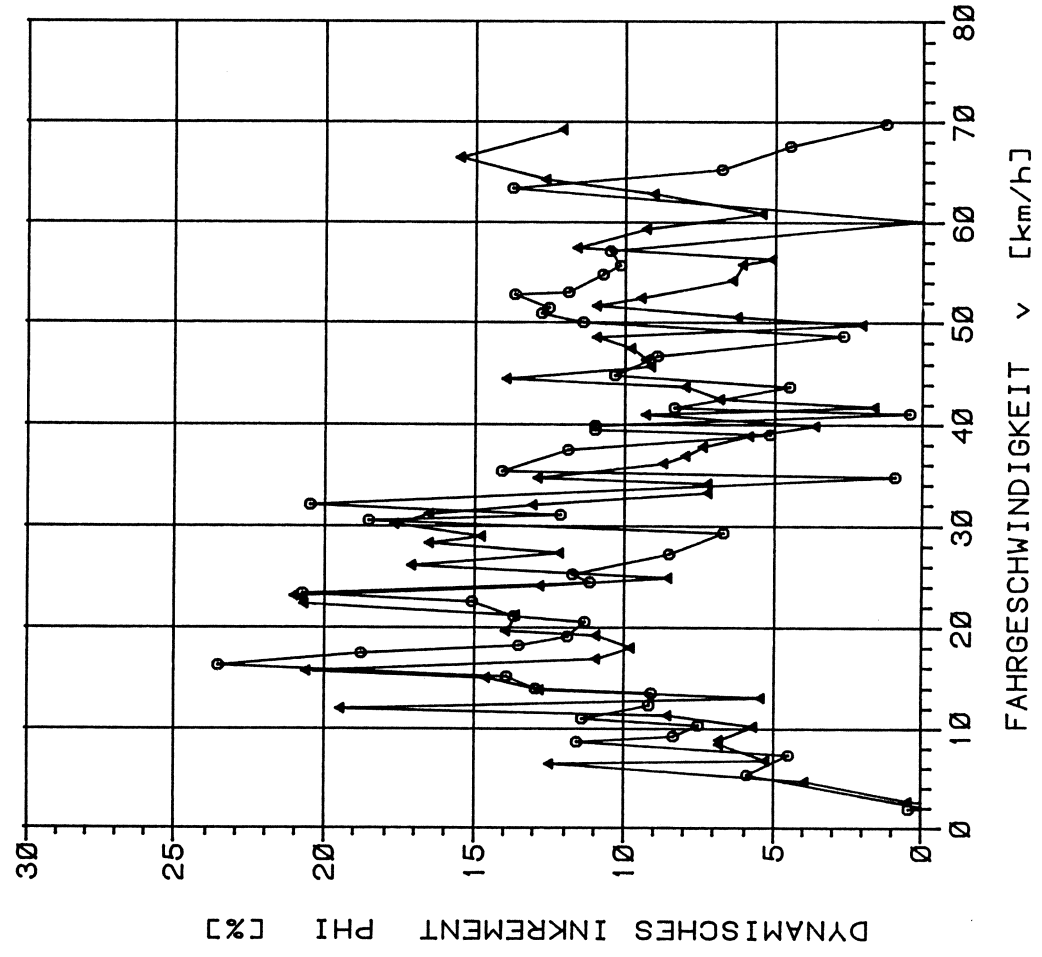
Anhang zum Berichtteil A, Seite 150 ff,
Abschnitt 3.77,
"Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche".

Der Verlauf des dynamischen Inkrementes über die Fahrgeschwindigkeit ist für vier Versuchsfahrzeuge und die Fahrbahnbeläge A und B (verbesserte Ebenheit) grafisch dargestellt. Zudem sind der statische Vergleichswert (ASTAT) sowie das maximale dynamische Inkrement (PHIMAX) und die zugehörige Fahrgeschwindigkeit v für jede dargestellte Versuchsserie angegeben.

Die Seiten A8.1 bis A8.24 enthalten die Resultate für Durchbiegungen, A8.25 bis A8.39 jene für Dehnungen, in beiden Fällen für Fahrten ohne Brett. Die Resultate für Fahrten mit Brett sind für Durchbiegungen auf den Seiten A8.40 bis A8.47, für Dehnungen auf den Seiten A8.48 bis A8.63 gegeben.

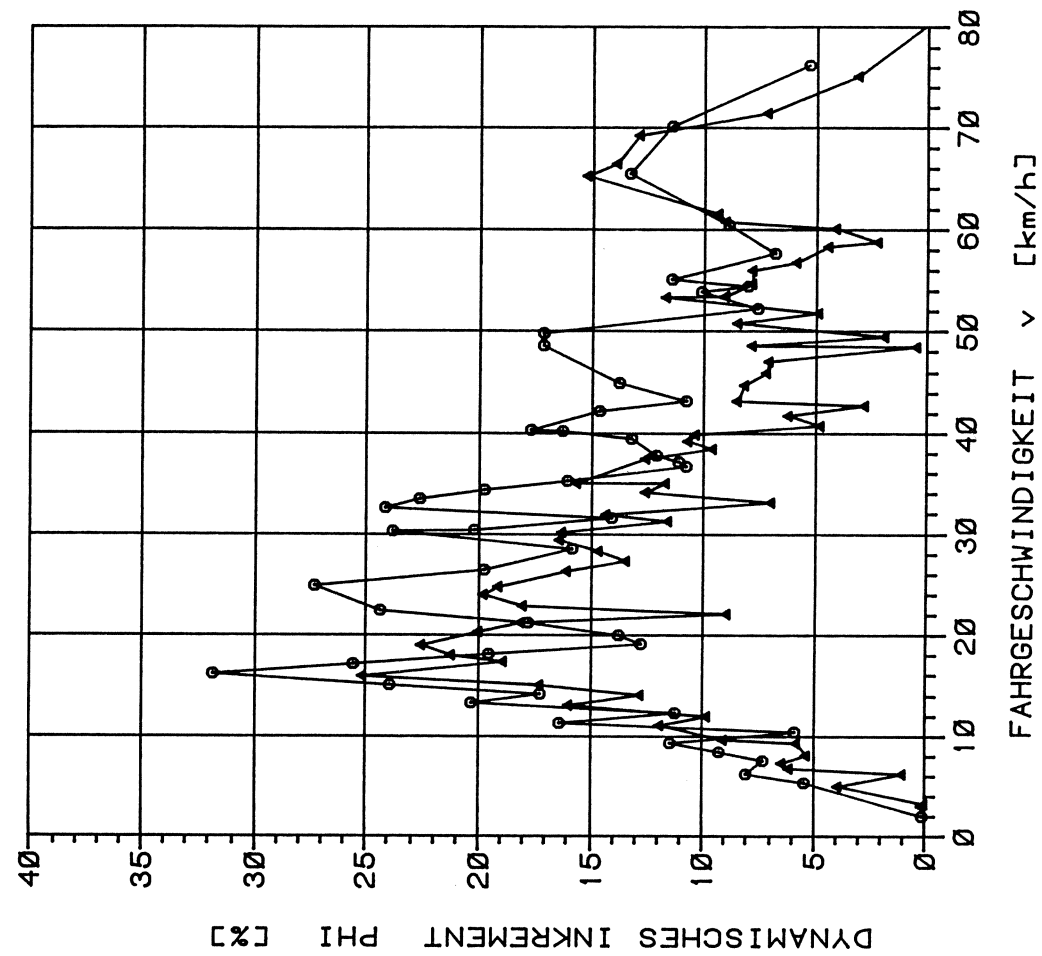
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82 12R 10 AoA	-.72 MM	23.51	16.3
▲	WG 82 12R 10 AoB	-.69 MM	20.96	23.1



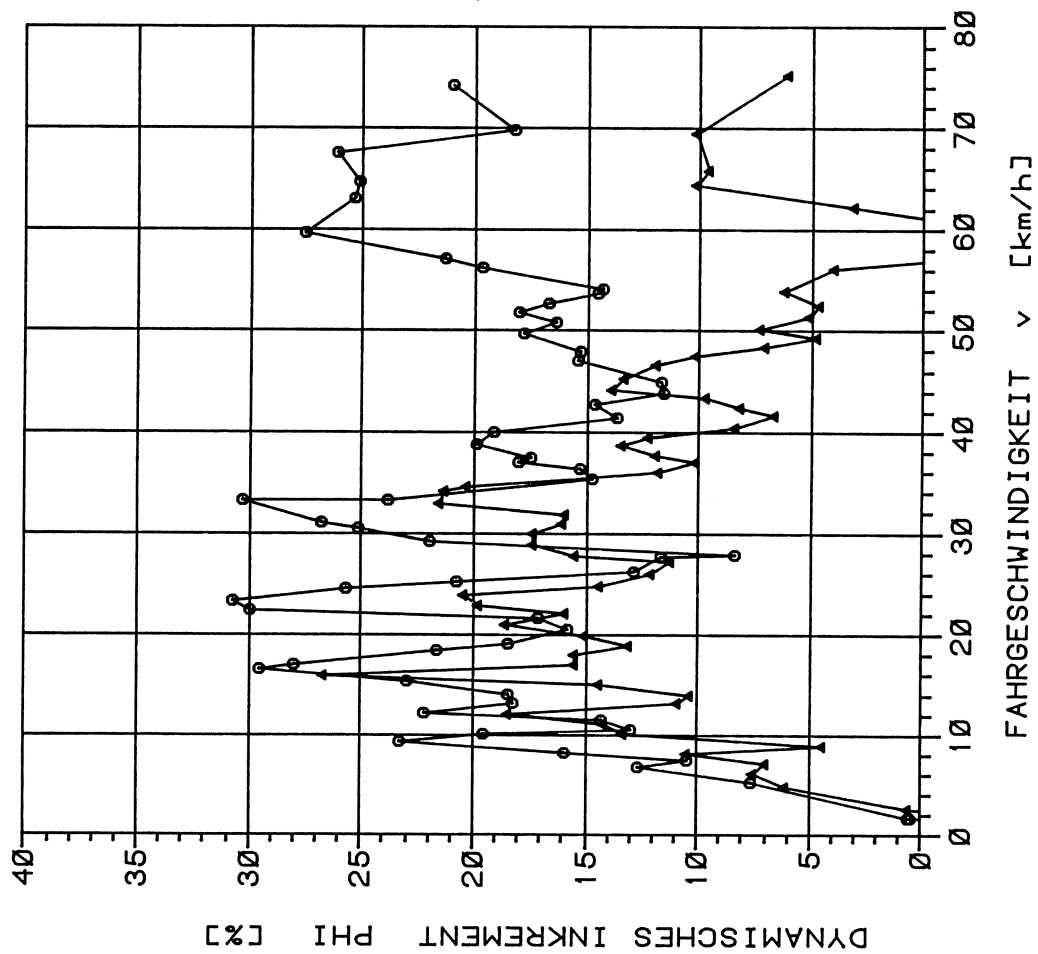
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 82 13R 10 AoA	-.68 MM	31.81	16.2
▲	WG 82 13R 10 AoB	-.69 MM	25.07	15.9



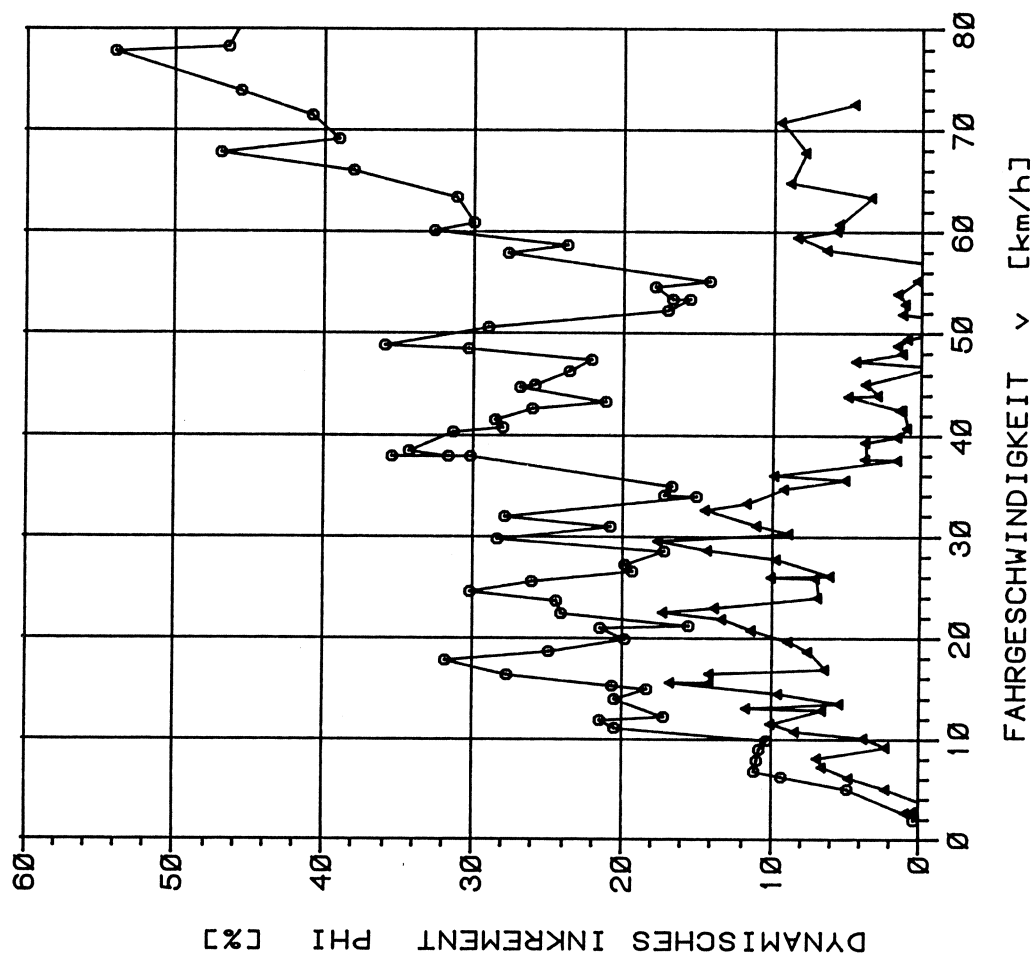
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 82	14R 10 AoA	-0.67 MM	30.65	23.3
WG 82	14R 10 AoB	-0.68 MM	26.58	15.9



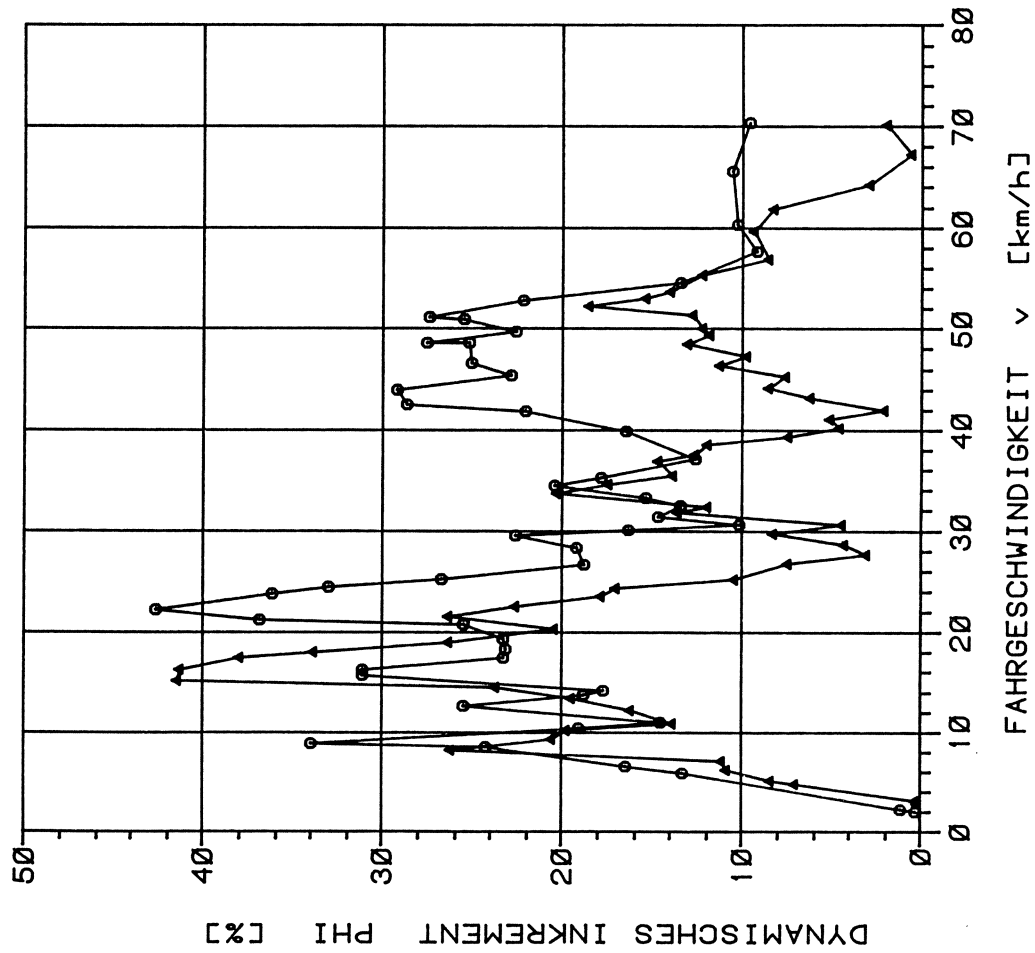
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG 82

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 82	21R 10 AoA	-1.12 MM	53.96	77.8
WG 82	21R 10 AoB	-1.13 MM	17.38	29.4



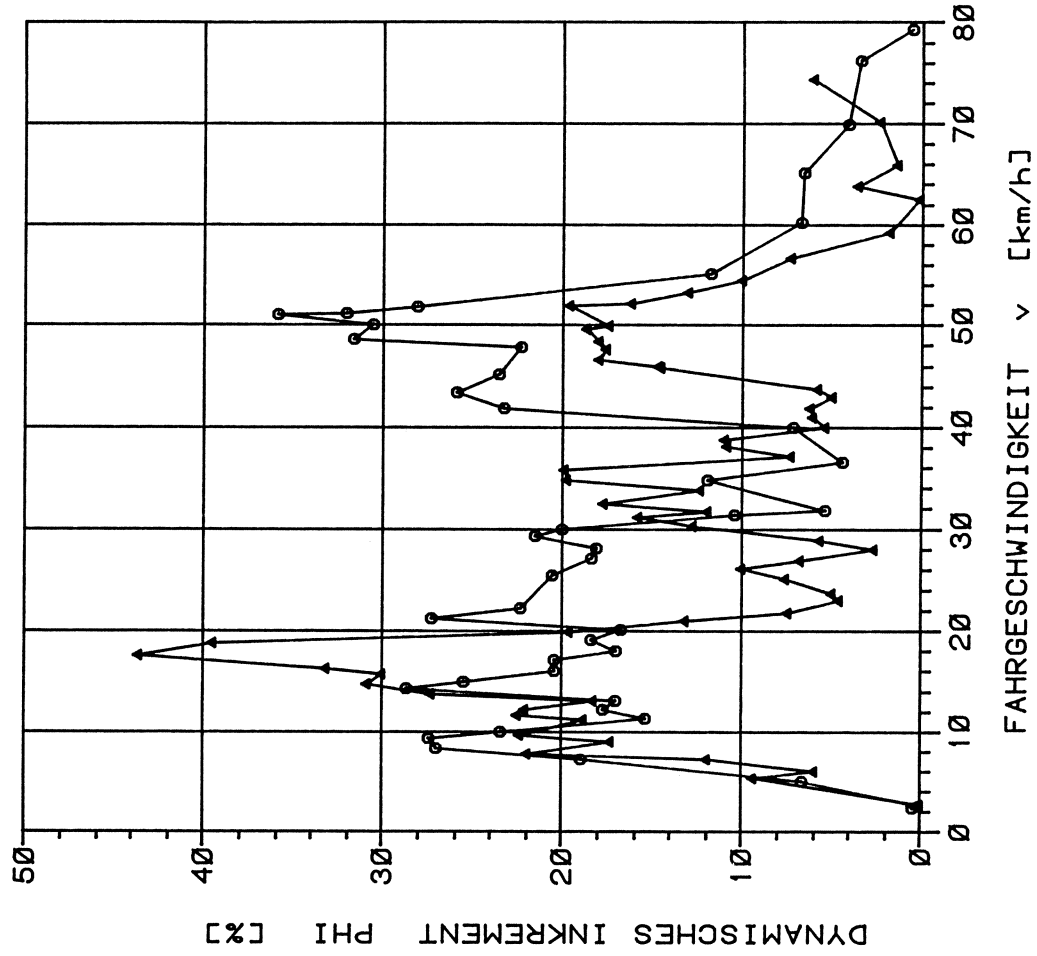
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	12R 10 KoA	-1.74 MM	42.54
○	WG Ø1	12R 10 KoB	-1.76 MM	41.36
○	WG Ø1			22.1
○	WG Ø1			15.2



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG Ø1

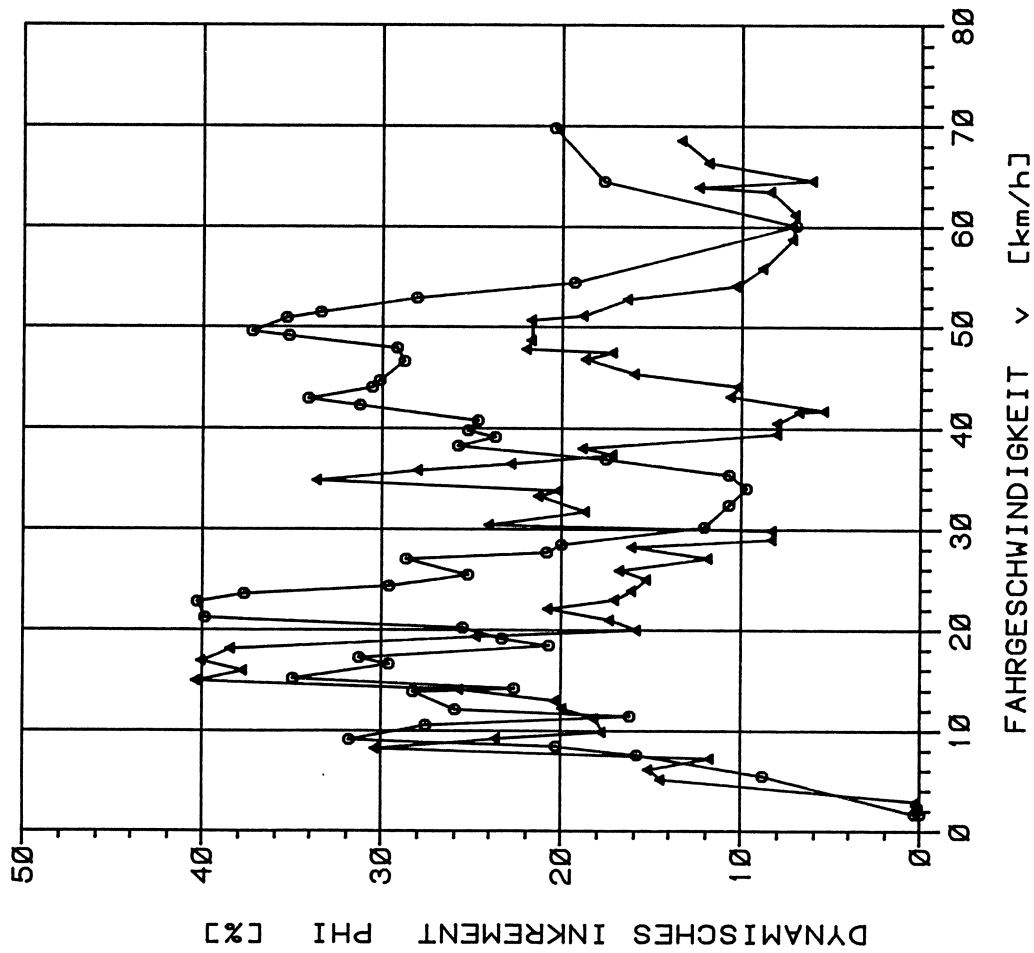
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	13R 10 KoA	-1.79 MM	35.92
○	WG Ø1	13R 10 KoB	-1.77 MM	43.53
○	WG Ø1			51.0
○	WG Ø1			17.5



A8.8
A8.7

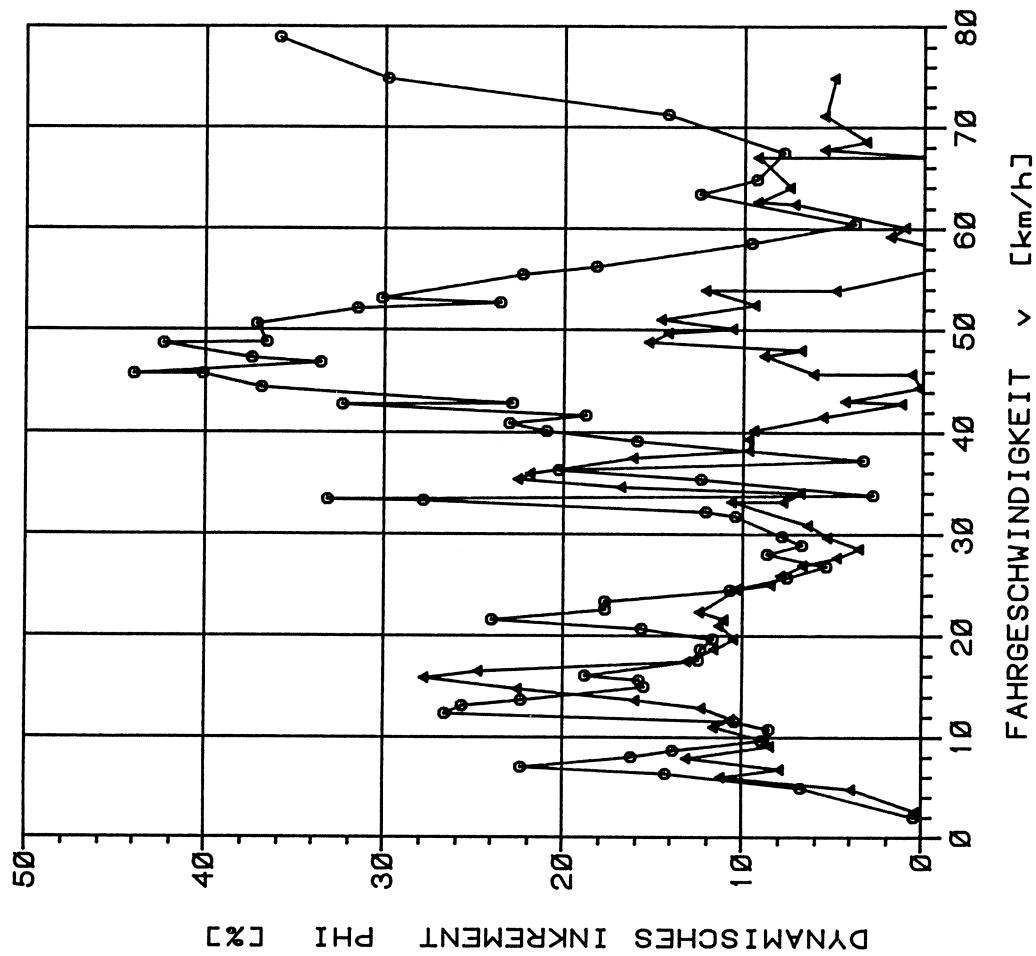
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	14R 10 KoA	-1.68 MM	40.21
▲	WG Ø1	14R 10 KoB	-1.66 MM	40.29
				22.7
				14.9



