Schwingungsverhalten von Betonstrassen unter Anregung durch rollenden Verkehr

Comportement dynamique des structures routières avec revêtements en béton de ciment sous actions du trafic

Betonstrassen AG, 5103 Wildegg
Sulzer Innotec AG, Winterthur

Prof. W. Wilk, dipl. Ing. ETH
J. Eberl, dipl. Ing. TU Stuttgart
E. Kläui, dipl. Ing. ETH

Forschungsauftrag 10/89 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

März 1995

Zusammenfassung

Bei der Bemessung von Betonstrassenoberbauten sollten die heute noch weitgehend dominierenden statischen Ansätze durch eine dynamische Betrachtungsweise abgelöst werden. Daneben besteht bei geeigneten Methoden für die zerstörungsfreie Zustandsanalyse - im Sinne einer Schadensfrüherkennung - ein erheblicher Nachholbedarf. In einem ersten Untersuchungsschritt sollten dynamische Messungen bei künstlicher Anregung, wie auch unter Belastung durch definierte Verkehrslasten, Auskunft darüber geben, inwieweit sich bekannte Methoden der Strukturanalyse für die dynamische Modellbildung und die Zustandsanalyse von Betonstrassenoberbauten heranziehen lassen.
Die Ergebnisse der bisherigen Versuche und Auswertungsbetrachtungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die starke Dämpfung im Unterbau verhindert eine periodische Schwingungsanregung und damit die Anwendung des Werkzeugs „Modalanalyse".

- Die Bestimmung von Punktimpedanzen mit Hilfe der einfach anzuwendenden Impulserregung zeigt interessante Einblicke in das Systemverhalten und könnte somit bei der Modellierung, wie auch im Zusammenhang mit Fragen der Zustandsanalyse von Nutzen sein.

- Die Bewegungsdynamik des Fahrbahnoberbaues bei Belastung durch rollenden Verkehr ist gekennzeichnet durch sehr scharfe Beschleunigungsstösse beim Überfahren der Querfugen.

- Dehnungsmessungen an der Plattenoberfläche weisen auf einen komplexen zeitlichen und örtlichen Beanspruchungsverlauf unter Verkehrslast hin. Dabei dürfte insbesondere die Dehnungsgeschwindigkeit von weiterem Interesse sein.

Résumé

Pour le dimensionnement des superstructures de routes en béton, les évaluations statiques, aujourd'hui encore largement prédominantes, devaient être remplacées par des évaluations dynamiques. Il reste encore à effectuer un rattrapage considérable dans le domaine des méthodes d'analyse d'état non destructives - c'est-à-dire dans le sens de la détection précoce des dégâts. Dans une première phase, des mesures dynamiques faites sous des sollicitations imposées ainsi que sous des charges de trafic définies, devraient permettre de savoir dans quelle mesure les méthodes d'analyse structurelle connues sont adaptés à la modélisation dynamique et au diagnostic des ouvrages de superstructures de routes en béton. Les résultats des essais ainsi leurs interprétations peuvent être résumés comme suit:

- Le fort amortissement dans l'infrastructure empêche une excitation périodique par vibrations, et de ce fait, l'application de la méthode „analyse modale".

- La détermination des impédances ponctuelles à l'aide d'excitations d'impulsions, facile à appliquer, permet d'intéressantes observations sur le comportement du système, et pourrait donc être utile lors de la modélisation, ainsi qu'en par rapport avec les résultats de diagnostic de l'ouvrage.

- La déformation dynamique de la superstructure sous les sollicitations du trafic est caractérisée par de très brusques chocs lorsque des véhicules passent sur les joints transversaux.

- Les mesures de dilatation faites à la surface des dalles indiquent une variation complexe de la sollicitation due au trafic à la fois dans le temps et localement. La vitesse de dilatation pourrait cependant présenter en l'occurence un intérêt à suivre.

Inhaltsverzeichnis

		Seiten
A.	Einleitung / Prinzipielles	1
B.	Forschungsauftrag und -Ziele	3
C.	Teststrecke	5
D.	Messmethoden und Instrumentierung	5
E.	Messprogramm und -Geräte	6
F.	Auswertung der Messdaten	7
G.	Folgerungen	9
H.	Ausblick	10
	Literatur	11
	Bildverzeichnis	12
	Figuren- und Tabellenverzeichnis	13

1. Einleitung / Prinzipielles

1. Die rein analytischen Methoden zur Bemessung von Betonbelägen auf ihre Tragfähigkeit beruhen allesamt auf dem Modell „elastischer Platten auf elastischer Bettung" (elastische Platten auf isotropem, elastischem Halbraum). Auf sie, die Betonbeläge, werden demnach die Prinzipien der Elastizitätstheorie plattenartiger Tragwerke angewendet.