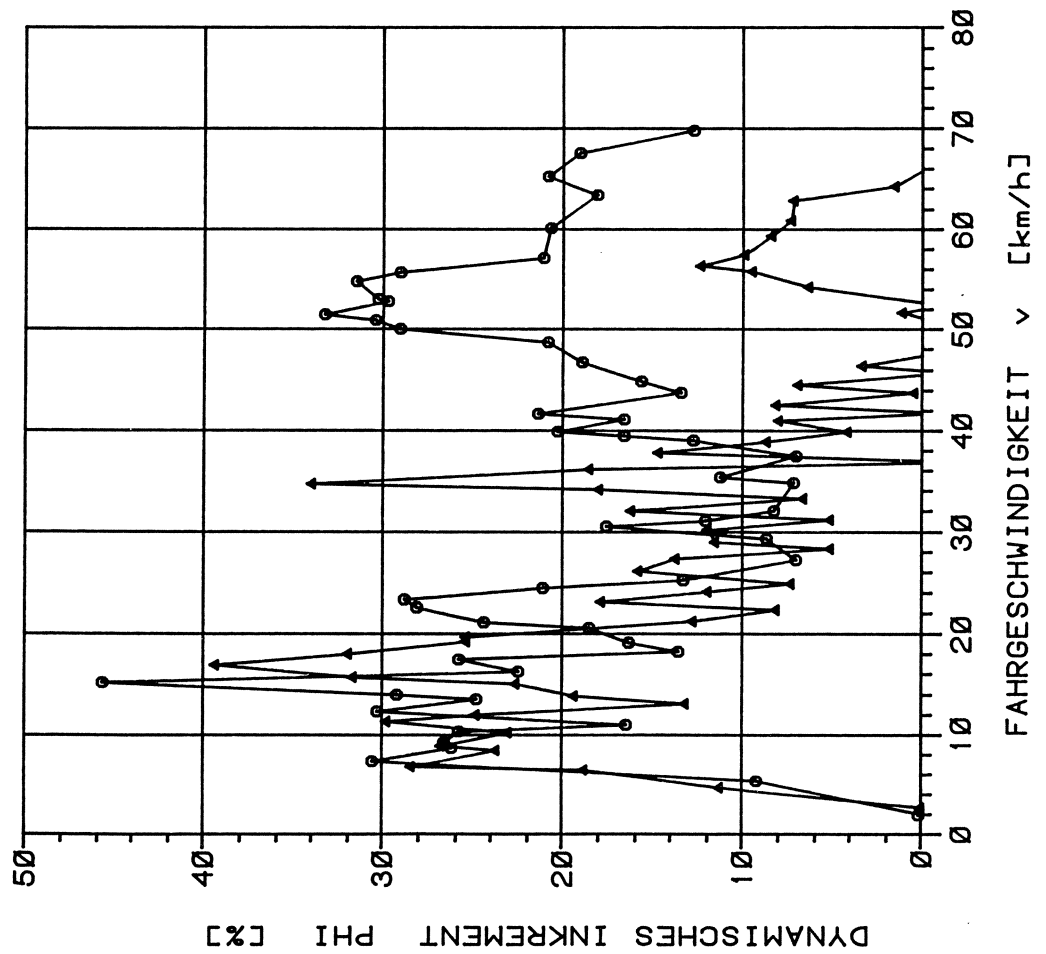
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	21R 10 KoA	-2.84 MM	44.01
▲	WG Ø1	21R 10 KoB	-2.84 MM	27.63
				45.7
				15.8



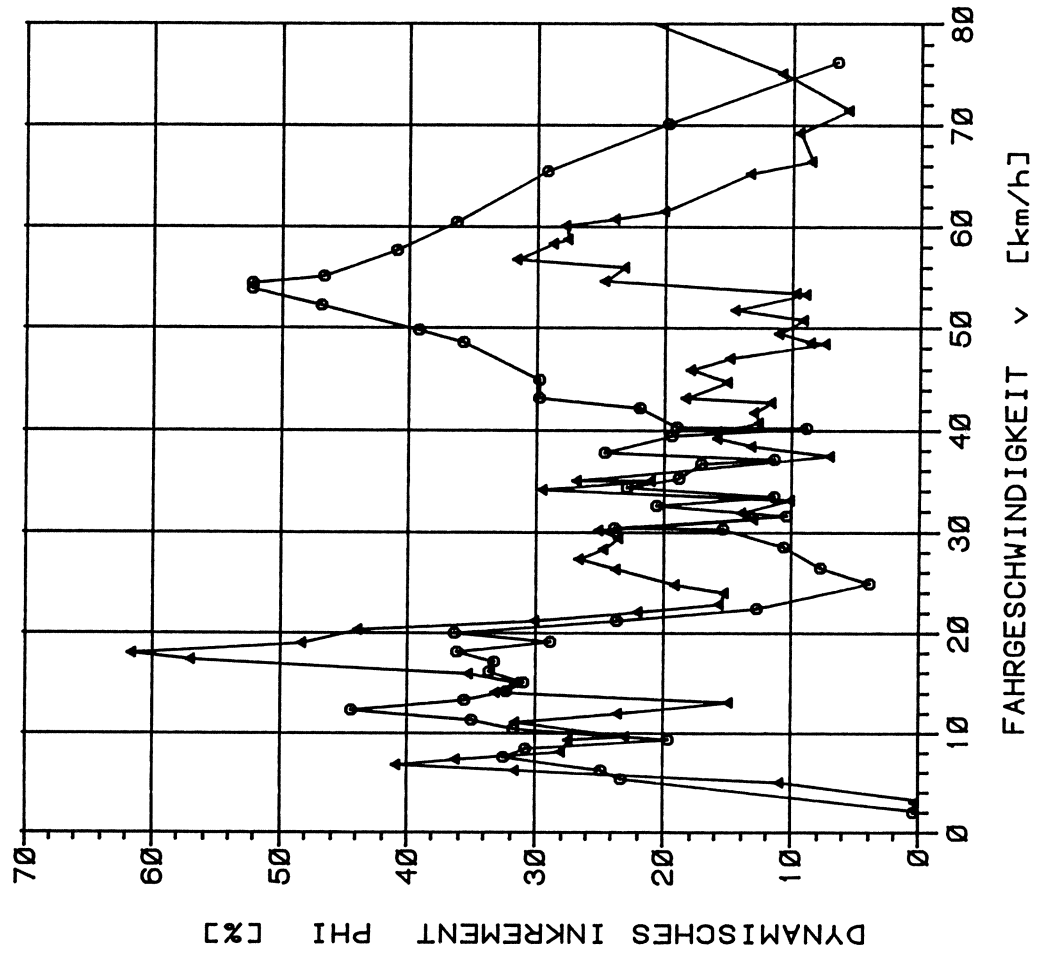
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2 12R 10 A0A	-1.03 MM	45.65	15.1
▲	WG Ø2 12R 10 A0B	-1.07 MM	39.26	16.9



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG Ø2

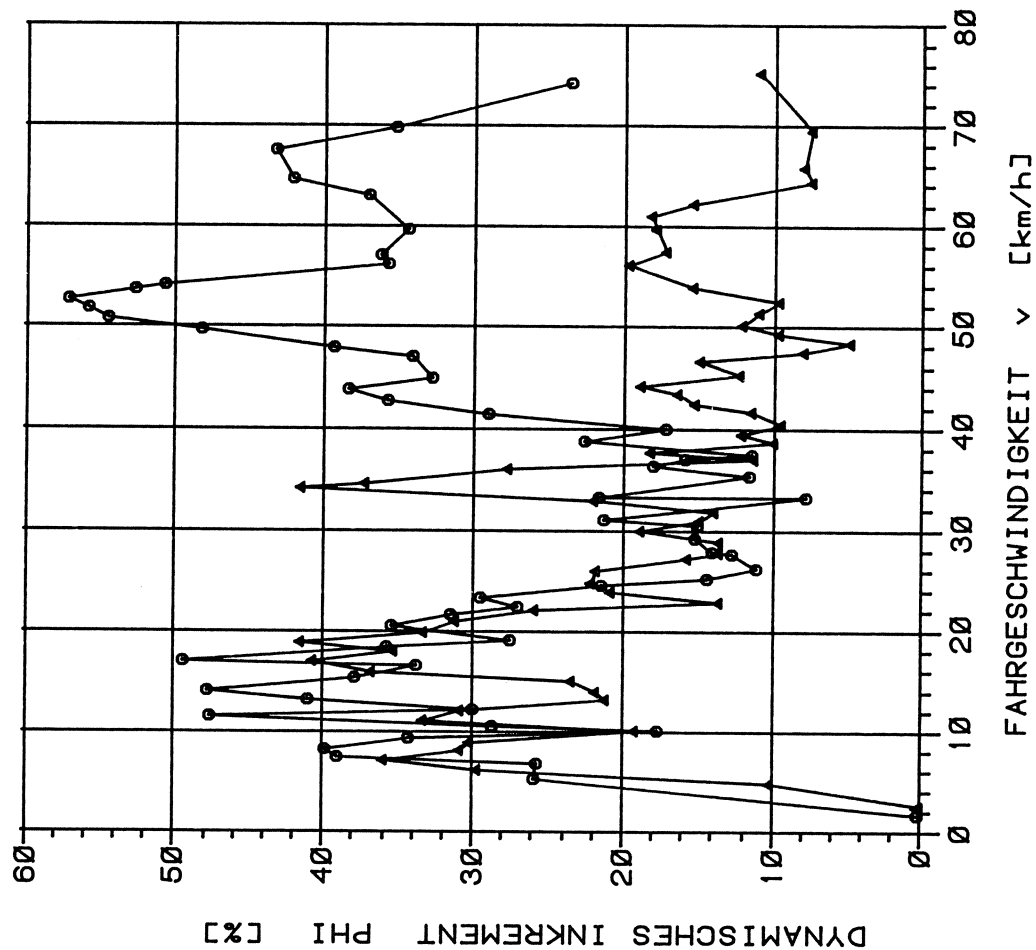
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2 13R 10 A0A	-1.03 MM	52.18	53.9
▲	WG Ø2 13R 10 A0B	-1.05 MM	61.31	18.0



A8.12
A8.11

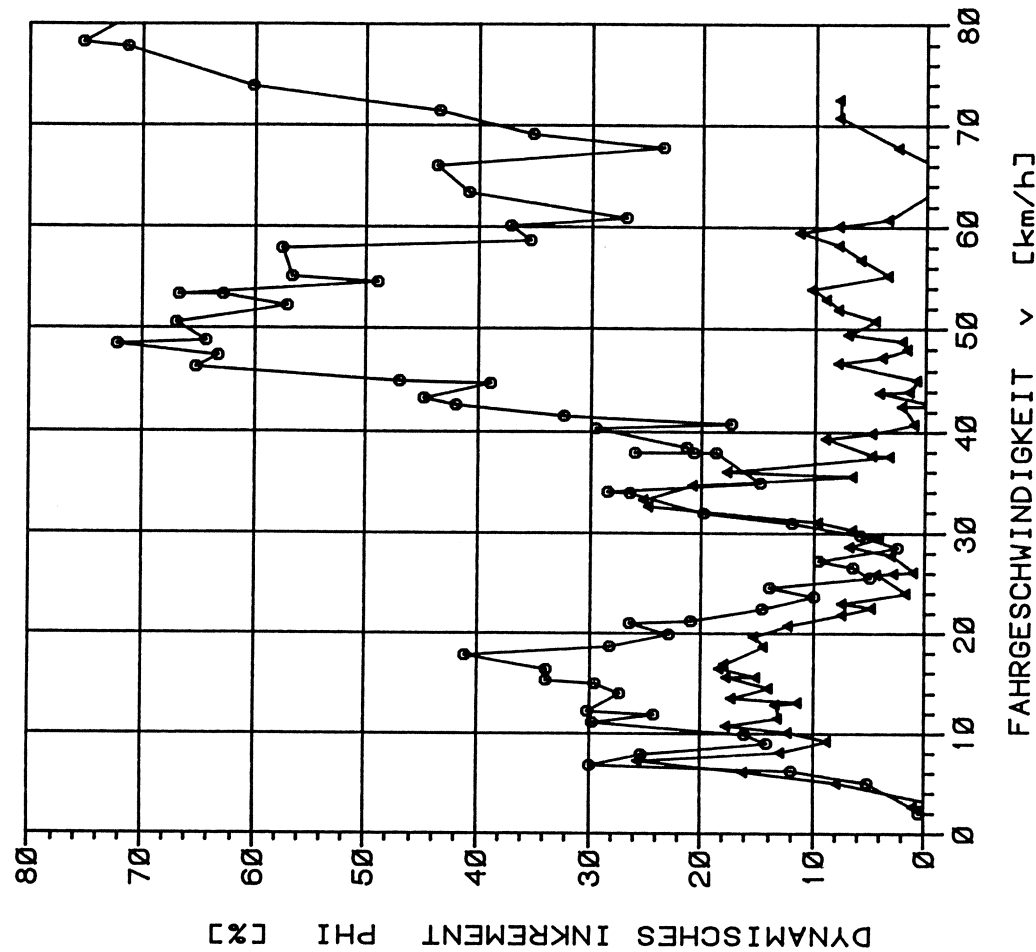
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	14R 1Ø AoA	-1.Ø1 MM	57.1Ø
→	WG Ø2	14R 1Ø AoB	-1.Ø1 MM	41.5Ø
				52.6
				18.9



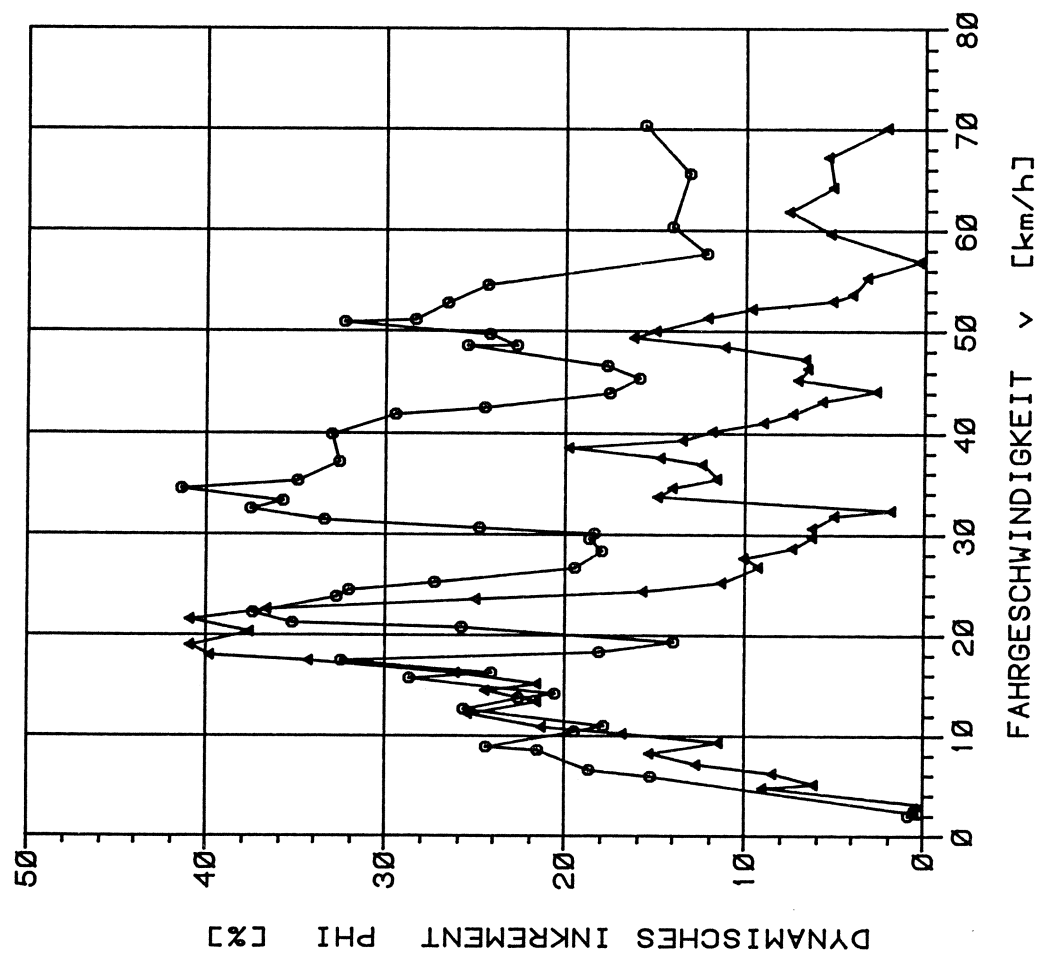
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	21R 1Ø AoA	-1.68 MM	75.14
→	WG Ø2	21R 1Ø AoB	-1.68 MM	25.53
				78.2
				7.2



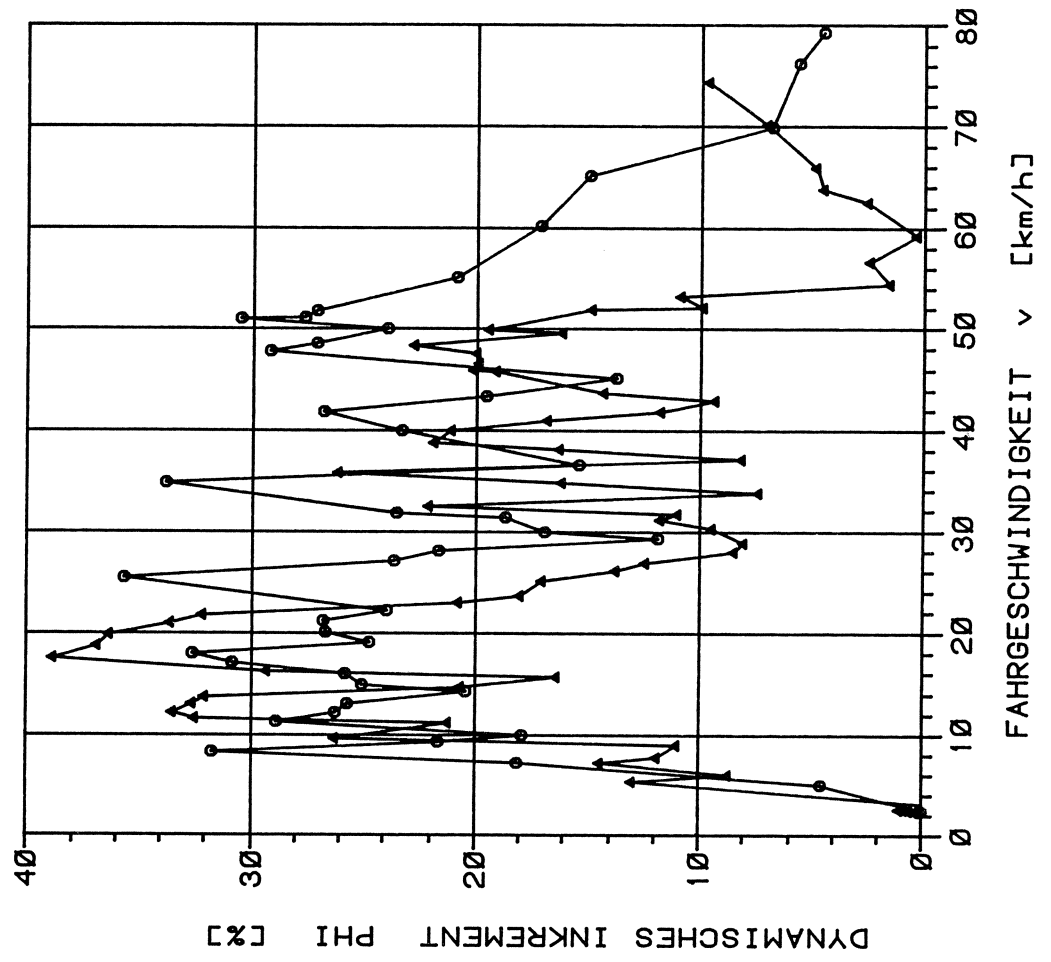
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG 111

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 111	12R 10 KoA	-1.24 MM	41.38
▲	WG 111	12R 10 KoB	-1.26 MM	40.80
				34.4
				21.5



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG 111

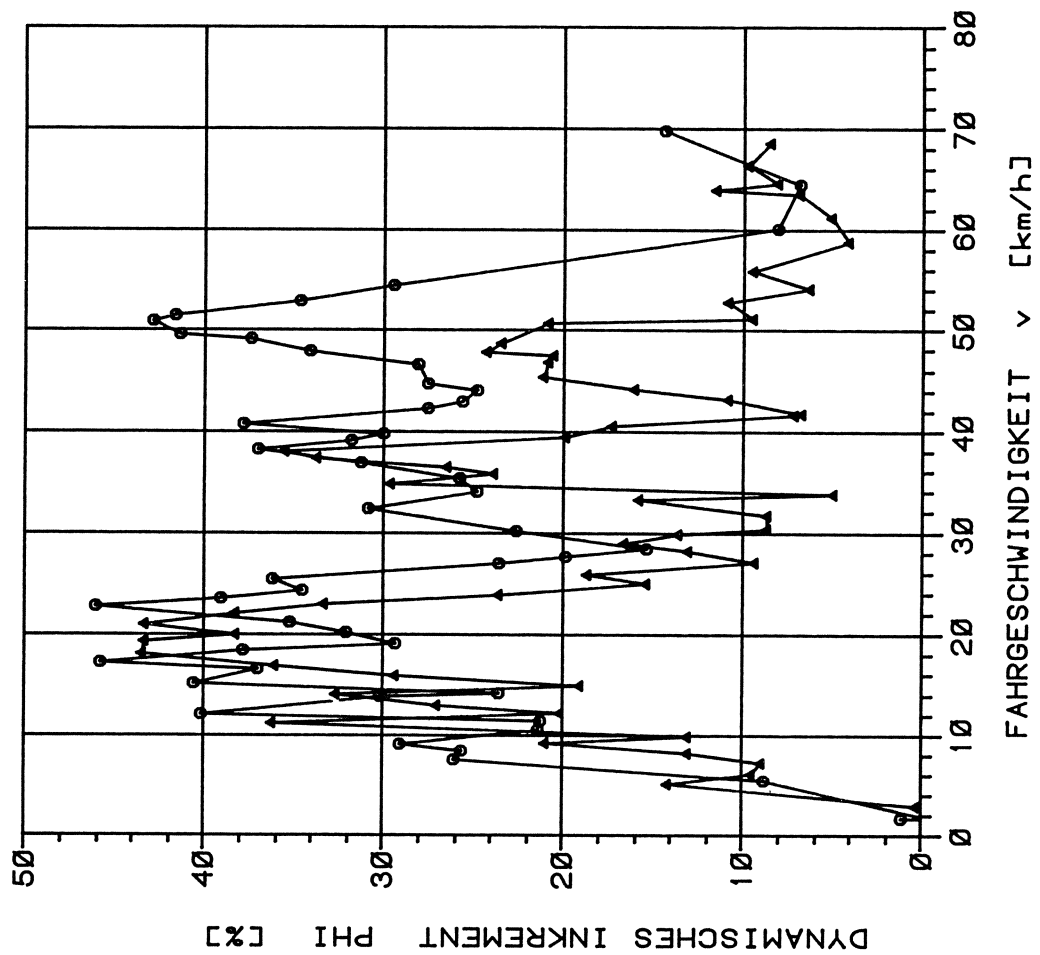
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 111	13R 10 KoA	-1.26 MM	35.61
▲	WG 111	13R 10 KoB	-1.24 MM	38.74
				25.3
				17.5



A8.16
A8.15

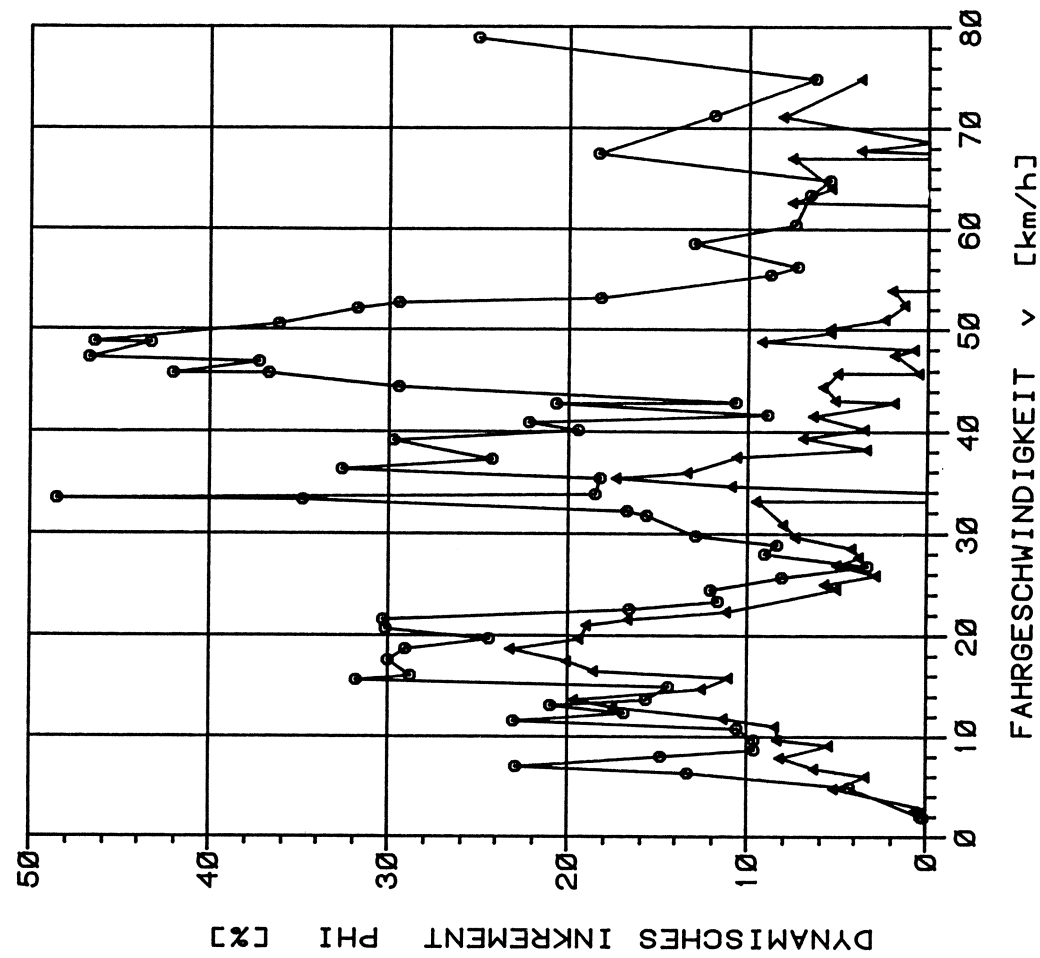
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG 111

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	14R 10 KoA	-1.20 MM	46.08	22.7
▲	14R 10 KoB	-1.19 MM	43.48	18.1



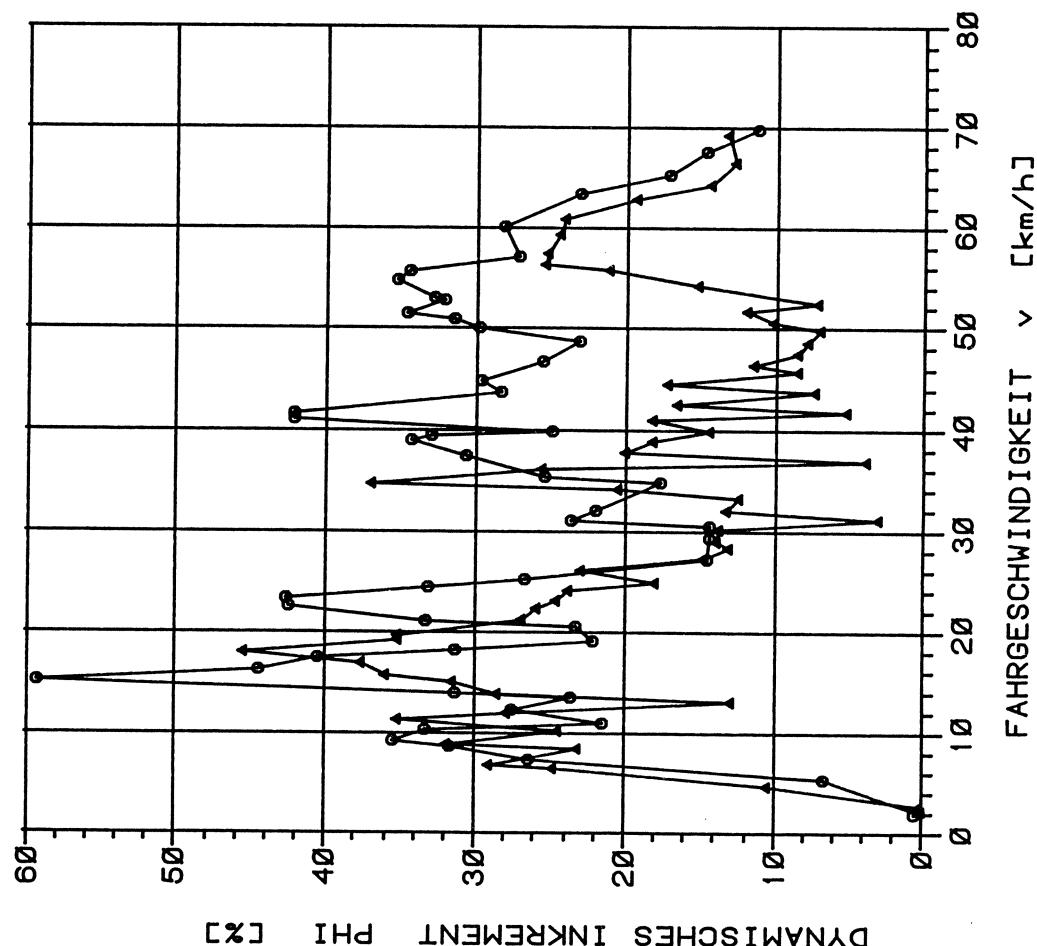
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG 111

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	21R 10 KoA	-2.02 MM	48.54	33.4
▲	21R 10 KoB	-2.01 MM	23.15	18.6



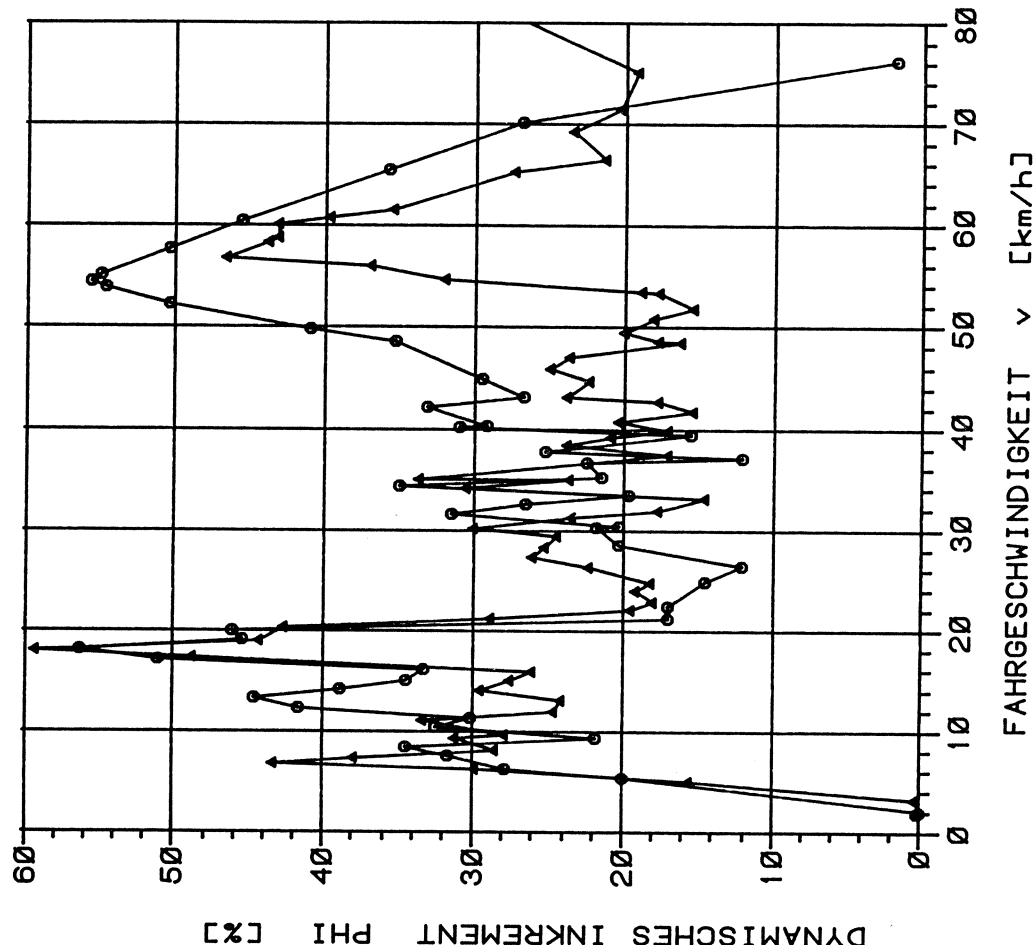
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG 112

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 112 12R 10 AoA	-.74 MM	59.24	15.1
▲	WG 112 12R 10 AoB	-.74 MM	45.43	18.0



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG 112

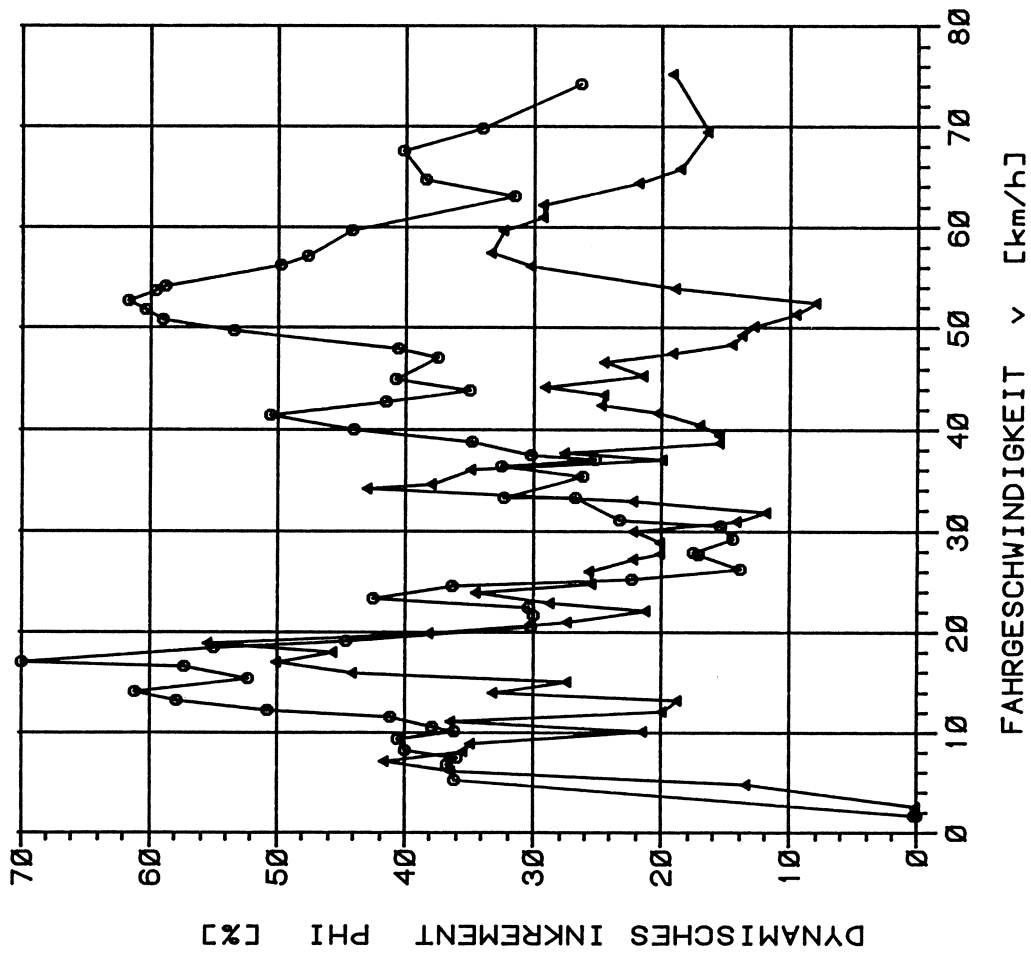
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 112 13R 10 AoA	-.73 MM	56.22	18.1
▲	WG 112 13R 10 AoB	-.73 MM	59.18	18.0



A8.20
A8.19

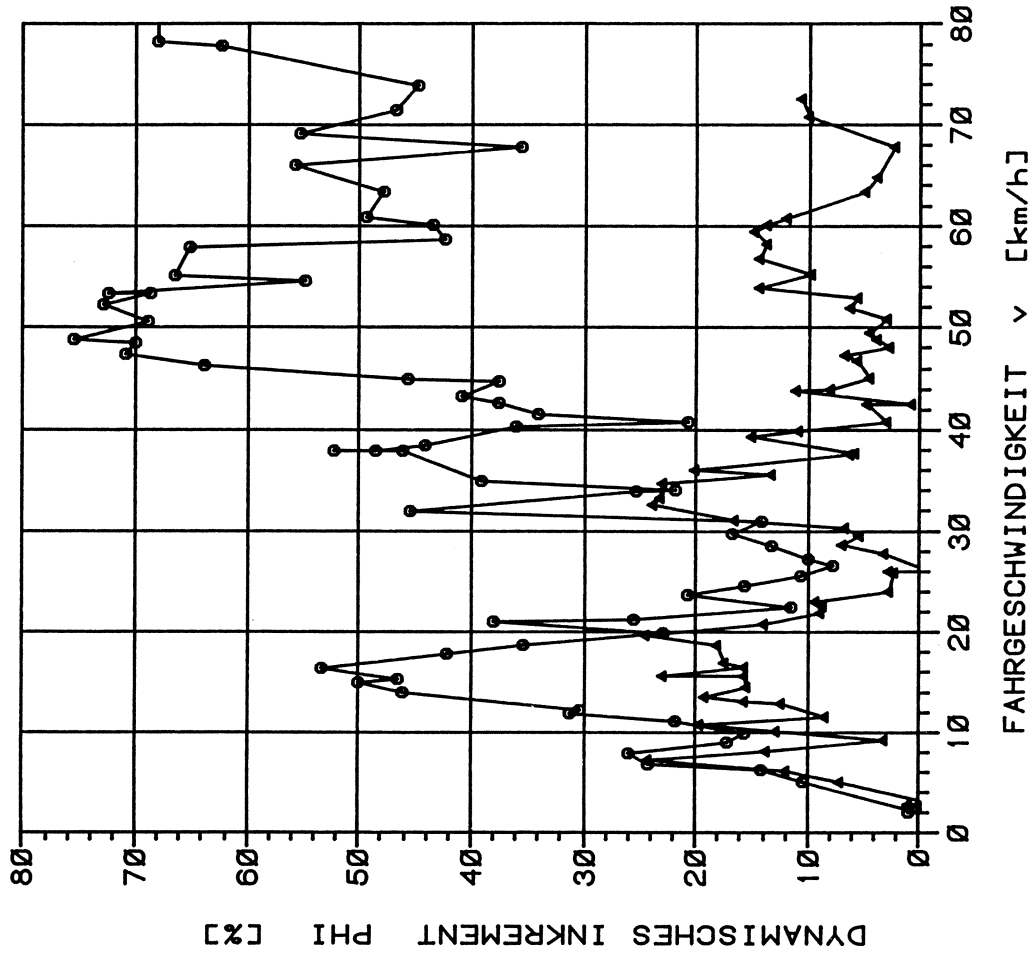
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG 112

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 112	14R 10 AoA	-7.71 MM	69.75	17.0
WG 112	14R 10 AoB	-7.71 MM	55.17	18.9



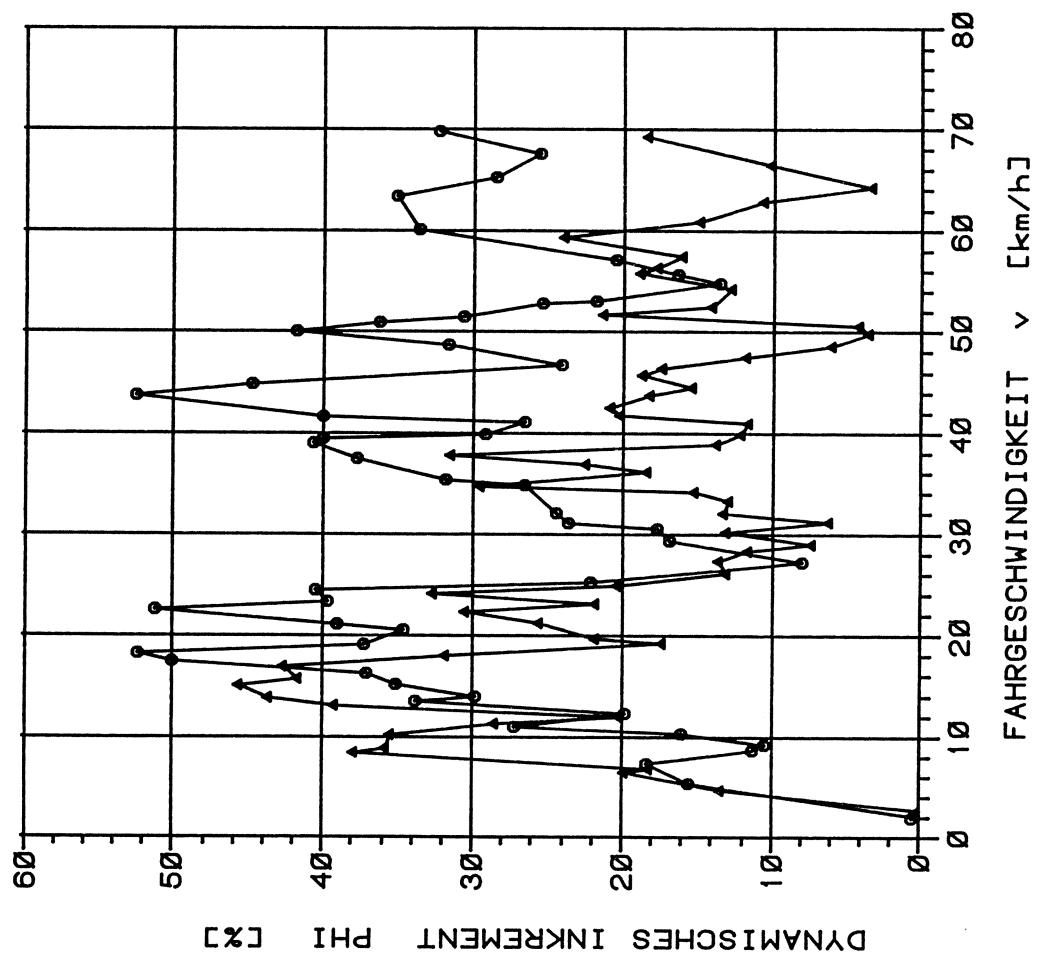
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG 112

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 112	21R 10 AoA	-1.17 MM	75.49	48.8
WG 112	21R 10 AoB	-1.19 MM	24.35	19.6



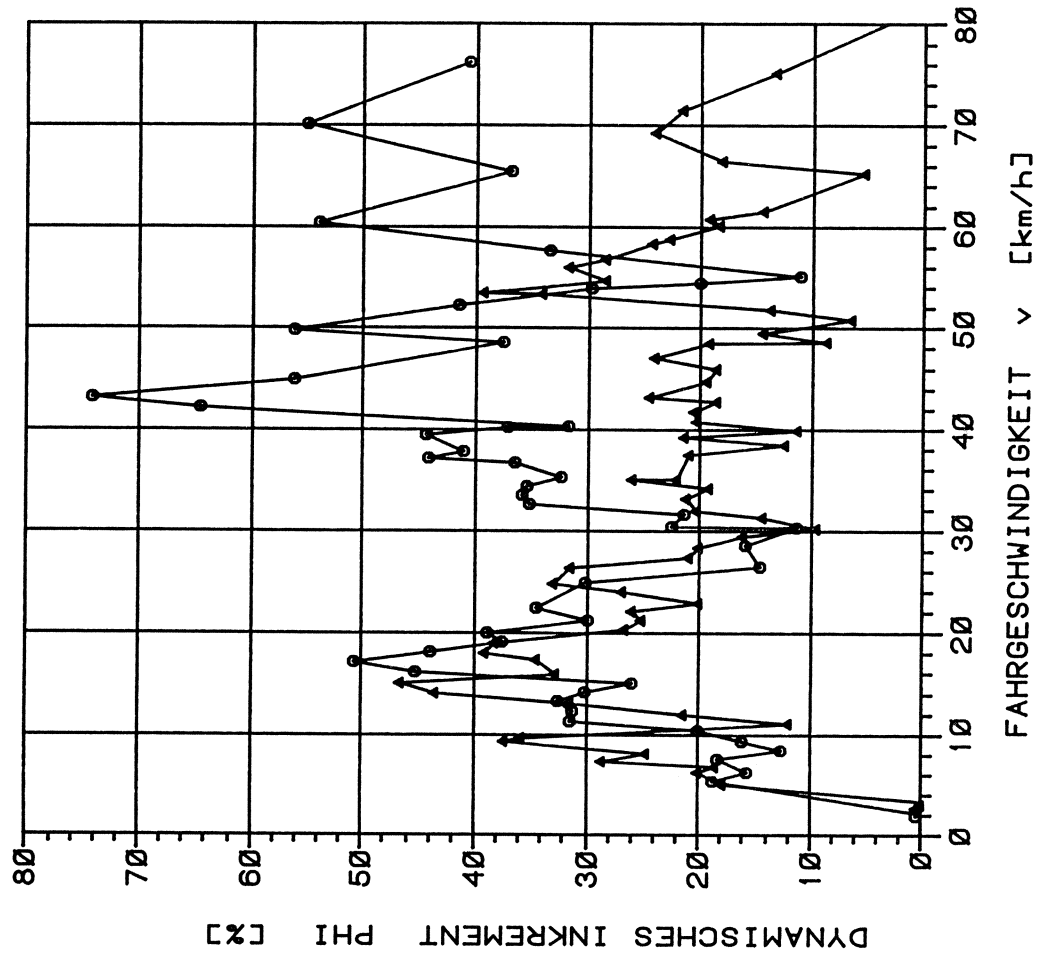
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	12R 10 A0A	-1.11 MM	52.43
▲	WG 22	12R 10 A0B	-1.12 MM	45.58
				43.7
				15.0



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG 22	13R 10 A0A	-1.10 MM	74.15
▲	WG 22	13R 10 A0B	-1.08 MM	46.47
				43.1
				15.0

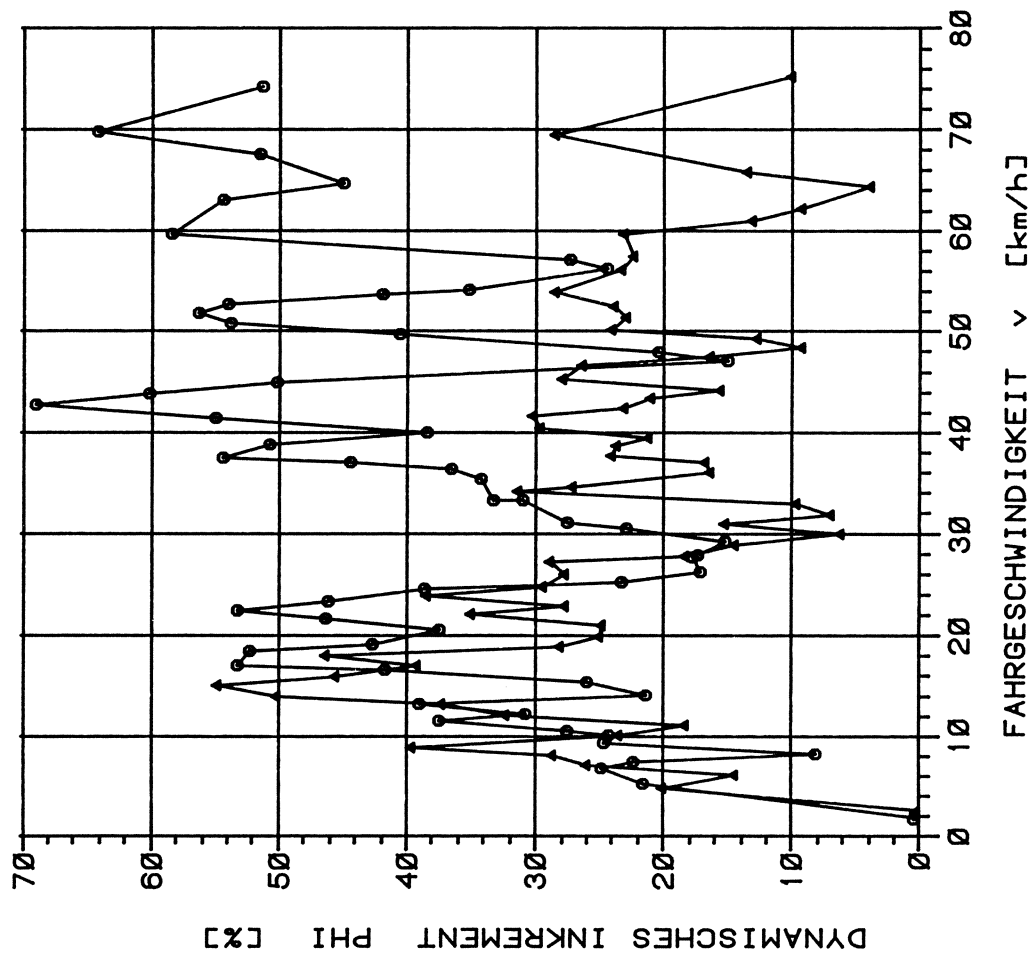


VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG 22

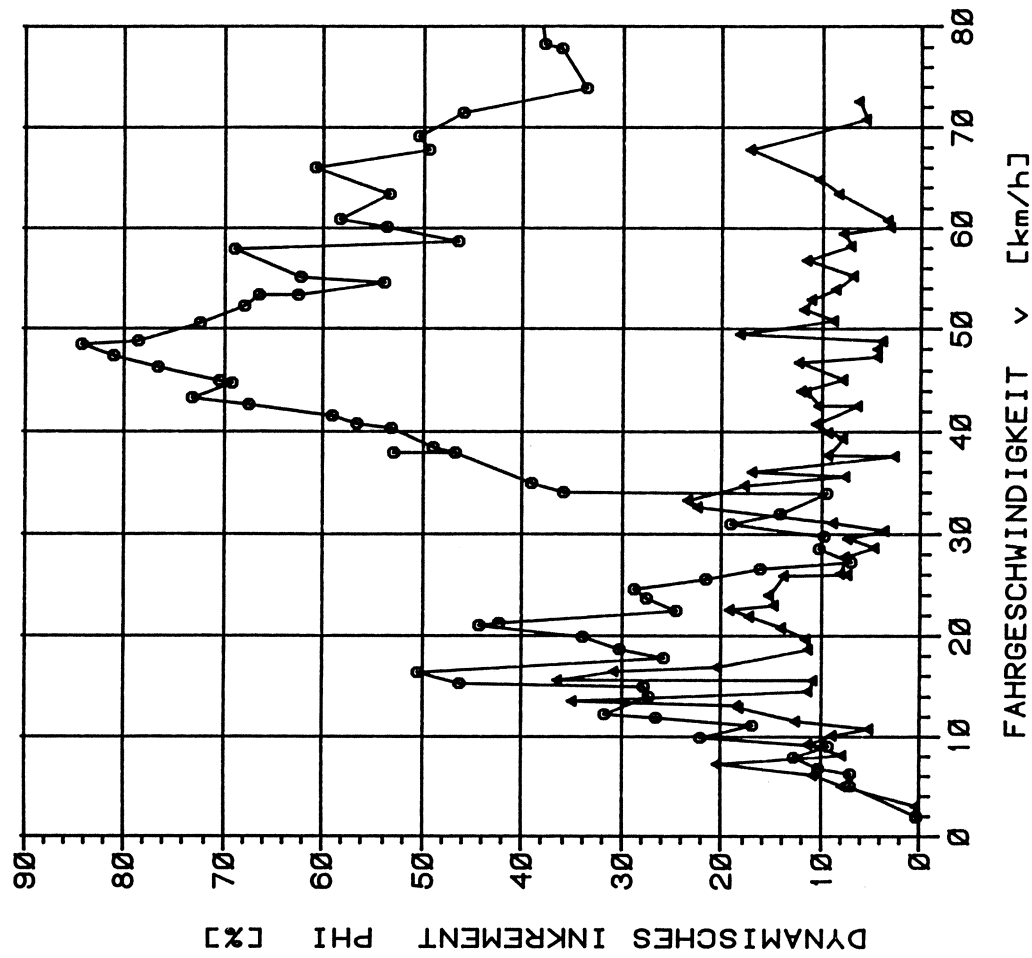
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG 22