2. Die rein *statischen* Ansätze in dieser analytischen Betrachtungsweise sind heute noch dominant. Dies ist insoweit für Strassenbeläge unter rollender Verkehrseinwirkung unbefriedigend, als der Strassenoberbau (System aus: Belag + Fundationsschichten) eine tragende Struktur ist, die durch *zeit- und ort*sabhängige Belastungen beansprucht wird. Für solche Bedingungen ist die statische Betrachtungsweise indessen unzureichend, vielmehr müssen die *zeitabhängigen Verformungen* des Systems untersucht werden.

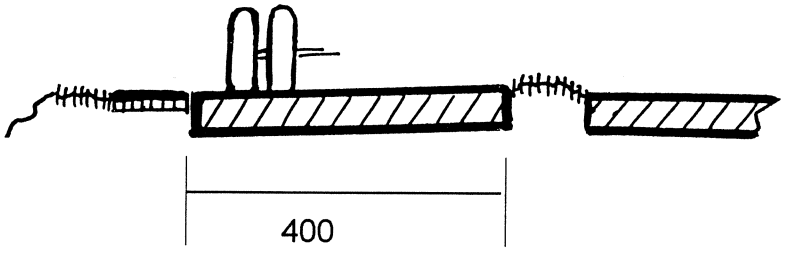
   Für solche Strassenoberbauten gilt:

   - Das Tragsystem unterliegt *dynamischer* Erregung,
   - im Verlaufe der Nutzungsdauer werden sich *Ermüdungserscheinungen* am System nicht nur an der Decke, vielmehr auch in den darunterliegenden Fundationsschichten und evtl. im Untergrund einstellen dadurch, dass zu den statischen Lasten *Trägheitskräfte* hinzukommen.

   Weiter ergibt ein Vergleich der Massenverhältnisse zwischen Lastgrösse und Eigengewicht des Tragsystems, dass Strassenbeläge *leichte* Tragstrukturen sind, verglichen mit solchen aus dem konstruktiven Ingenieurbau (Fig.1).

Verkehrslast = P

Eigengewicht Matte = g } P » g



1 Plattenlänge 550 cm
Plattendicke 20 cm

- gesetzliche max. Verkehrslast auf einer Platte = 2 x 28 t = 56 t
- Platteneigengewicht = rd. 11 t

Fig. 1 Massenvergleich zwischen Verkehrslastgrösse und dem Eigengewicht der dynamisch erregten Betonplatte

Dynamisch angeregte Systeme lassen sich in ihren Reaktionen auf äussere Belastungen durch *Schwingungsanalysen* verstehen und qualifizieren. Lit. hierzu s. (2) - (6).

3. Wenn die Voraussetzung des Vorliegens eines *schwingungsfähigen* Systems erfüllt ist, dann bilden Eigenfrequenzen, die zugehörigen Eigenformen und die Dämpfung (Eigenwerte) die natürlichen Eigenschaften eines solchen Systems. Sie sind als solche unabhängig von der zufälligen Anregung.

   Andererseits haben *Änderungen* am (schwingungsfähigen) System, z.B. Änderungen der Steifigkeit (Rissebildung) und der Massenverteilung, eine Änderung eben dieser Eigenfrequenzen und Eigenformen zur Folge.

4. Sollte sich erweisen, dass das Tragsystem *Betonbelag* Schwingungsanalysen (im vorliegenden Fall „Modalanalyse") unterworfen werden darf, so liessen sich *Systemveränderungen* im Verlaufe der Nutzungszeit im Rahmen einer Früherkennungsstrategie" (Zustandsüberwachung) feststellen.

   Damit ergäbe sich auch im Strassenbau eine neue Möglichkeit *zerstörungsfreier* Schadensfrüherkennung, denn durch die vergleichende Betrachtung von Antwortspektren, aufgenommen zu verschiedenen Zeitpunkten, würde man bei signifikanter, qualitativer Veränderung des Tragverhaltens des Strassenoberbaues auch signifikante Veränderungen der spektralen Abbildung erkennen.