A8.24
A8.23

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 22	14R 10 A0A	-1.08 MM	68.81	42.7
WG 22	14R 10 A0B	-1.07 MM	54.63	15.0

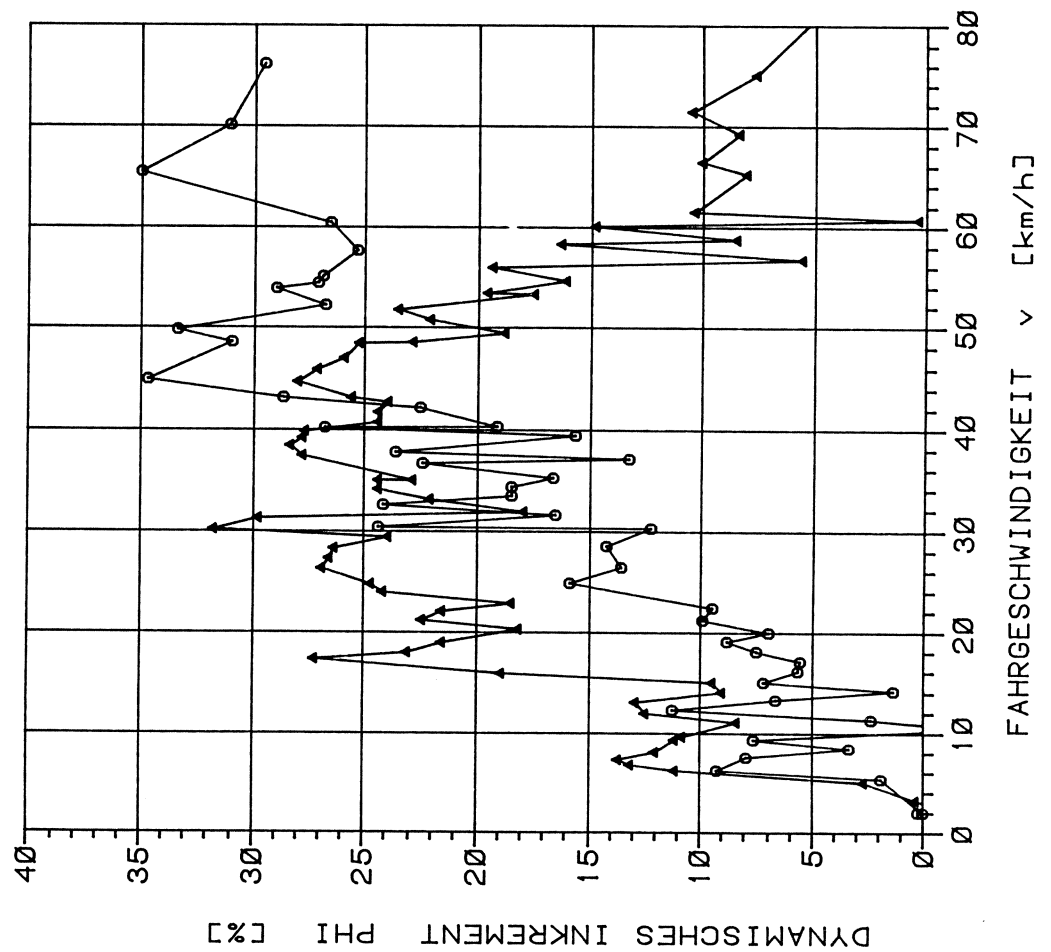


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
WG 22	21R 10 A0A	-1.77 MM	84.16	48.4
WG 22	21R 10 A0B	-1.78 MM	36.17	15.6



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 13R 10 AoA	8.94 MI	34.93	65.5
▲	DMS 42 13R 10 AoB	9.70 MI	31.70	30.1

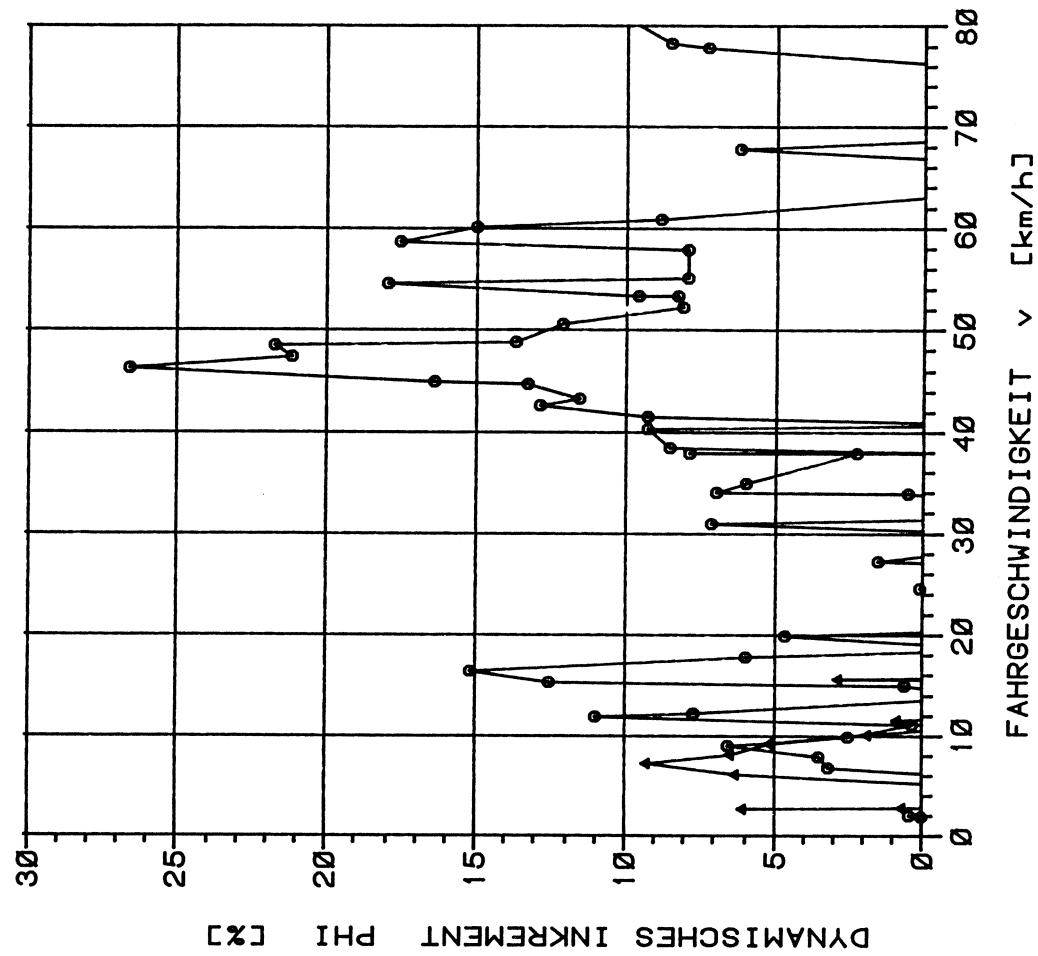
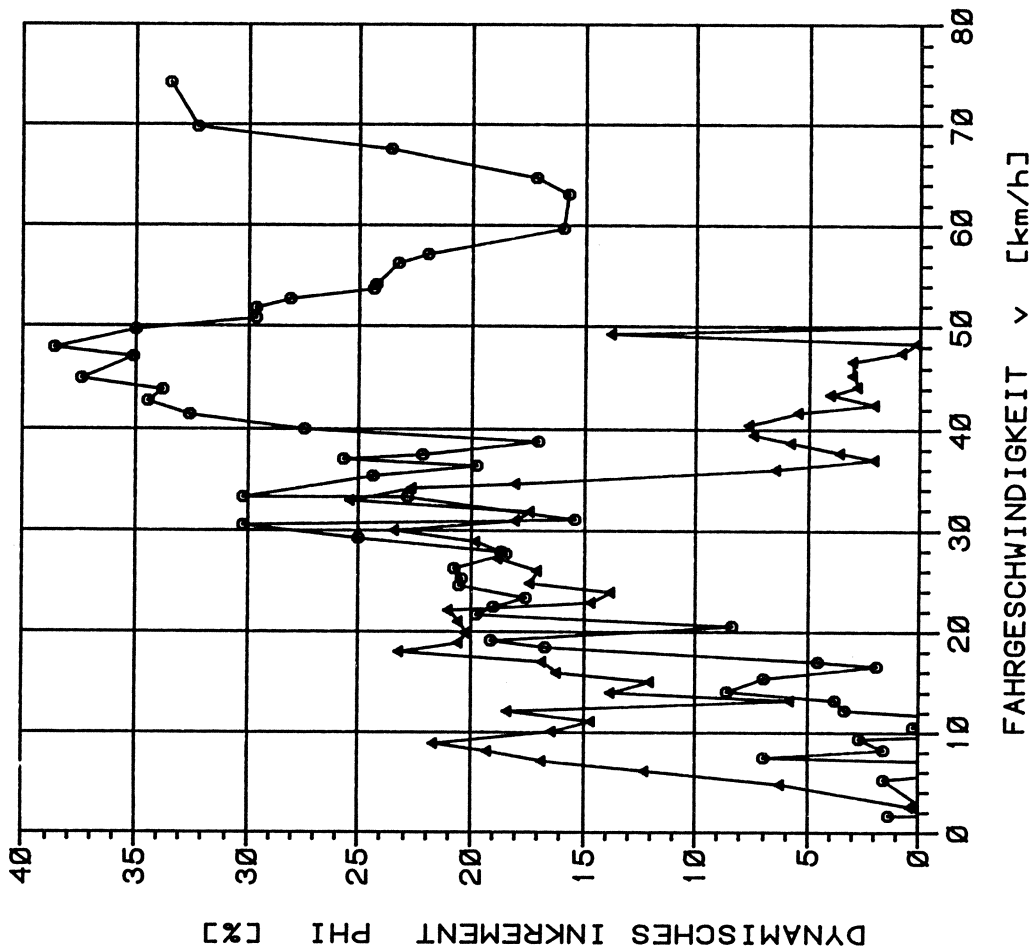


VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 42

VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 42

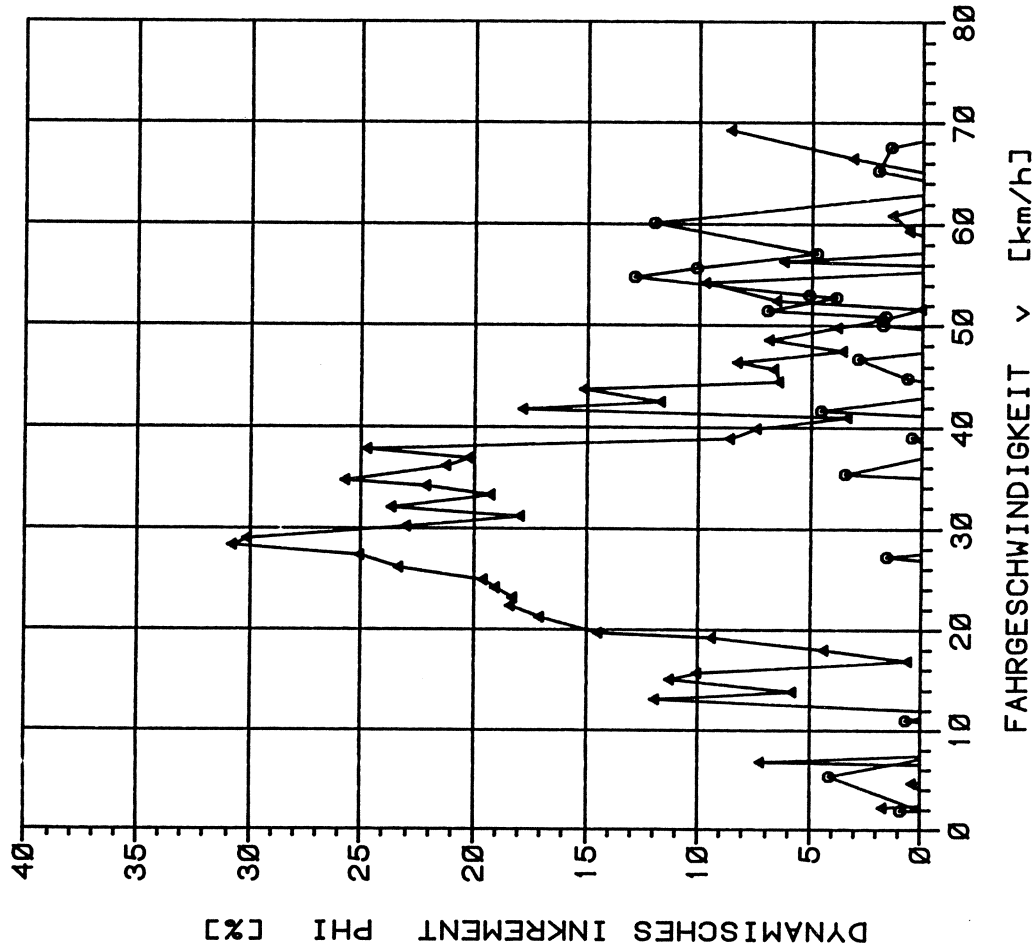
A8.27
A8.26

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○—	DMS 42 21R 10 A0A	10.25 MI	26.55	46.2
▲—	DMS 42 21R 10 A0B	10.49 MI	9.18	7.2

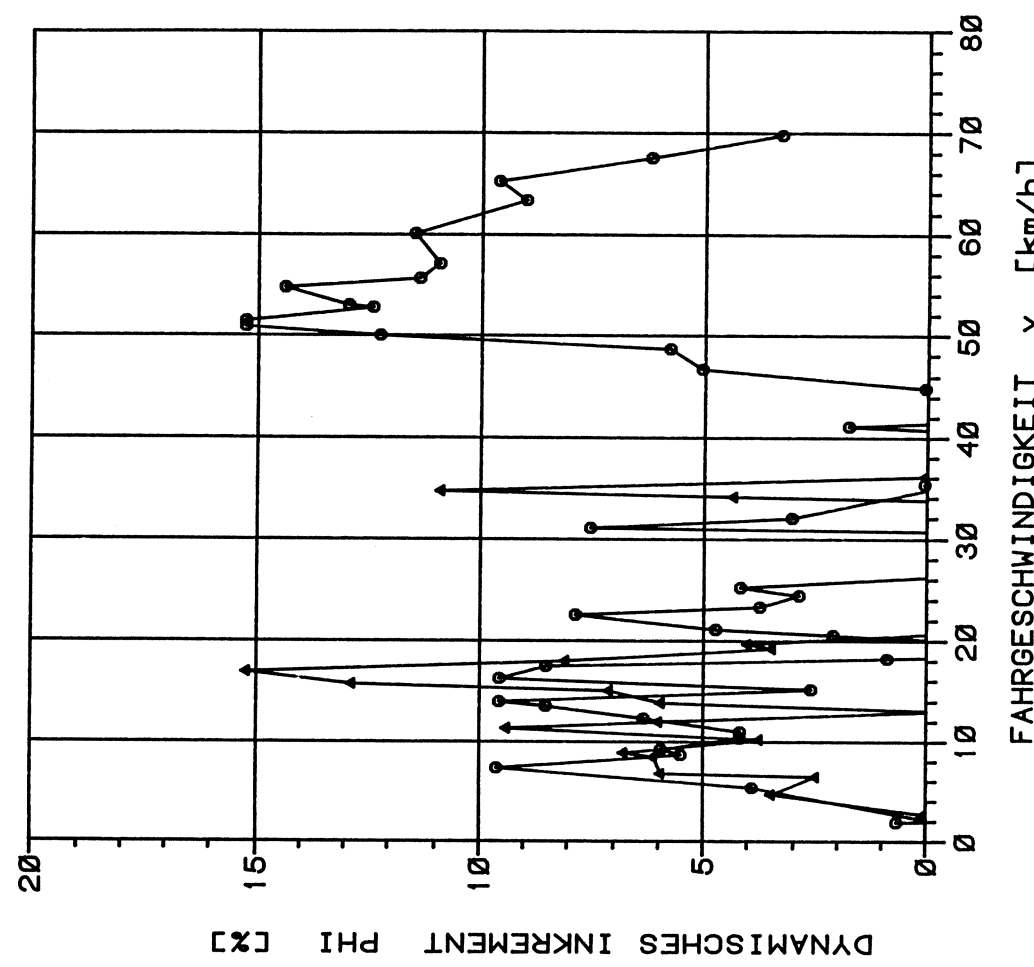


VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS 52+ VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 12R 10 AoA	16.57 MI	12.81	54.7
▲	DMS 52 12R 10 AoB	13.63 MI	30.64	28.2



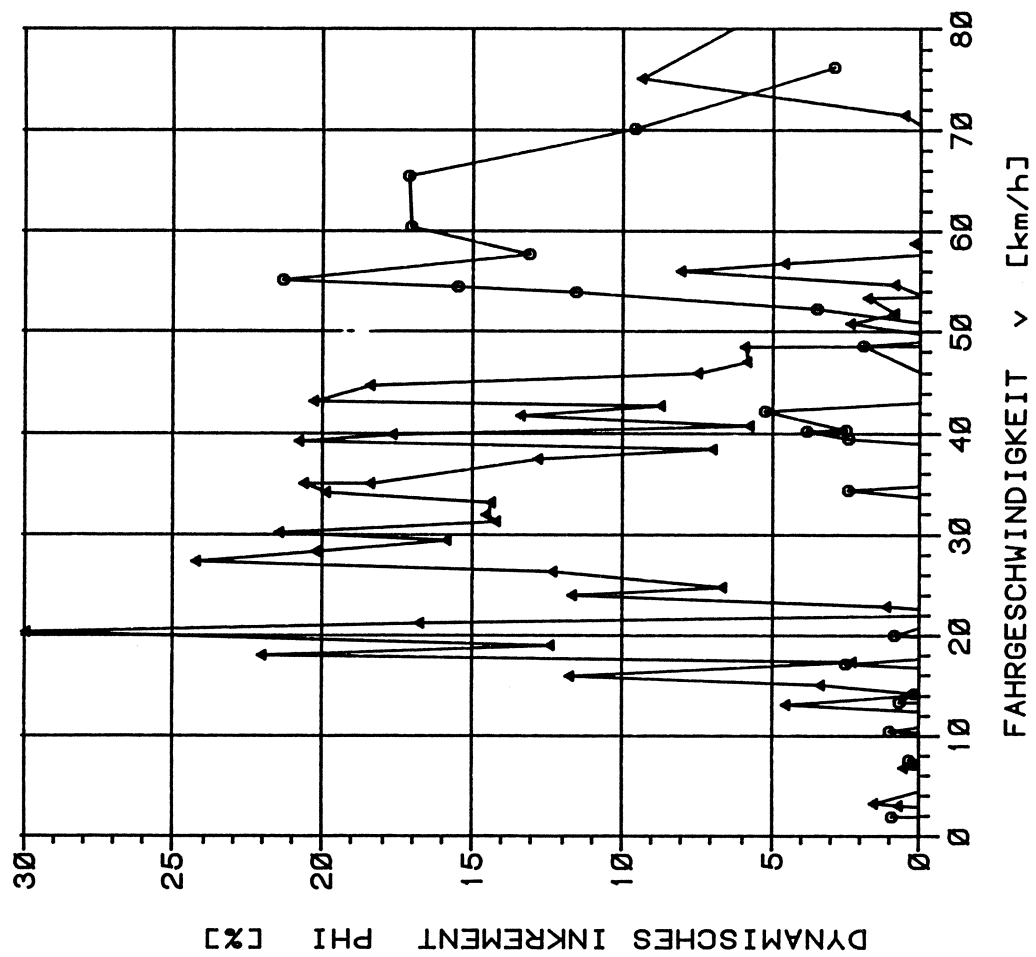
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 12R 10 AoA	-16.78 MI	15.21	51.4
▲	DMS 52 12R 10 AoB	-17.87 MI	15.19	16.9



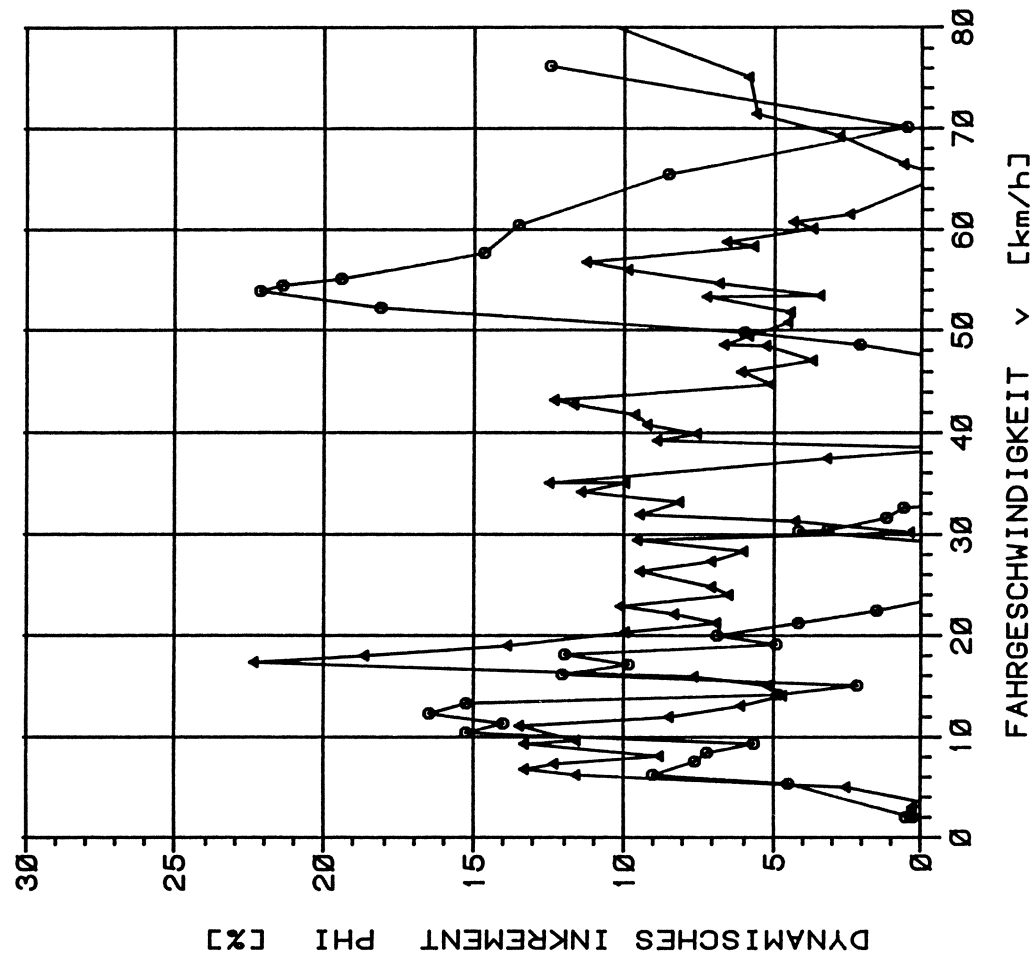
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 52+ VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 52-

A8.31
A8.30

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	13R 10 A0A	16.25 MI	21.27	55.0
△	13R 10 A0B	13.11 MI	20.83	20.3

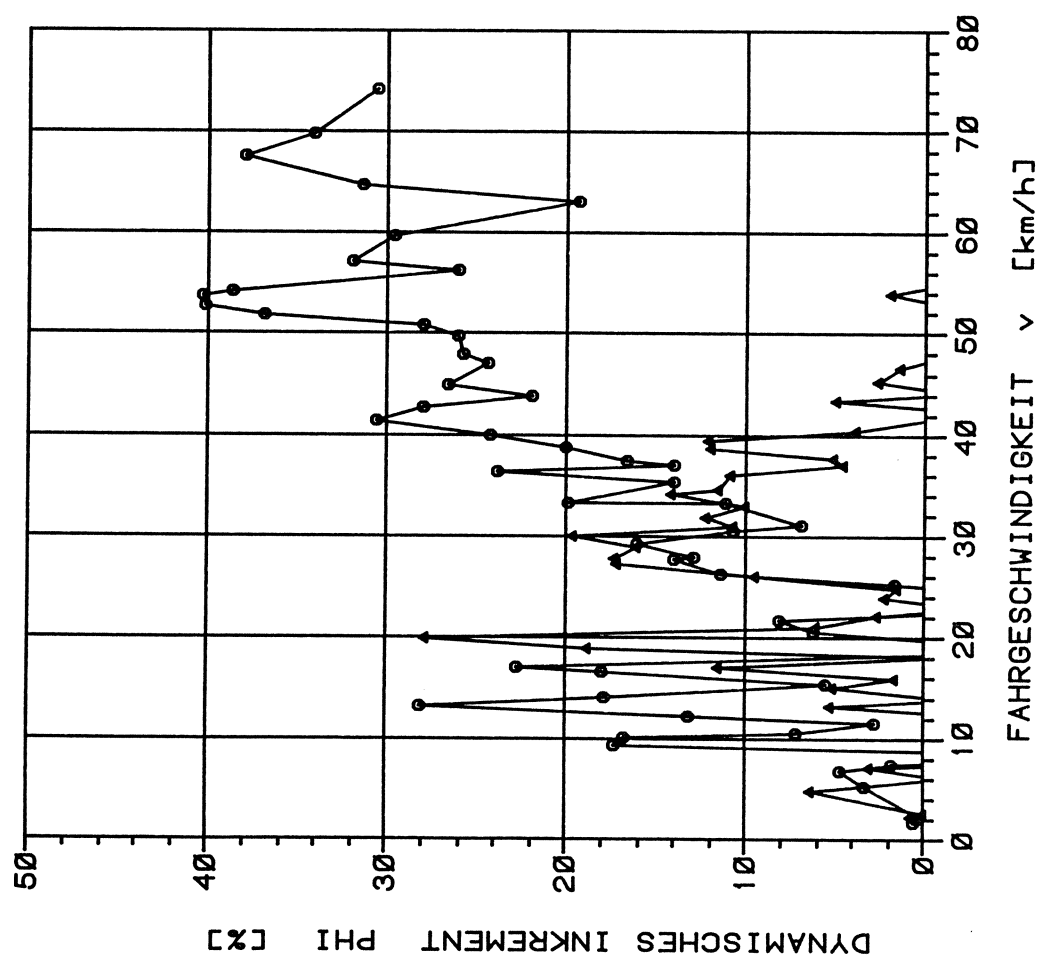


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	13R 10 A0A	-16.18 MI	22.07	53.9
△	13R 10 A0B	-15.96 MI	22.24	17.3

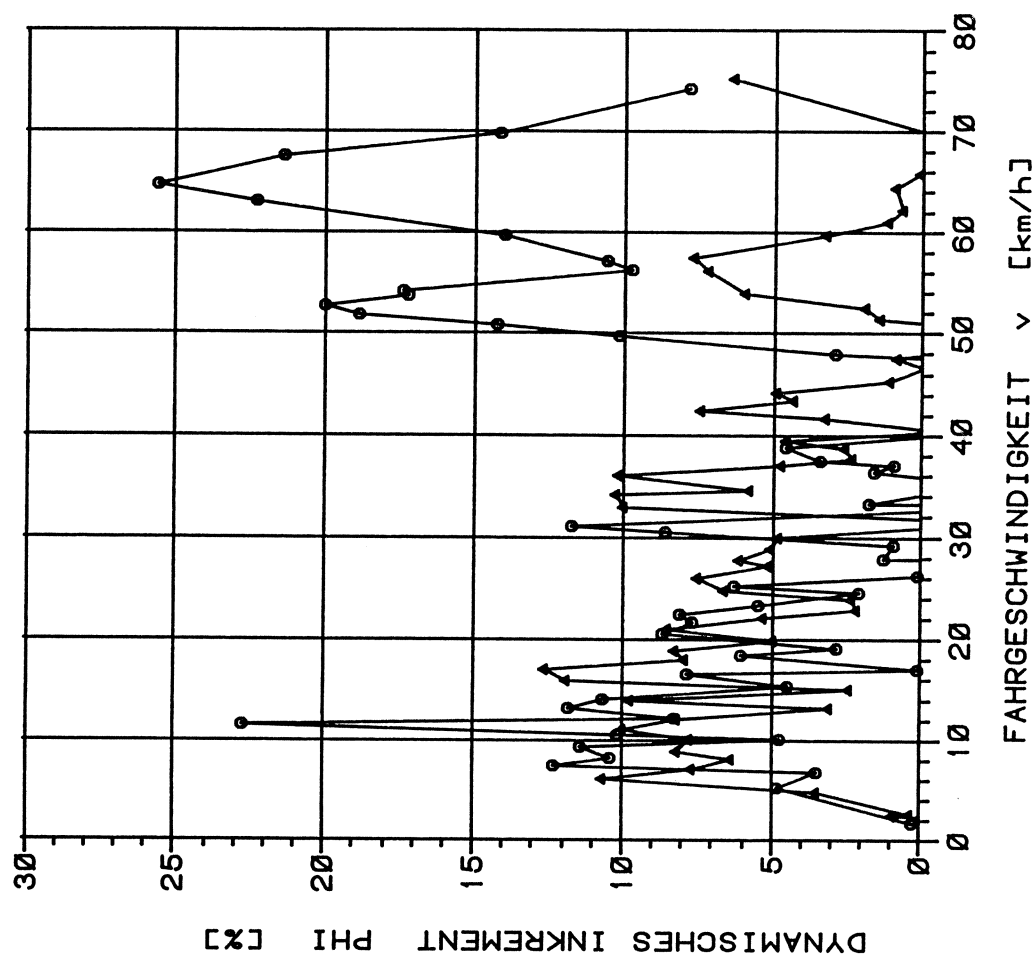


VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 52+ VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	14R 10 AoA	12.92 MI	40.26	53.6
▲	14R 10 AoB	14.35 MI	27.84	19.9



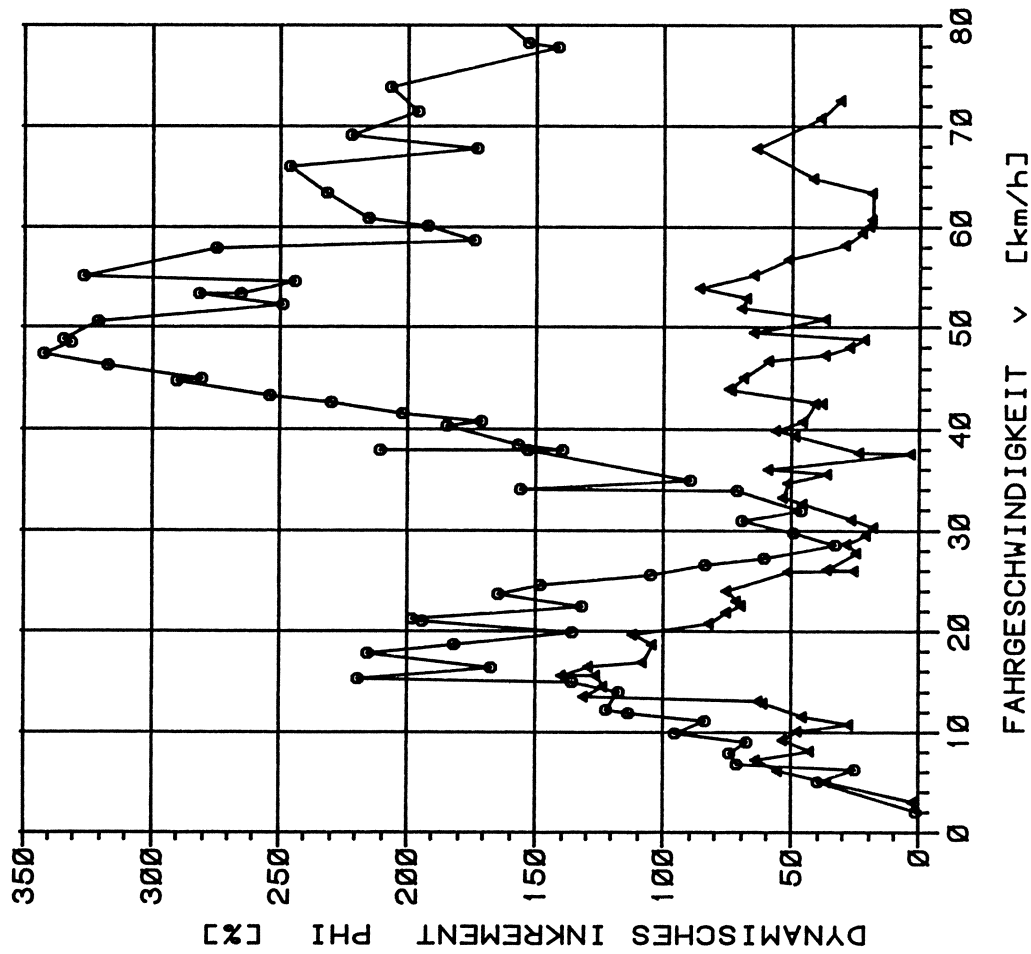
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	14R 10 AoA	-15.98 MI	25.60	64.7
▲	14R 10 AoB	-16.11 MI	12.58	17.0



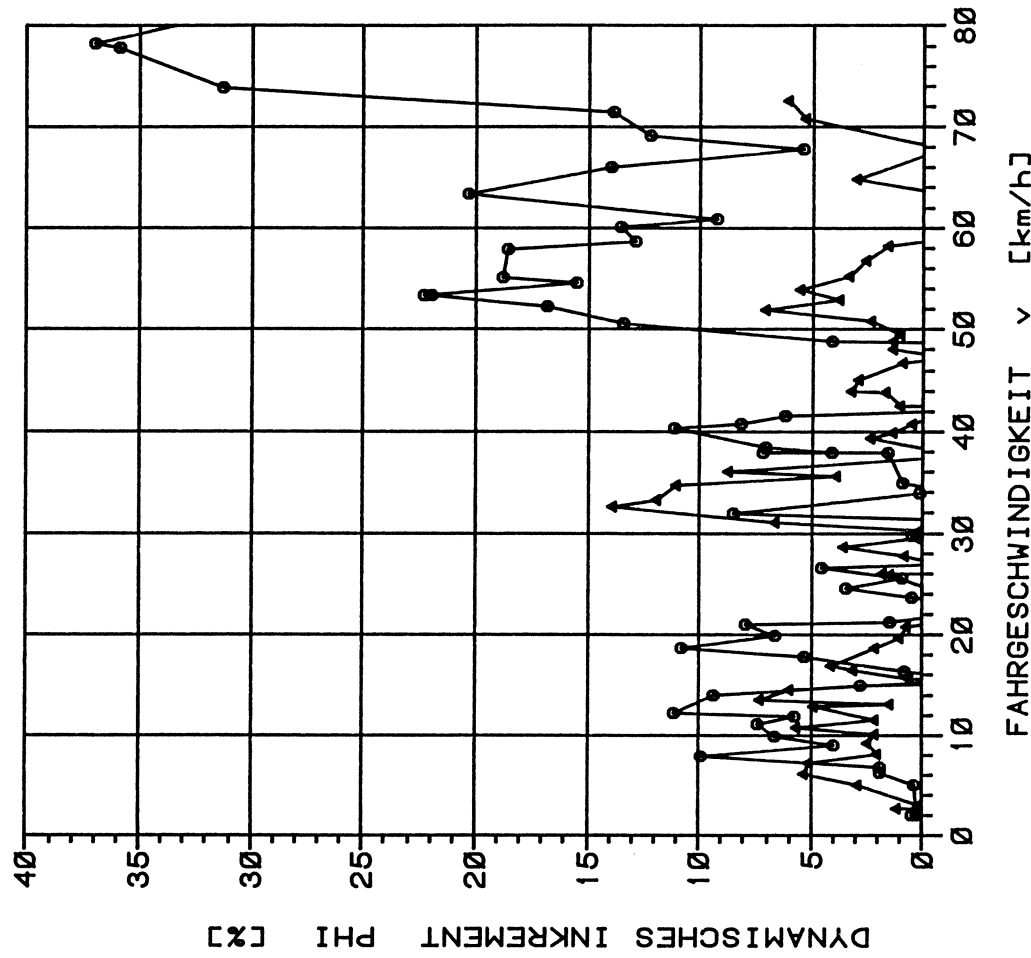
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 52+ VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 52-

A8.35
A8.34

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 21R 10 A0A	3.34 MI	341.29	47.4
▲	DMS 52 21R 10 A0B	3.31 MI	138.69	15.6

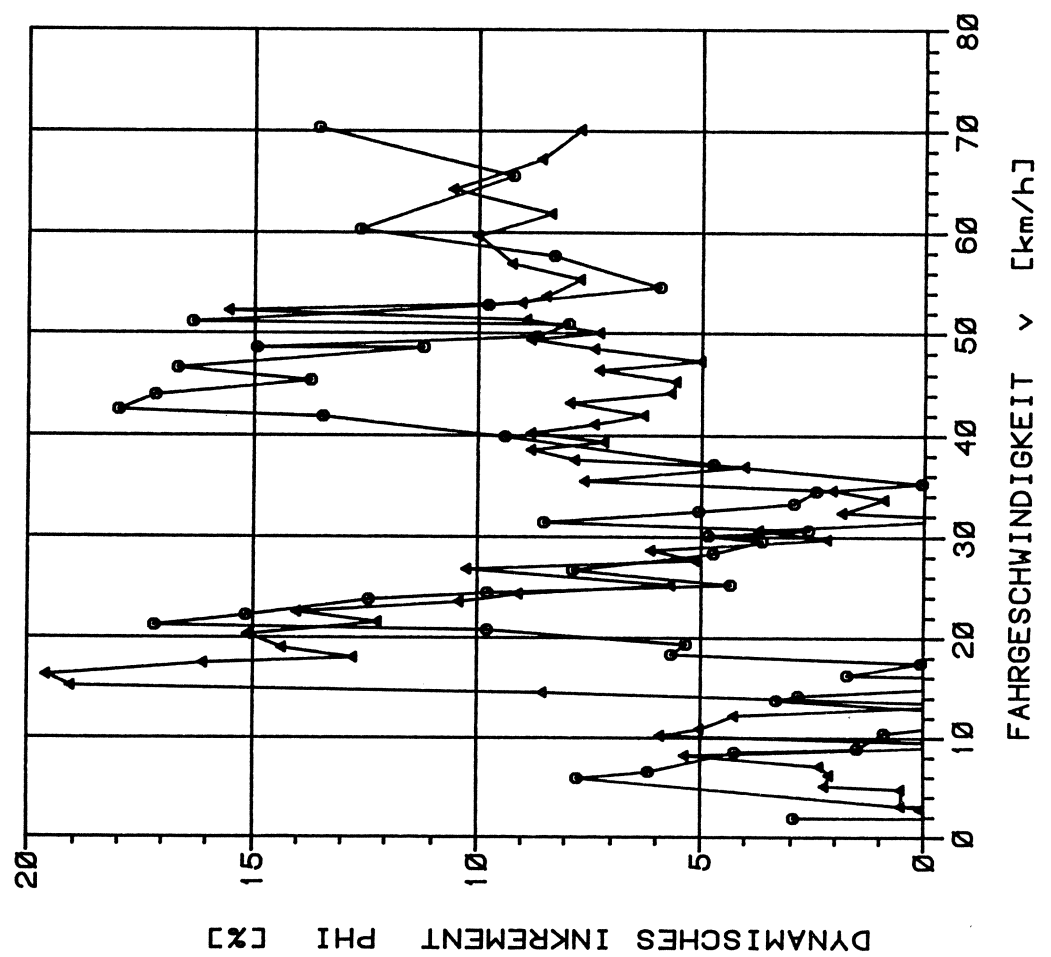


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 21R 10 A0A	-23.58 MI	36.97	78.2
▲	DMS 52 21R 10 A0B	-23.16 MI	13.83	32.6



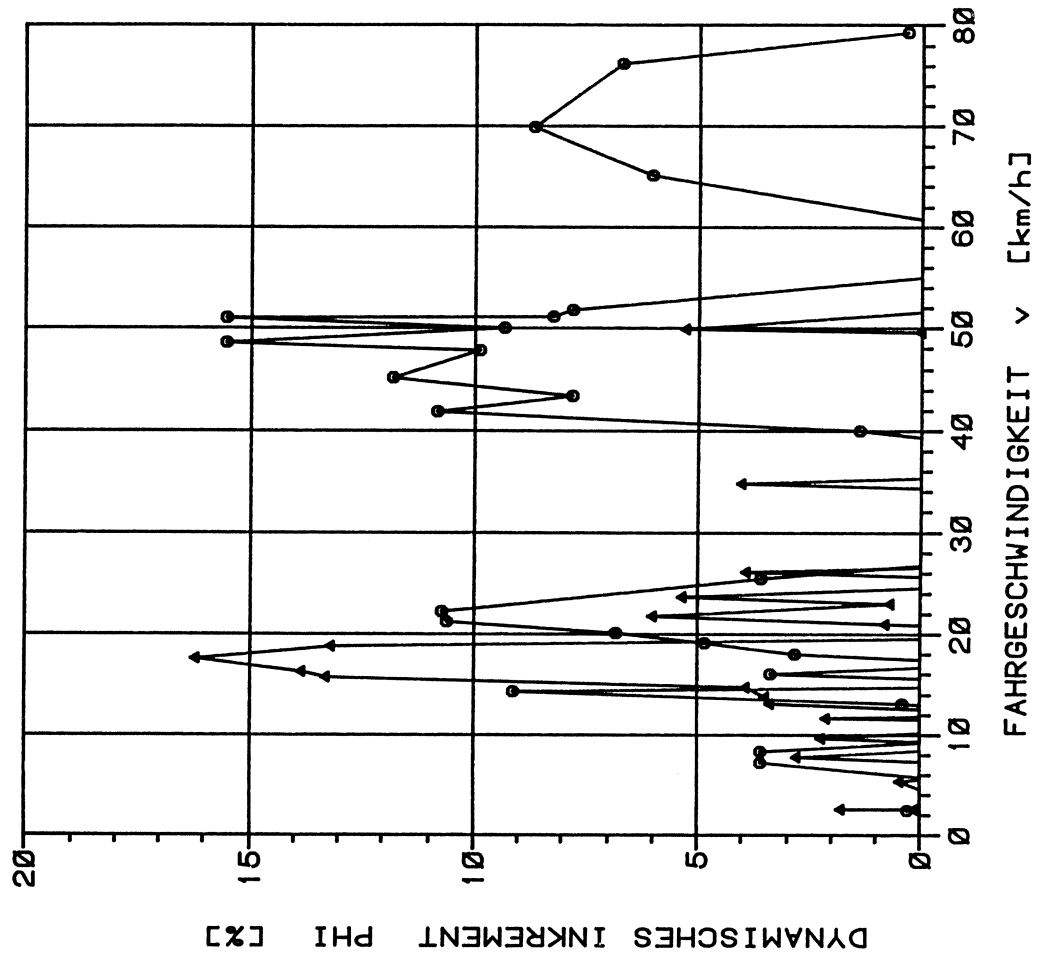
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	12R 10 KoA	16.67 MI	17.95
△	DMS 22	12R 10 KoB	16.74 MI	19.55
				42.4
				16.2



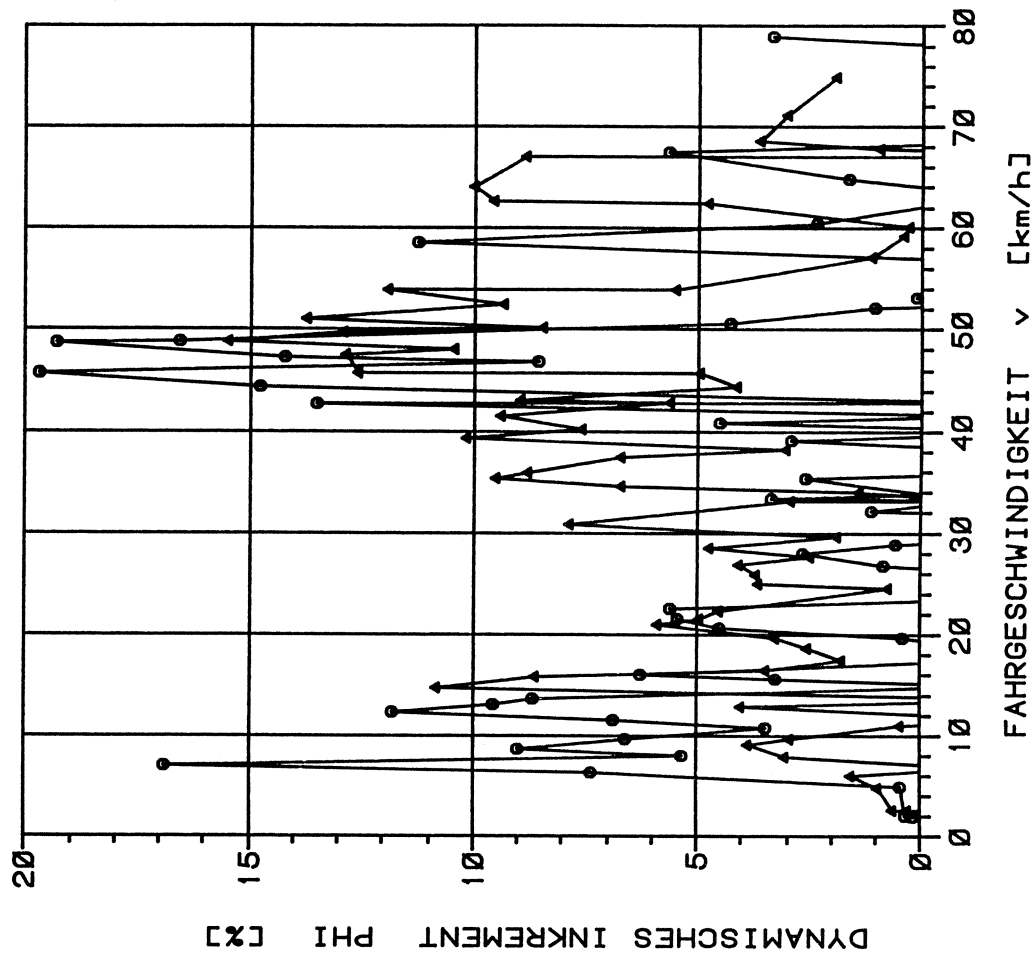
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22	13R 10 KoA	17.04 MI	15.50
△	DMS 22	13R 10 KoB	17.04 MI	16.15
				51.0
				17.5



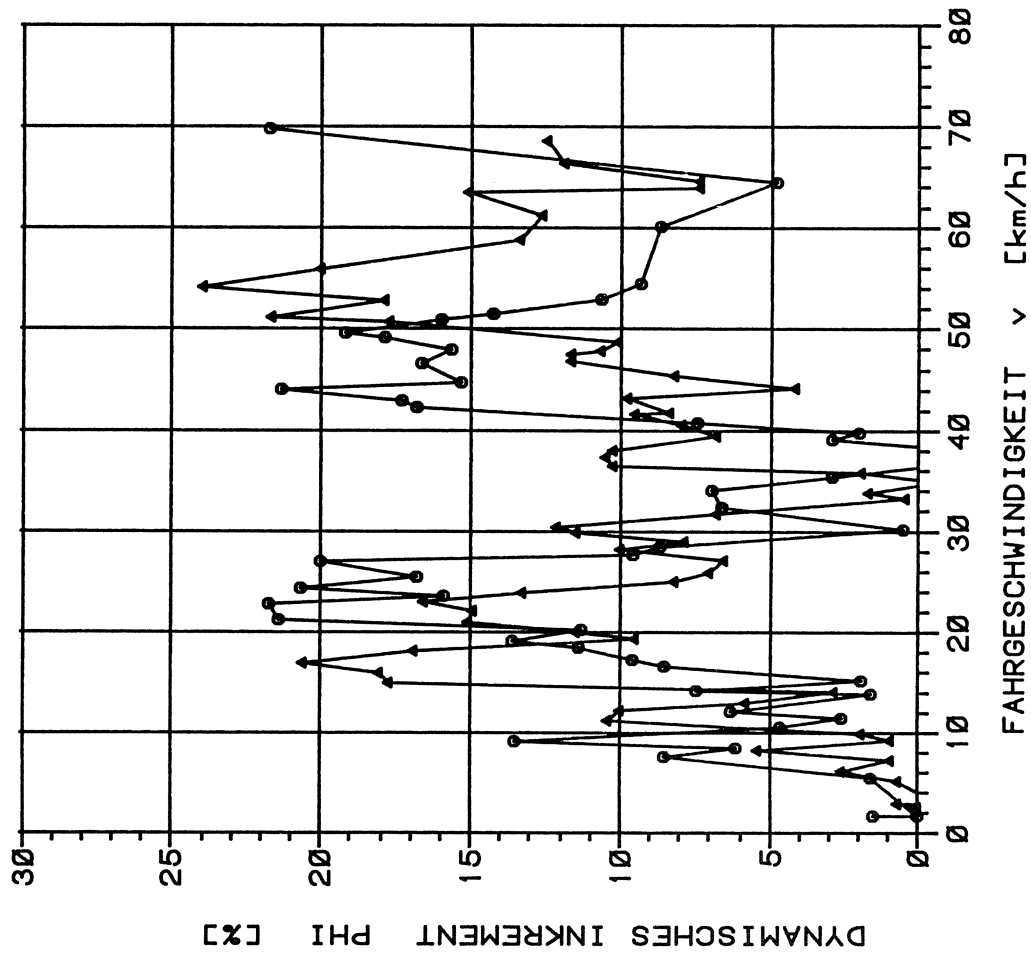
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
○—	DMS 22	21R 10 KoA	25.91 MI	45.7
▲—	DMS 22	21R 10 KoB	25.33 MI	48.8