   An dieser Stelle ist der erhebliche Unterschied im Informationsgehalt zwischen der „Modalanalyse" und den seit einiger Zeit bereits im Strassenbau eingesetzten „Schwingermessungen" (Dynaflect, Vibroflect, Falling Weight Deflectometer „FWD" u.a.) deutlich herauszustreichen:

   Mit der experimentellen *Modalanalyse* will man die zeitabhängigen Verformungen des Tragsystems untersuchen. Dabei geht es um die Koppelung dreier Elemente (Fig. 2):

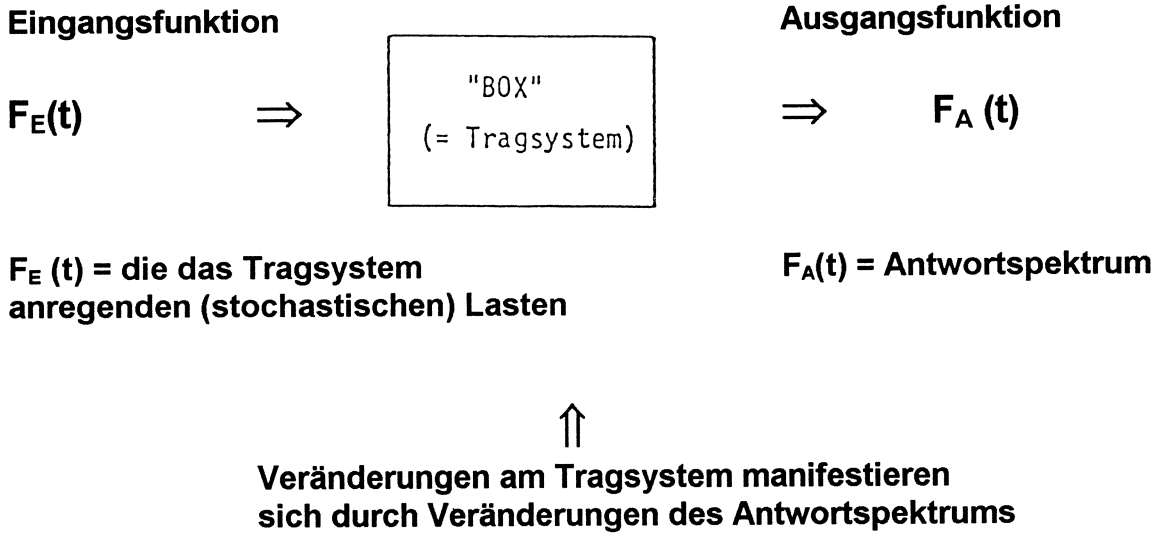


Fig. 2 Die drei Elemente des dynamischen Systems: Lastspektrum / Tragsystem / Antwortspektrum

Das Ausgangssignal (Bewegung der Platte) wird einerseits durch das dynamische Verhalten des Tragsystems (Platte) und andererseits durch die Erregung bestimmt.

Für alle weiteren Betrachtungen (Ermüdungserscheinungen / konstruktive Auslegung des Tragsystems) ist es von entscheidender Bedeutung, dass die *Dynamik des Tragsystems* bekannt ist (Separation von Erregung und Eigenverhalten der Tragstruktur).

- *Schwingermessungen* nun zeichnen nur die „Ausgangsfunktion" („Antwort" in Fig. 2) auf und dies bei einer einzigen Erregerfrequenz, deren Beziehung zu den Eigenfrequenzen rein *zufällig* ist.

- Die *Modalanalyse* hingegen erfasst das dynamische Verhalten der „box" über den ganzen, festgelegten Frequenz*bereich*. Ihr Informationsgehalt wäre um eine Dimension höher als alle anderen im Strassenbau eingesetzten dynamischen Messmethoden.

B. Forschungsauftrag und - Ziele

Der im Projekt vorgesehene, umfassende Katalog der Ziele, die *stufenweise* anzustreben vorgesehen war, bestand aus folgenden Teilaufträgen:

- Anwendung der *Modalanalyse* auf die stossartig beanspruchten Betonbeläge.
- Abklären aller messtechnischen und ökonomischen Fragen im Hinblick auf die Anwendung der Modalanalyse für die *Zustandsanalyse* bestehender Betonbeläge.