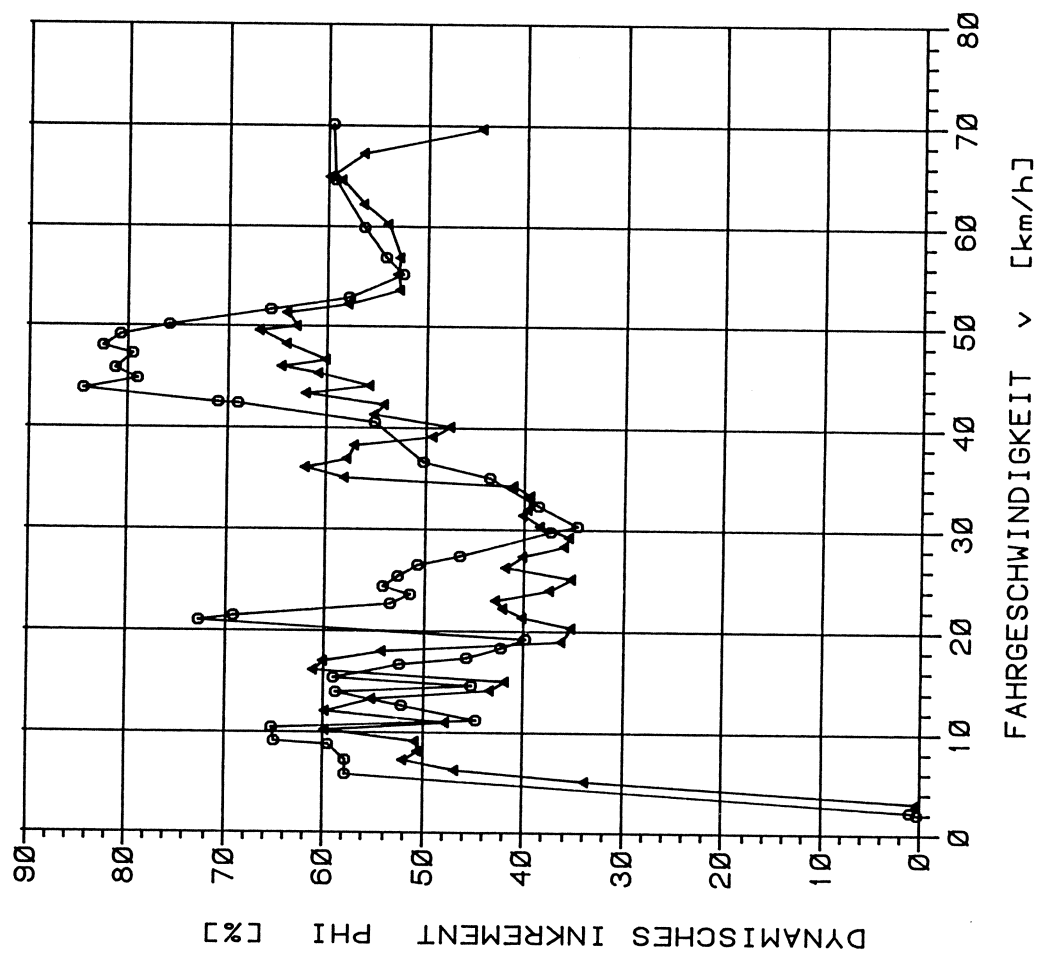
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI $v=[\text{km/h}]$
○—	DMS 22	14R 10 KoA	14.68 MI	69.8
▲—	DMS 22	14R 10 KoB	14.74 MI	54.1



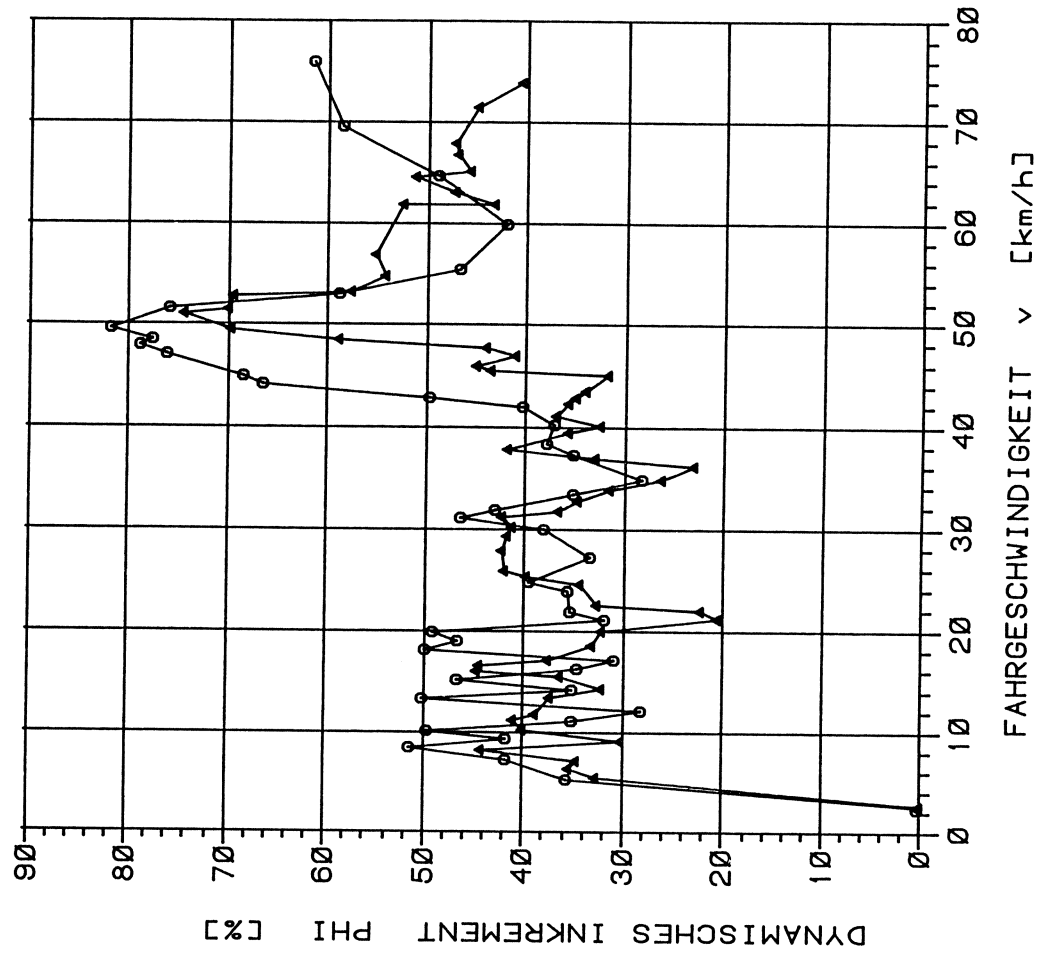
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	12R 1Ø KmA	-1.74 MM	84.27
▲	WG Ø1	12R 1Ø KmB	-1.76 MM	66.69
				43.8
				49.5



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG Ø1

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø1	13R 1Ø KmA	-1.79 MM	81.56
▲	WG Ø1	13R 1Ø KmB	-1.77 MM	74.14
				49.6
				51.0



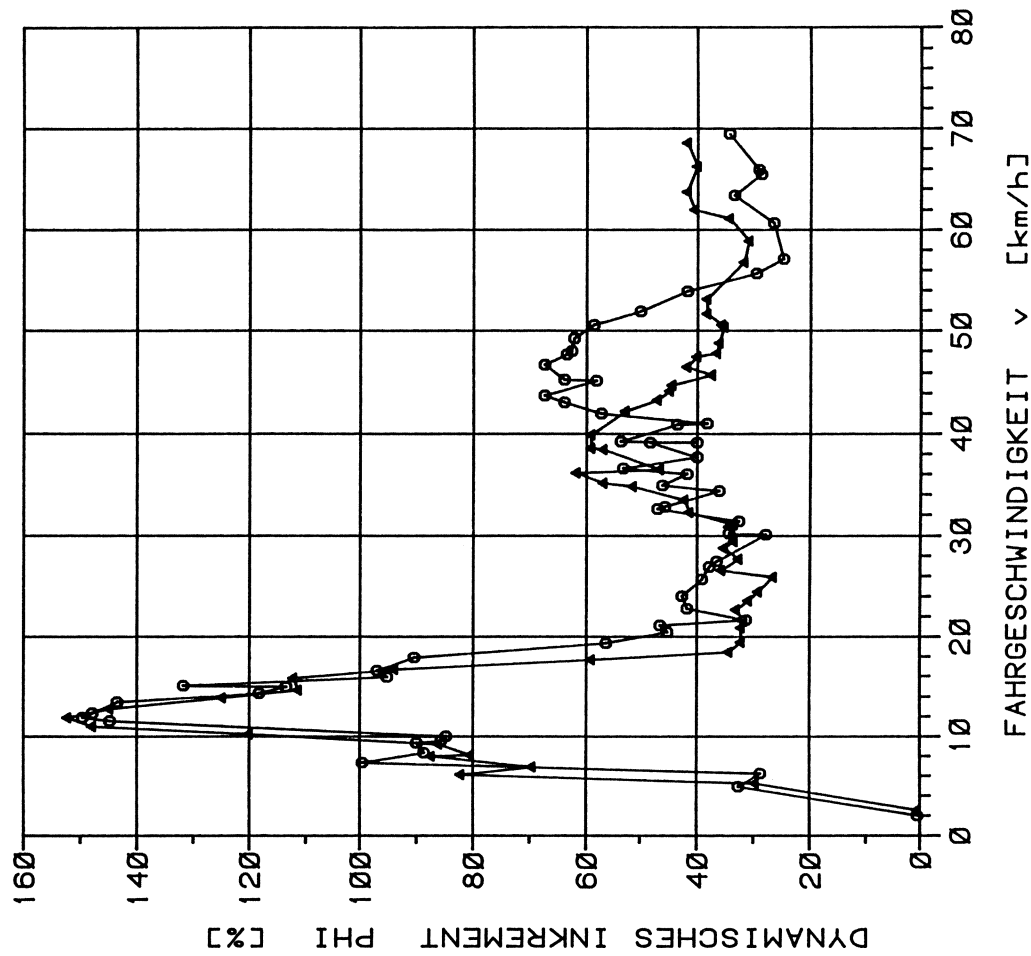
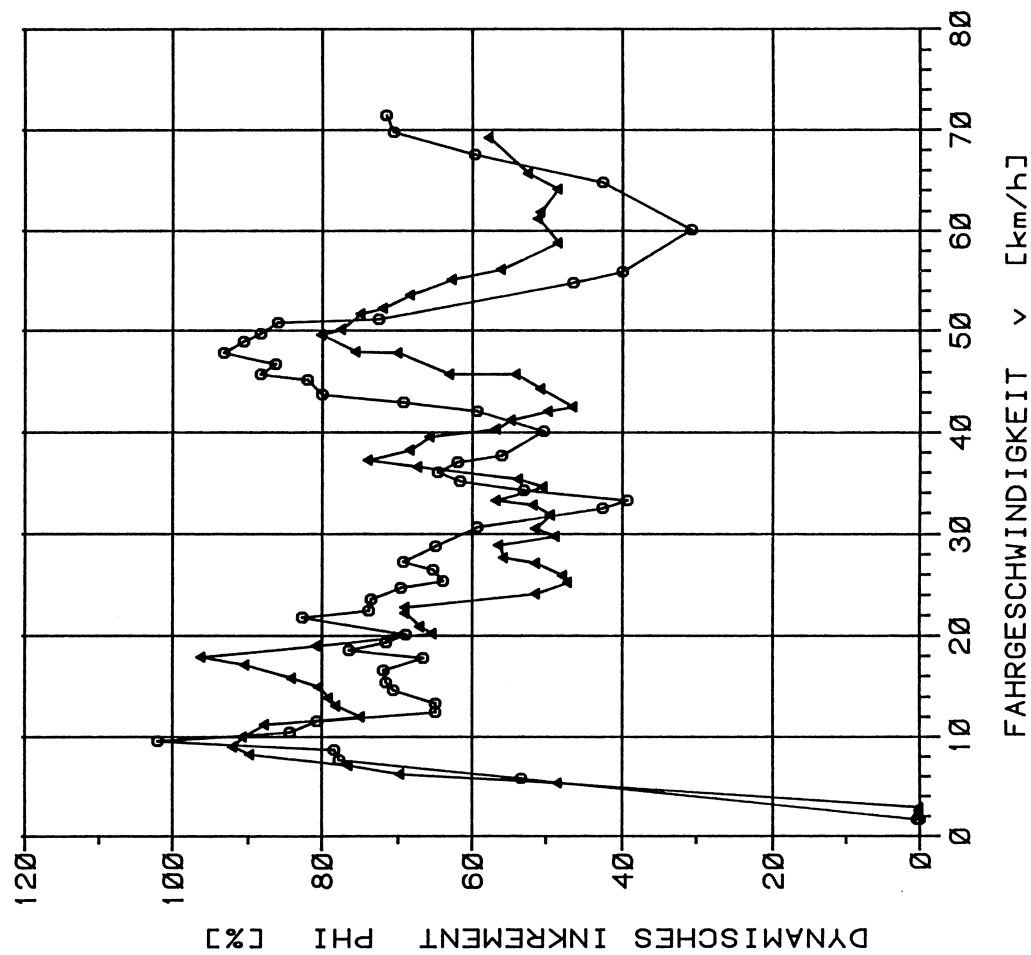
A8.43
A8.42

VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG Ø1

VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG Ø1

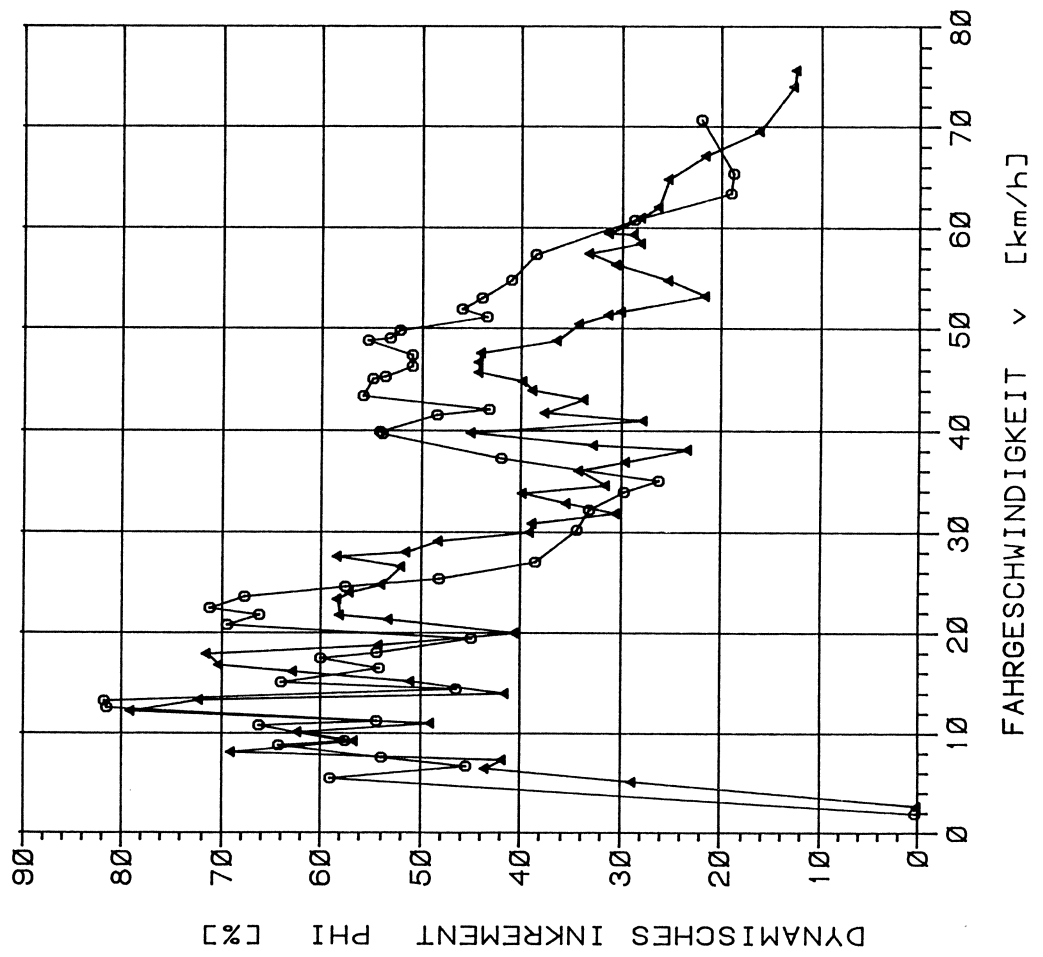
INSTRUM. SERIE ASTAT PHIMAX[%] BEI $v=[\text{km/h}]$
○ WG Ø1 14R 10 KmA -1.68 MM 102.03 9.5
▲ WG Ø1 14R 10 KmB -1.66 MM 96.09 17.9

INSTRUM. SERIE ASTAT PHIMAX[%] BEI $v=[\text{km/h}]$
○ WG Ø1 21R 10 KmA -2.84 MM 149.61 11.8
▲ WG Ø1 21R 10 KmB -2.84 MM 152.09 11.8



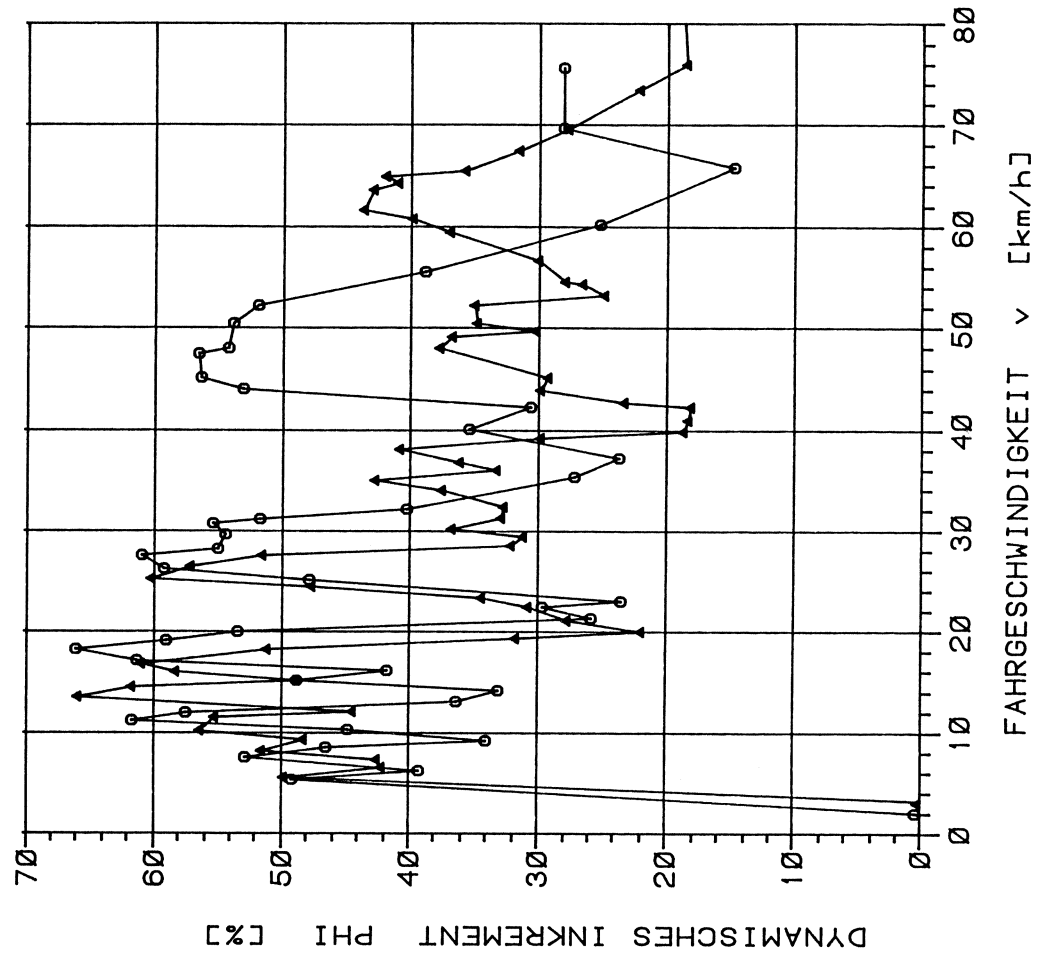
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	12R 1Ø AmA	-1.Ø3 MM	81.65
→	WG Ø2	12R 1Ø AmB	-1.Ø7 MM	79.Ø2
				13.1
				12.1



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, WG Ø2

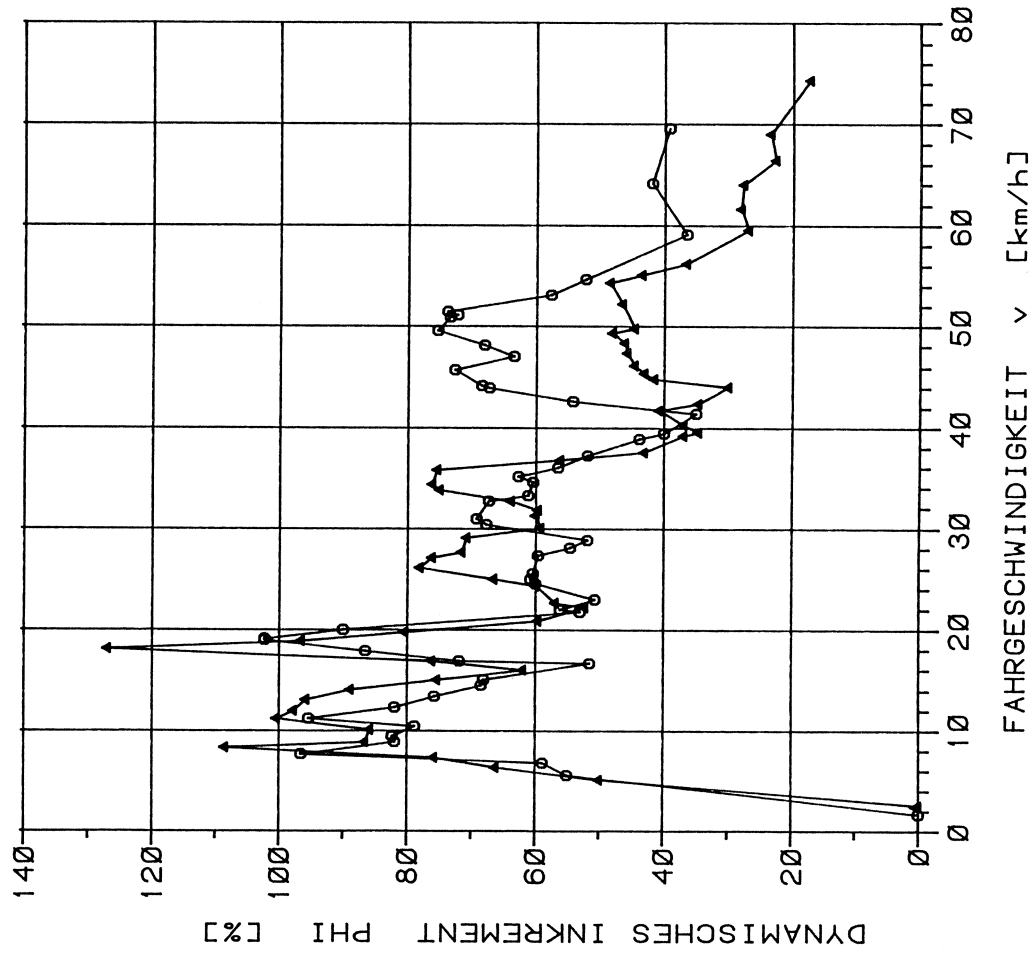
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	13R 1Ø AmA	-1.Ø3 MM	66.Ø4
→	WG Ø2	13R 1Ø AmB	-1.Ø5 MM	65.7Ø
				18.2
				13.5



A8.47
A8.46

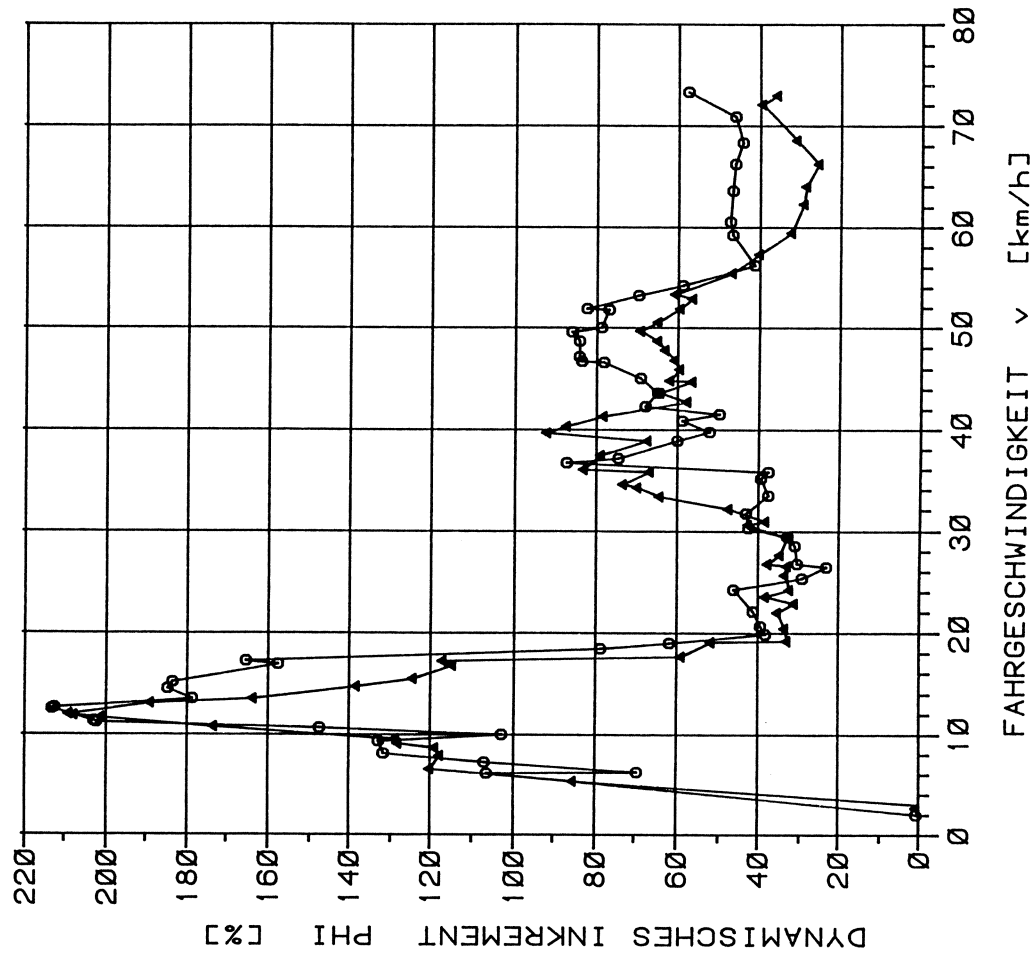
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	14R 10 AmA	-1.01 MM	19.0
▲	WG Ø2	14R 10 AmB	-1.01 MM	18.1



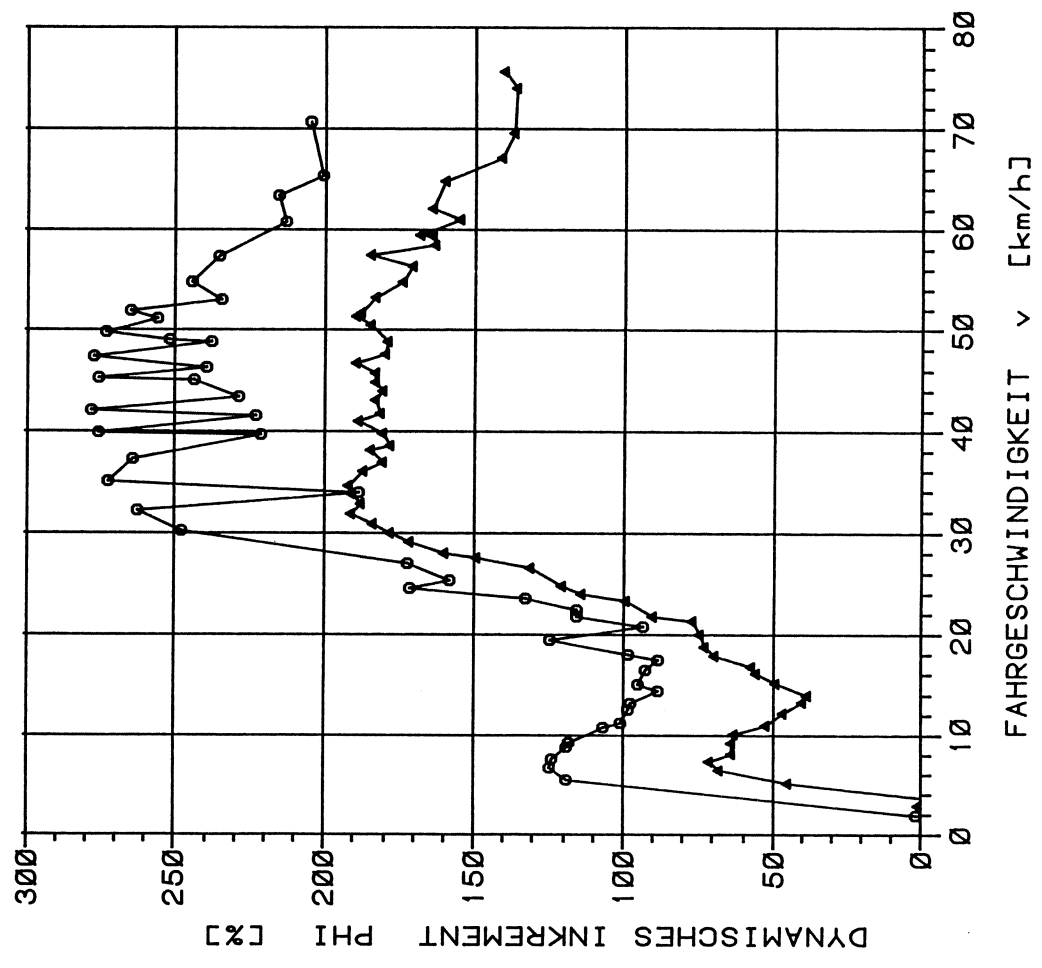
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, WG Ø2

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	WG Ø2	21R 10 AmA	-1.68 MM	12.5
▲	WG Ø2	21R 10 AmB	-1.68 MM	11.9



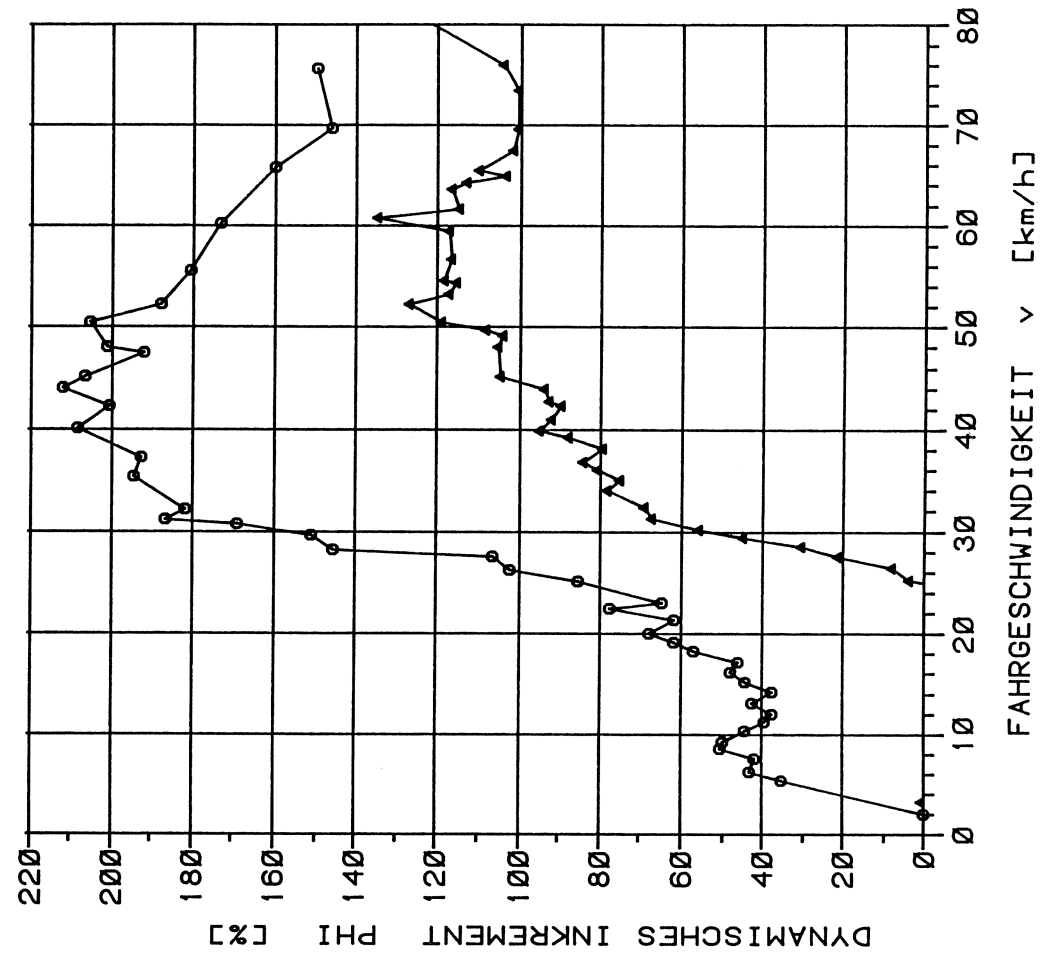
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 12R 10 AmA	5.62 MI	277.52	42.0
▲	DMS 42 12R 10 AmB	8.04 MI	191.23	34.5



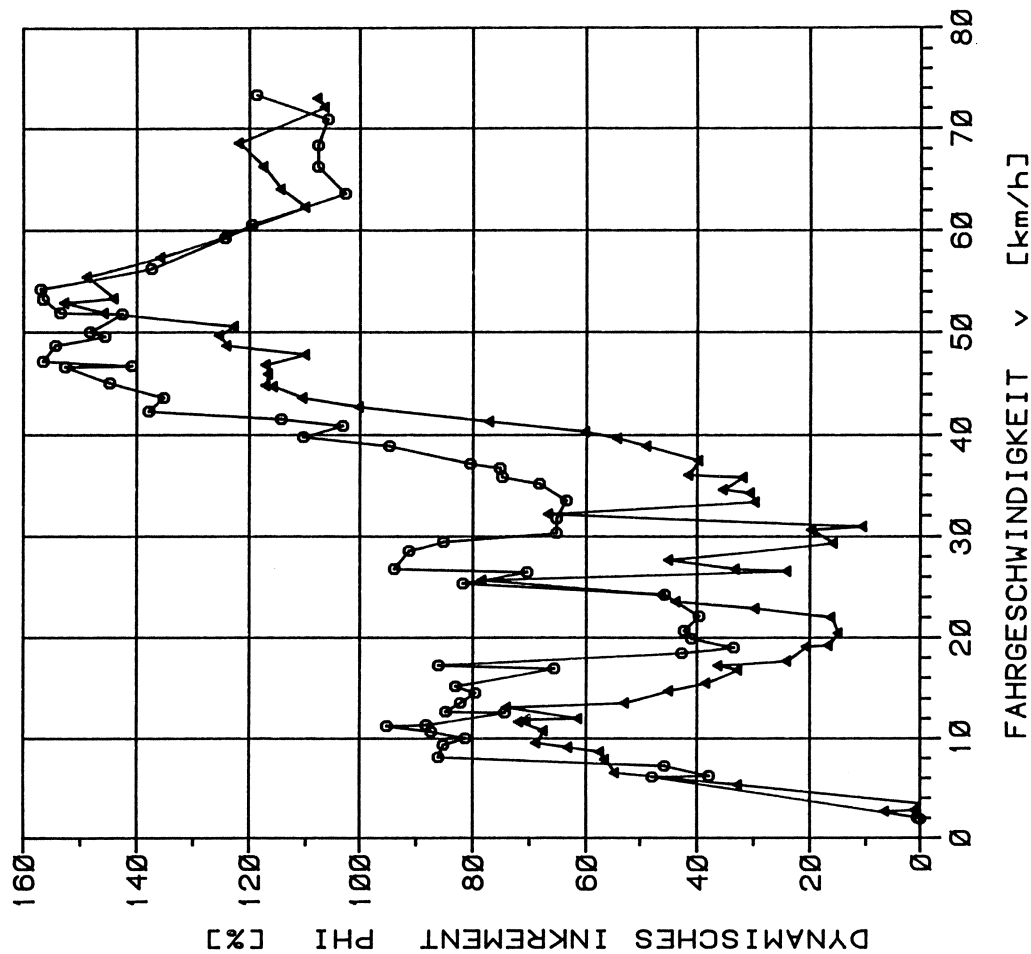
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42 13R 10 AmA	8.94 MI	211.67	44.0
▲	DMS 42 13R 10 AmB	9.70 MI	134.59	60.7



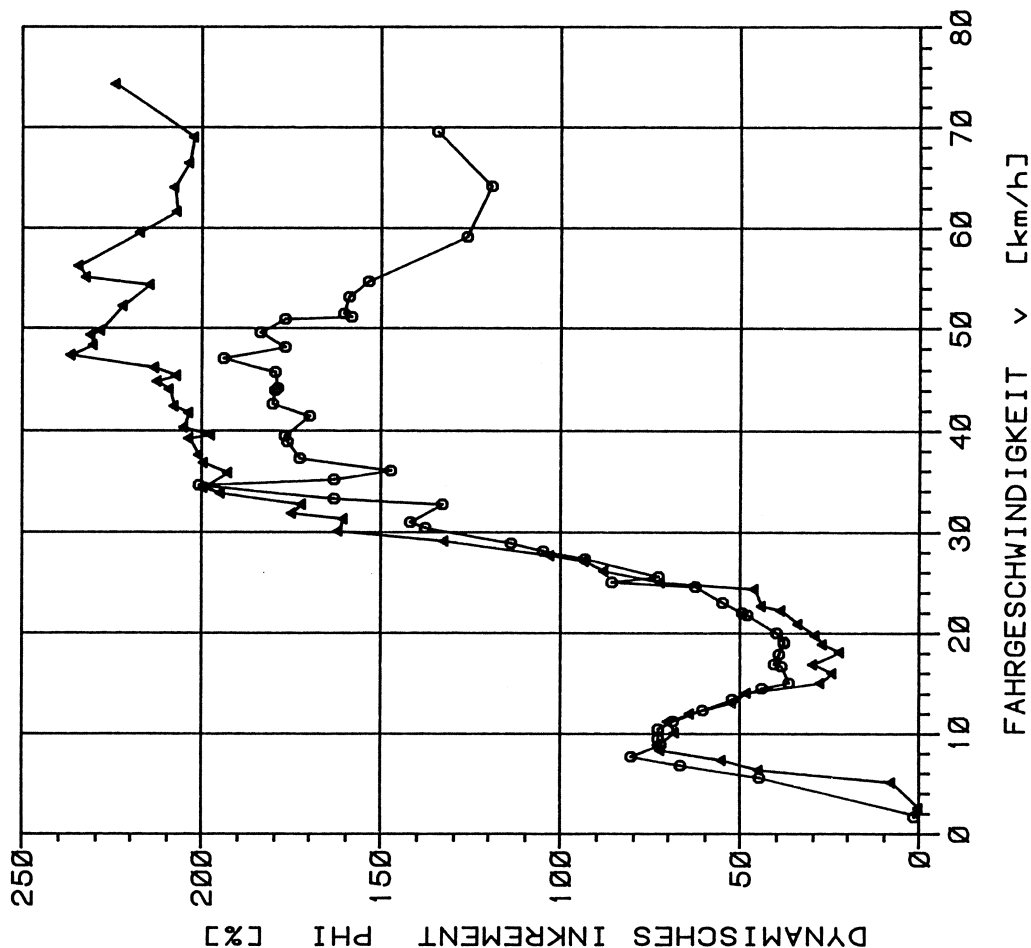
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 42

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	21R 10 AmA	10.25 MI	156.85
▲	DMS 42	21R 10 AmB	10.49 MI	152.59
				54.2
				52.8



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 42

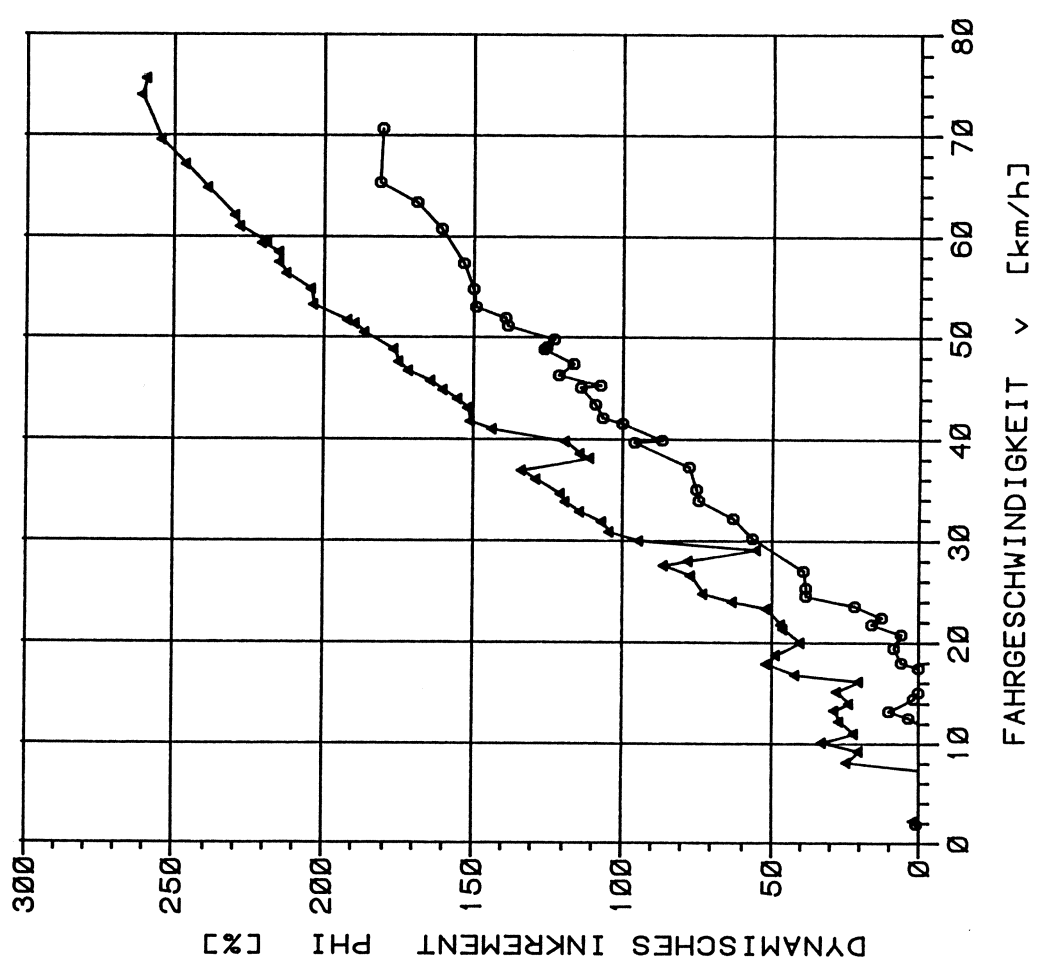
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 42	14R 10 AmA	9.17 MI	200.82
▲	DMS 42	14R 10 AmB	6.06 MI	236.58
				34.5
				47.3



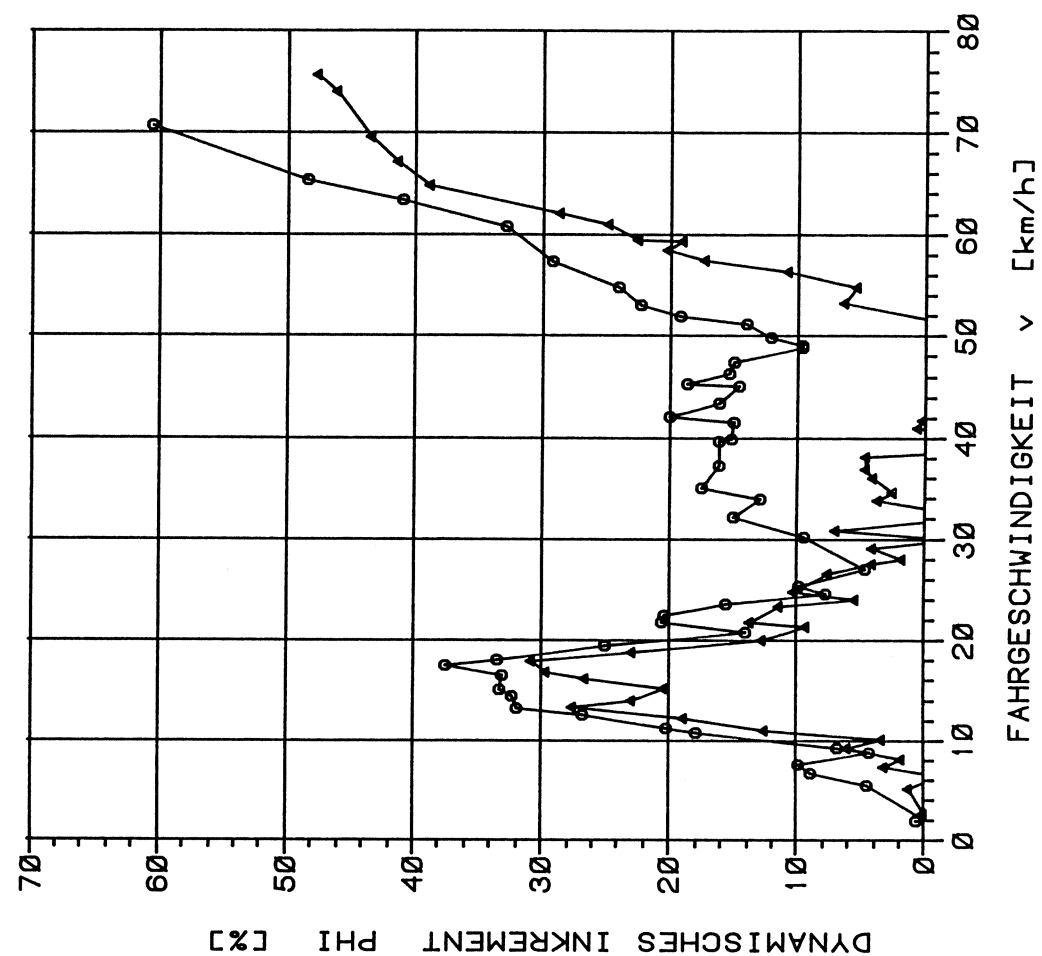
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS52+

VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	12R 10 AmA	16.57 MI	181.03	65.3
▲	12R 10 AmB	13.63 MI	260.30	74.0



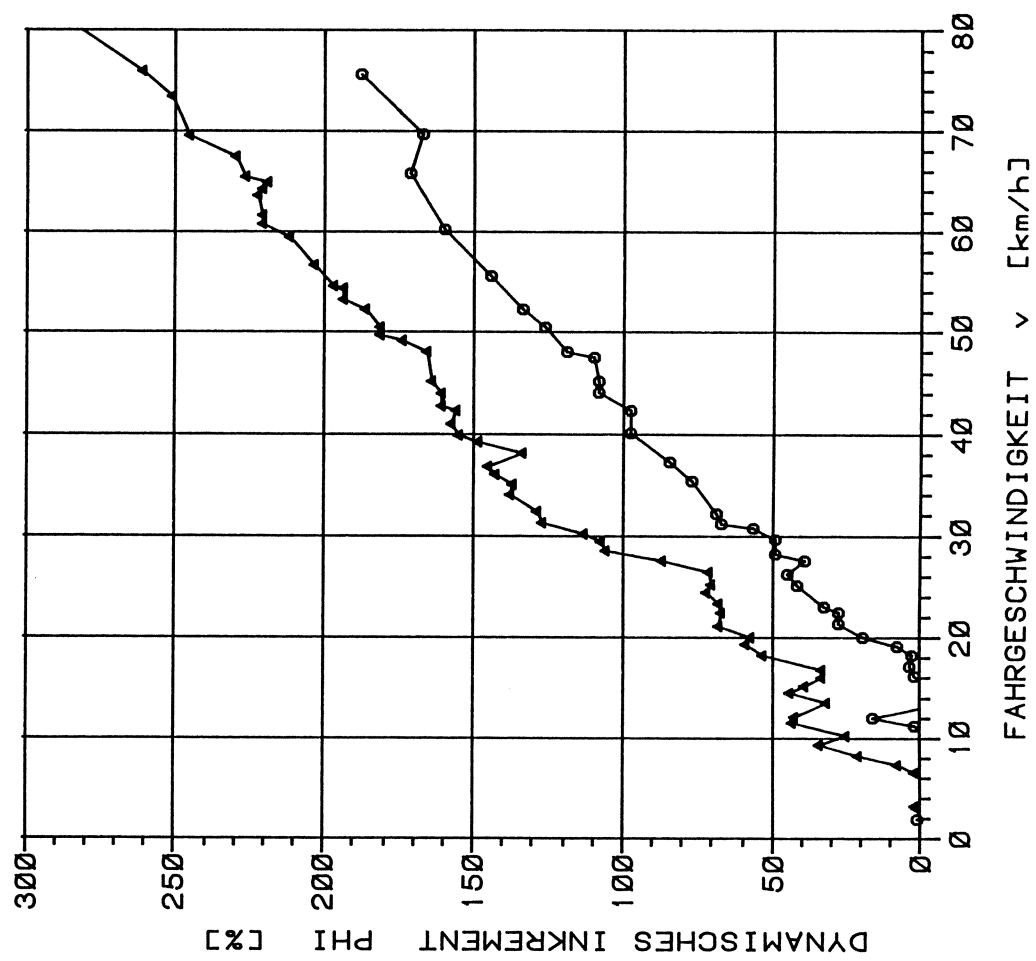
INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	12R 10 AmA	-16.78 MI	60.47	70.6
▲	12R 10 AmB	-17.87 MI	47.52	75.6