  (= Phase 1. Dazu gehört die Antwort auf die Frage, ob für Fremderregung des Systems sehr einfache Mittel, z. B. Hammerschlag von ca. 50 kg genügt oder andere Hilfsmittel wie elektrohydraulische Erreger erforderlich sind.)

- Entwicklung eines *Modells* für das schwingende System Betonstrassenoberbau in dem Sinne, dass man die entscheidenden *Einflussparameter* des Systems nicht nur qualitativ, auch quantitativ bewerten kann:
  → Fahrgeschwindigkeit der LKW
  → Art und Qualität der Fundationsschichten (Auflagebedingungen für die Betonplatten)
  → Geometrische Freiheitsgrade der Betonplatten:
    - Plattendicke
    - Verhältnis Breite/Länge der Platten

Es war *nicht* Absicht dieses Forschungsvorhabens, bestehende, in der Strassenbaupraxis angewandte „Schwingermethoden" durch eine neue, andere zu ersetzen. Vielmehr darum, ein wesentlich *vertieftes* Wissen um das Verhalten des ganzen Tragsystems unter dynamischen Lasten zu gewinnen.

Für die *erste Untersuchungsphase* galt als *Hauptziel* die Beantwortung der Fragen:

- Lässt sich das Verhalten des Betonstrassenoberbaues durch Eigenschwingungsvorgänge beschreiben und

- Welches sind gegebenenfalls die entsprechenden messtechnischen und finanziellen Aufwendungen hierfür.

Für die *erste Versuchskampagne* wurden drei *Teilaufgaben* formuliert:

- Künstliche Erregung einer isolierten Fahrbahnplatte, bei gleichzeitiger Erfassung einer für die modale Analyse geeigneten Messstellenbestückung.

- Gezieltes Befahren dieser Platte mit bekannten Verkehrslasten, mit einem Messumfang gemäss Modalanalyse.

- Punktimpedanzmessungen an den instrumentierten Plattenstellen, mittels eines speziellen Erregerhammers.

Die Gegenüberstellung von Modalanalyse - mit den Ergebnissen Eigenfrequenzen und Eigenformen - sowie Verkehrslastmessdaten sollte Auskunft darüber geben, wie weit die verkehrsbedingte Fahrbahndynamik durch Eigenschwingungen charakterisiert werden kann.

Bei den Punktimpedanzmessungen ging es zunächst einmal darum, die Brauchbarkeit des sehr einfach anzuwendenden Erregerwerkzeuges Impulshammer für die Gewinnung dynamischer Antworten des Strassenoberbaus zu prüfen. Erst in einem weiteren Schritt - verbunden mit systematischen Messungen dieser Art - wäre dann zu befinden, ob solche Impulsantworten ein taugliches Mittel für die zerstörungsfreie Zustandskontrolle (insbesondere auch des Unterbaus) darstellen.

Aufgrund erster Auswertungen der Verkehrslastversuche wurde eine Ergänzung der Aufgabenstellung beantragt (VSS-Auftrag 2/88). Eine minimale Bestückung der Betonplatte mit Dehnmessstreifen (DMS) sollte aufzeigen, inwieweit sich die festgestellten Stösse an den Querfugen in den Biegespannungen wiederfinden.

C. Teststrecke

Bei der Auswahl der Teststrecke mussten primär folgende Forderungen gestellt werden:

- Sicherheitsrisiken minimal (Absicherungsmassnahmen auf öffentlichen Strassen kompliziert und kostspielig).
- Ausreichende Beschleunigungs- und Auslaufstrecke für vollbeladene (28 t) Lastwagen mit 80 km/h.

Diese Hauptforderungen - zusammen mit einigen weiteren vorteilhaften Eigenschaften (Energieversorgung, Plazierung peripherer Instrumente etc.) - konnten an einer Werkszufahrt zur Zementfabrik Holderbank, in Holderbank (AG), erfüllt werden.

Die im Zeitpunkt der Tests 26 Jahre alte Betonstrasse ist gesamthaft 6 m breit, 2-spurig im Gegenverkehr und weist Einzelplattenabmessungen von 10 m Länge (leicht bewehrt mit Drahtnetzen) und 3 m Breite auf.

Im Sinne einer „Modellierung" des Tragsystems besteht dieses hier aus:

System = Einzelplatte + „Randstörungen"

↑

Einflüsse der Nachbarplatten

Für die „Betriebsmessungen" (Messung der zeitabhängigen Eigenwerte unter Verkehr) und die „Modalanalyse" (Eigenwerte) sah man deshalb vor:

1. Messungen an der freien Einzelplatte (die Platte in allen Fugen durchtrennen, auf ihre gesamte Dicke, sie von den Randstörungen befreien) und

2. Messungen am verdübelten, verzahnten System (*inkl.* Randstörungen).

An Ausführungsdaten ist für die „Messplatte" im einzelnen noch bekannt:

Unterbeton: (PC 250) 13 cm dick
Oberbeton: (PC 350) 5 cm dick
Querfugen: Typ Kv
Betoniert zwischen November 1961 und Juli 1962. Fundationsmaterial im Messplattenbereich ist ungebundener Wandkies.

D. Messmethoden und Instrumentierung

Ausgehend von den Erfordernissen der Modalanalyse wurde die Messplatte mit einer Matrix von 9 piezo-elektrischen Beschleunigungsaufnehmern bestückt. Für die Erfassung der verkehrsbedingten Vorgänge im Querfugenbereich war diese Bestückung noch um je 2 Aufnehmer in den benachbarten Platten zu erweitern.

Mess-Sonden in der oberen Fundationsschicht sollten zusätzlich Informationen über die Kopplung zwischen Betonplatte und Unterbau liefern. Auf die ursprünglich vorgesehene dritte Messebene wurde verzichtet, da Sondierbohrungen keine weitere signifikante Schichtung des Unterbaus erkennen liessen. Alle diese Messstellen sind ausschliesslich für die Erfassung der vertikalen Bewegungsgrössen ausgerüstet. Als Zeit- und Ortsreferenz war auf der Fahrbahn eine Triggerschwelle montiert. Während der ersten Messkampagne war diese 10 m (Ausschaltung möglicher Messstörungen) vor der Messplatte plaziert. Zwecks genauer Zuordnung von Fahrzeugachse und Querfugenstoss wurde für die zweite Versuchsphase eine Verschiebung entsprechend Fig. 4 vorgenommen.

Im Zusammenhang mit dem Ergänzungsvorhaben 2/88 wurde die Instrumentierung noch um eine Kette von 6 Dehnmessstreifen ergänzt.

Fig. 3 und 4, sowie den Bildern 3,4,5 entnimmt man den Gesamtumfang der strassenseitigen Instrumentierung, ebenso massliche Einzelheiten.

E. Messprogramm und -Geräte

Die experimentellen Untersuchungen lassen sich in drei Teilbereiche gliedern:
- Modalanalyse der Gesamtplatte (von den Randstörungen befreite, 3 m breite Platte)
- Lokales Impulsantwortverhalten (Punktimpedanzen)
- Bewegungs- und Dehnungsmessungen unter Verkehrslast

Der ursprünglich vorgesehene Versuchsumfang wurde im Mai 1987 abgewickelt. Eine ergänzende Messkampagne - insbesondere die Dehnungsmessung - fand im Mai 1988 statt.

1. Modalanalyse

   Für die Datenerfassung zur Modalanalyse wurde der Platte mittels eines elektrohydraulischen Rüttlers (Bild 1) ein bandbegrenztes Rauschsignal aufgeprägt. Der Erreger war dabei nahe Messpunkt 1 angeordnet. Bei jeweils simultaner Erfassung der erregenden Kraft und aller 18 Bewegungsmessgrössen wurden mehrere Versuche mit unterschiedlicher Stärke der Erregung gefahren (Versuchsdatum 20.5.1987).

2. Antwortverhalten bei Impulserregung

   Im Hinblick auf einfach durchzuführende Messungen zur Zustandsanalyse wurden Versuche mit Impulserregung vorgesehen. Als Erreger diente ein 6 kg schwerer Hammer mit Kraftmesszelle. Die auswechselbare Hammerspitze erlaubt eine Beeinflussung der Impulsdauer (und damit des Erregerspektrums).

   Im Rahmen der ersten Versuchskampagne wurden derartige Messungen (5 Mittelungen) an allen 13 Oberflächenmessorten durchgeführt, unter Verwendung einer mittelharten Gummispitze (Versuchsdatum 22.5.1987).

Im Prinzip sind alle 18 Messstellen simultan aufgezeichnet; auswertbare Signale ergeben sich allerdings nur innerhalb einer begrenzten Nachbarschaft zum Schlagort.

Anlässlich der zweiten