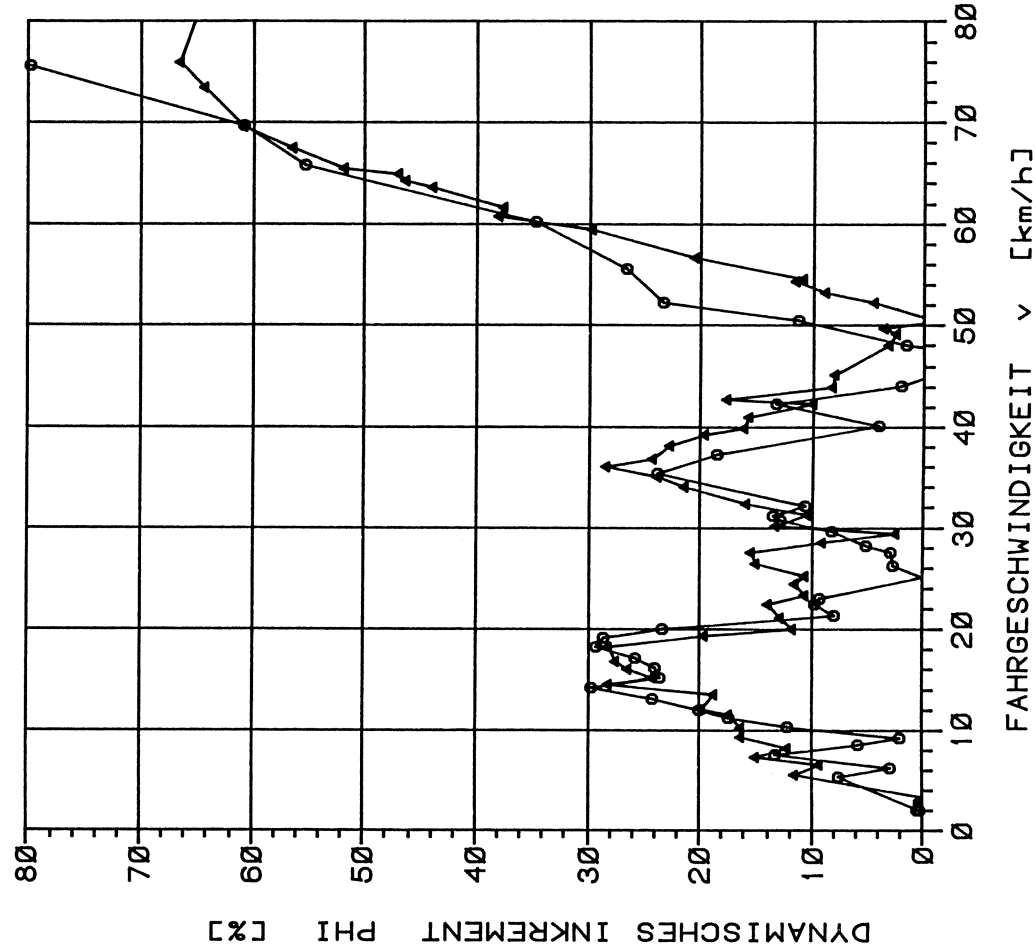
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 52+ VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 52-

A8.55
A8.54

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 13R 10 AmA	16.25 MI	187.43	75.6
▲	DMS 52 13R 10 AmB	13.11 MI	283.83	80.5

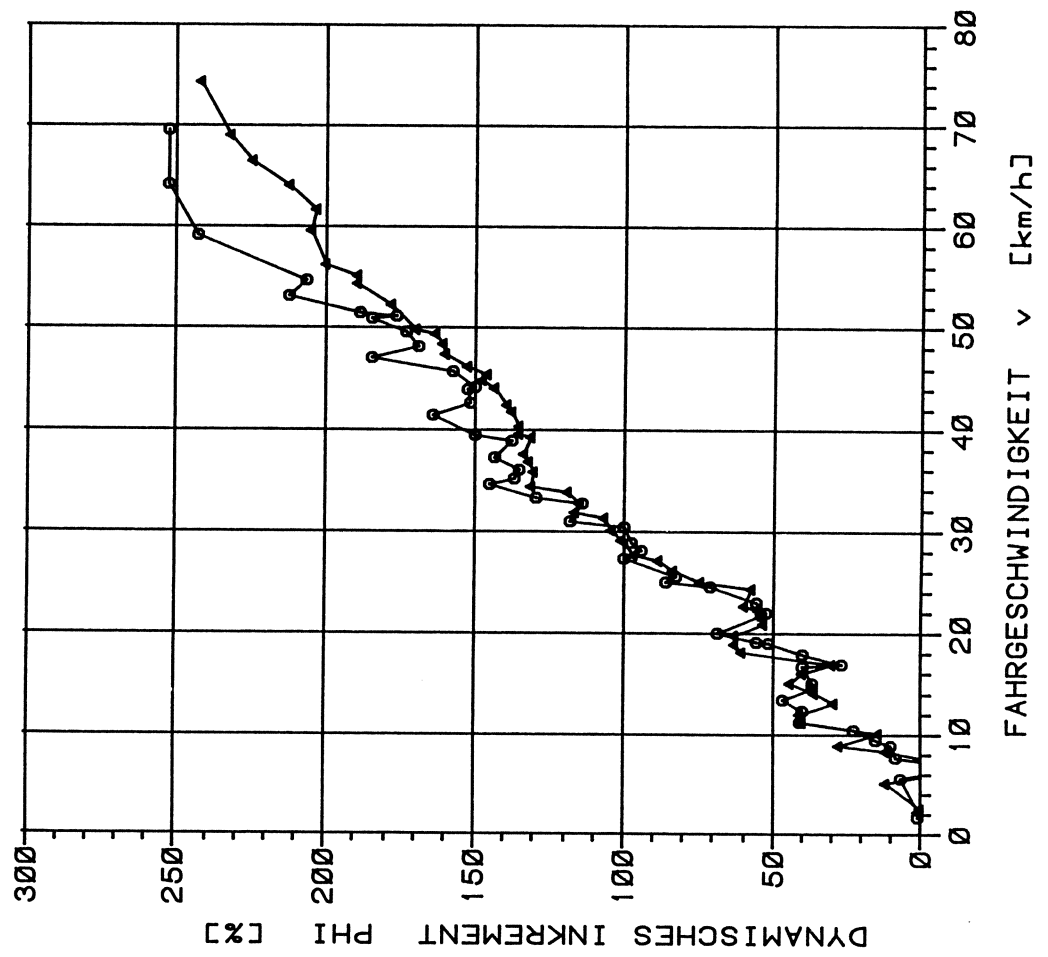


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 13R 10 AmA	-16.18 MI	79.84	75.6
▲	DMS 52 13R 10 AmB	-15.96 MI	66.48	75.9



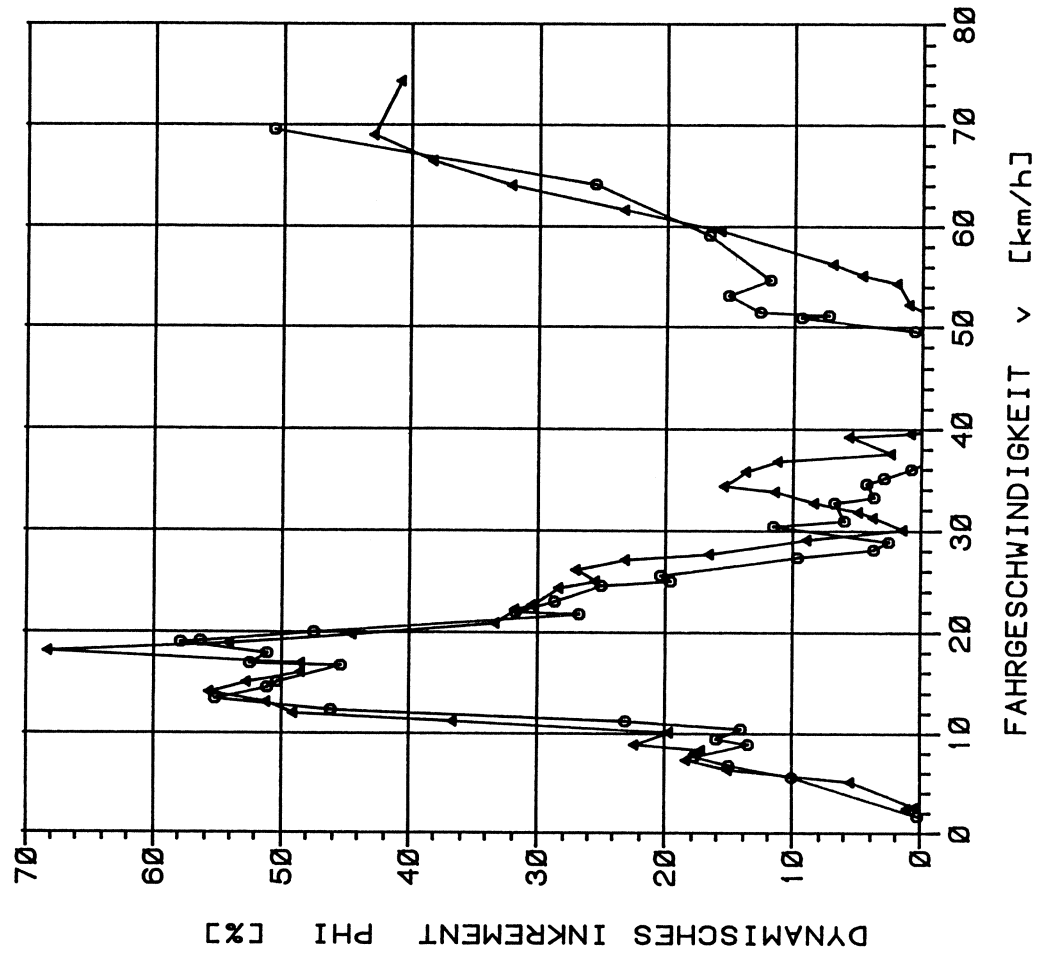
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 52+

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 14R 10 AmA	12.92 MI	252.70	69.5
▲	DMS 52 14R 10 AmB	14.35 MI	241.25	74.3



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 14R 10 AmA	-15.98 MI	57.81	19.0
▲	DMS 52 14R 10 AmB	-16.11 MI	68.04	18.1



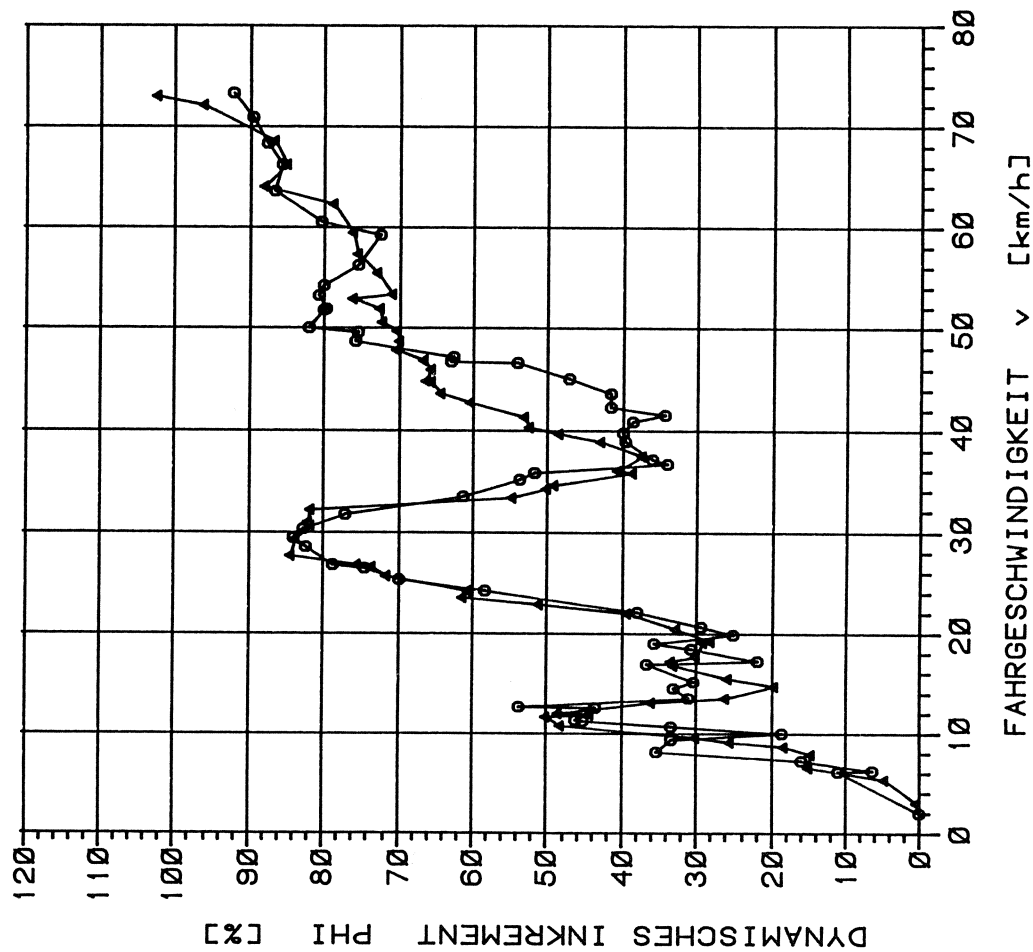
A8.59
A8.58

VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 52+

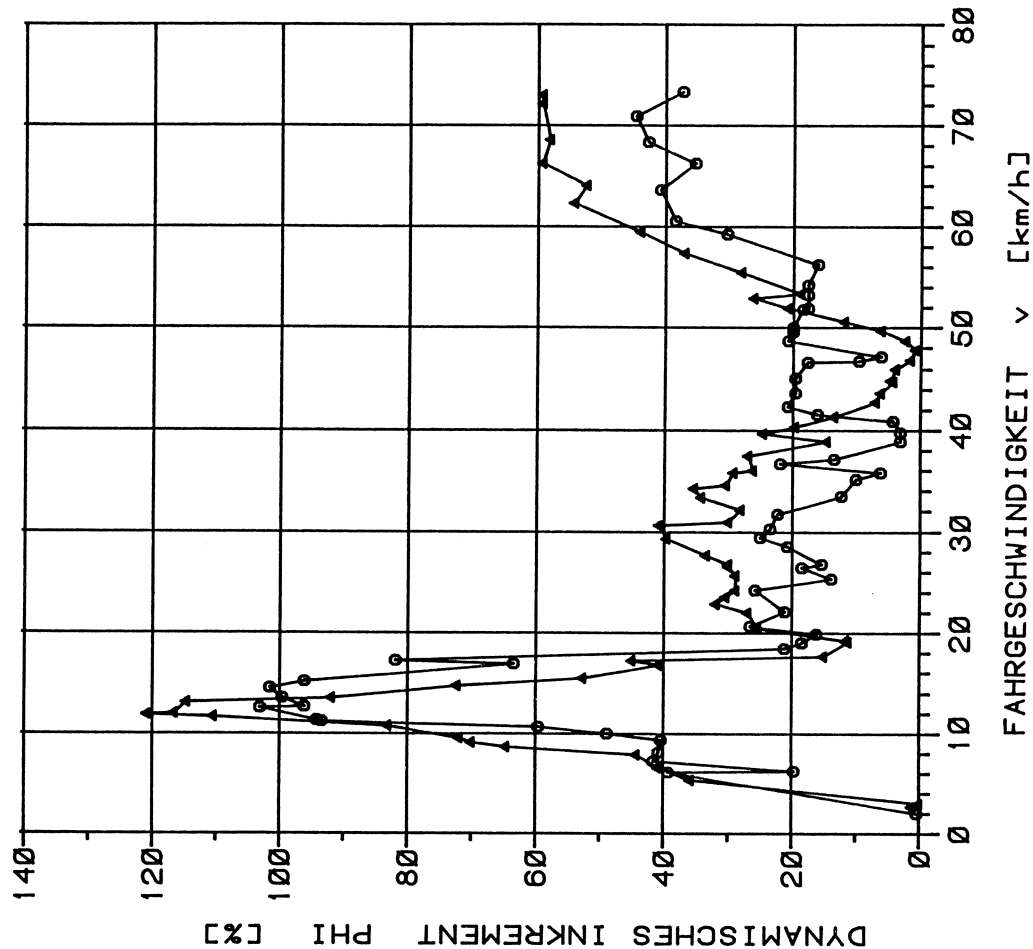
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 52-

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 21R 10 AmA	3.34 MI	919.60	73.2
△	DMS 52 21R 10 AmB	3.31 MI	1022.37	72.9

X10

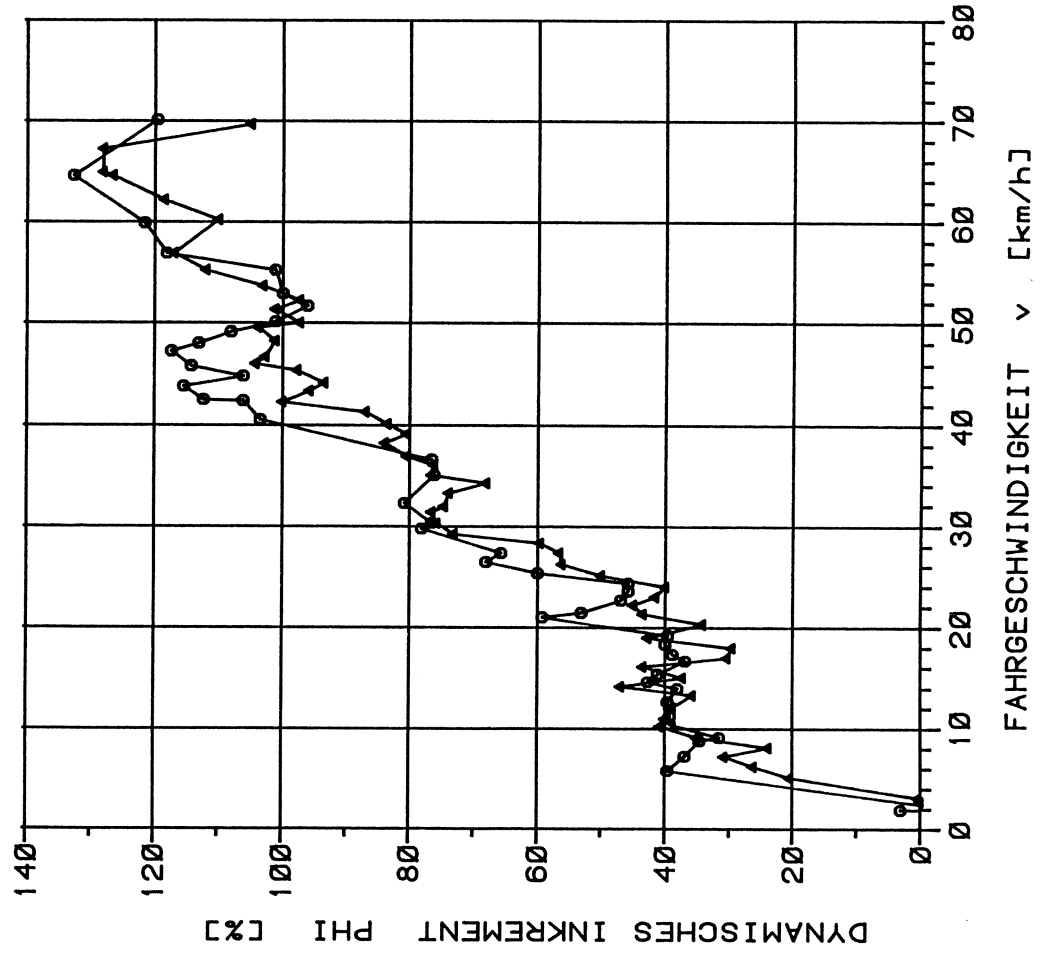


INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 52 21R 10 AmA	-23.58 MI	102.91	12.5
△	DMS 52 21R 10 AmB	-23.16 MI	120.43	11.8



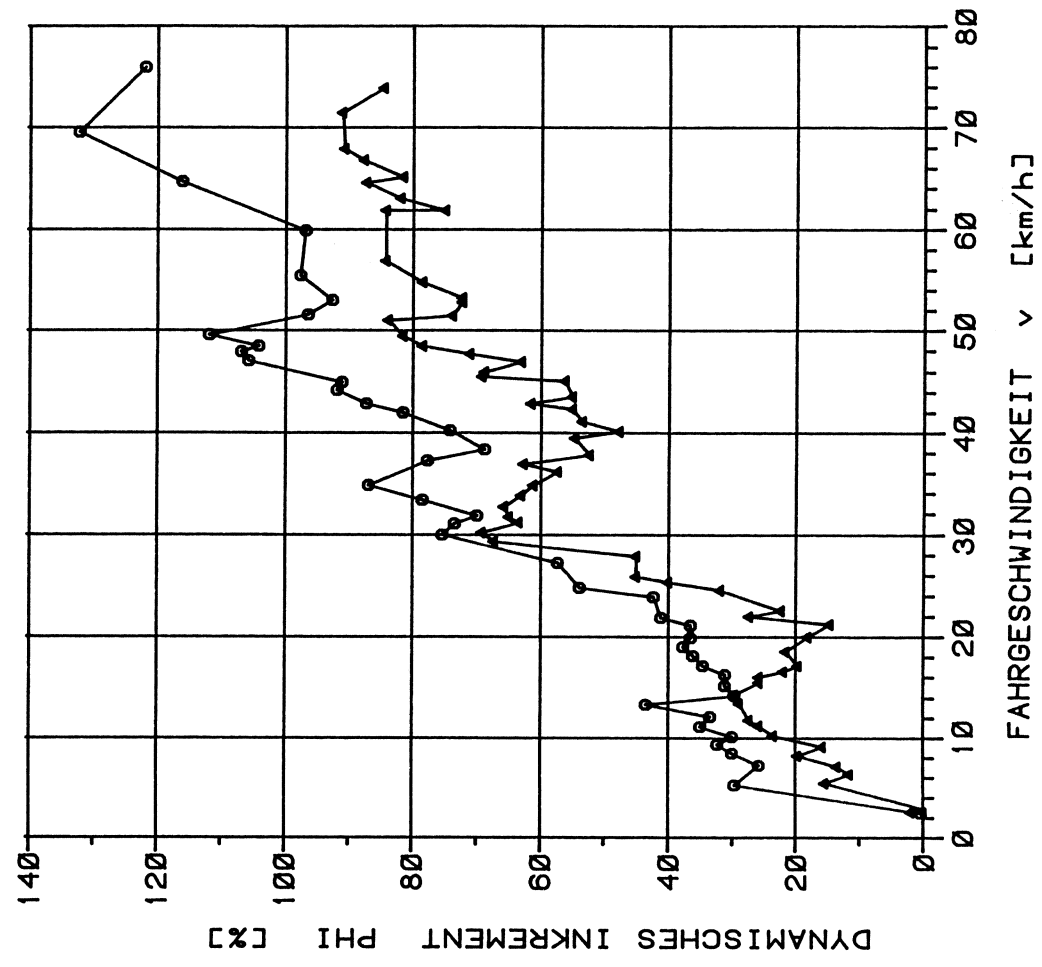
VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 12R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	12R 10 KmA	16.67 MI	132.17	64.5
▲	12R 10 KmB	16.74 MI	127.69	64.9



VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 13R, DMS 22

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22 13R 10 KmA	17.04 MI	131.78	69.6
▲	DMS 22 13R 10 KmB	17.04 MI	91.03	71.4

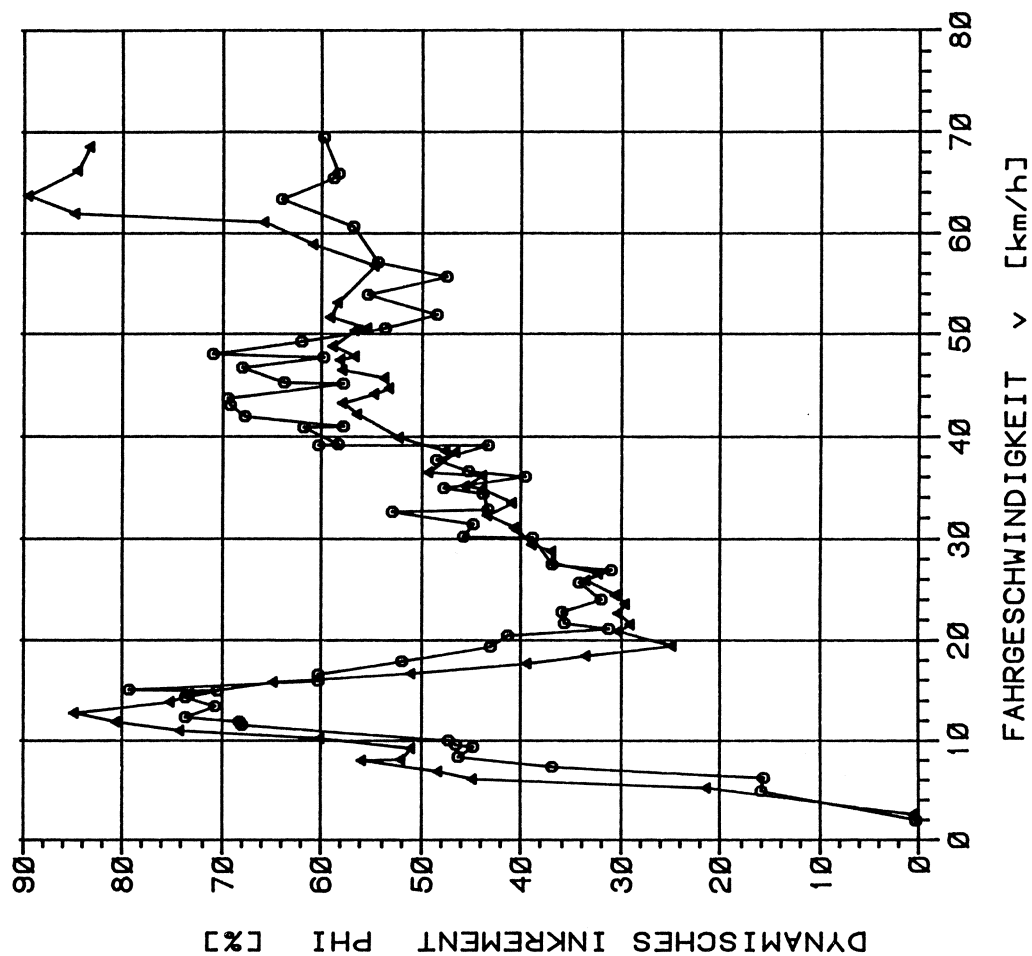


VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 21R, DMS 22

VAR. BELAGSEBENHEIT, FAHRZEUG 14R, DMS 22

A8.63
A8.62

INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22 21R 10 KmA	25.91 MI	79.19	15.0
△	DMS 22 21R 10 KmB	25.33 MI	89.29	63.7



INSTRUM.	SERIE	ASTAT	PHIMAX[%]	BEI v=[km/h]
○	DMS 22 14R 10 KmA	14.68 MI	146.53	67.5
△	DMS 22 14R 10 KmB	14.74 MI	156.34	69.2

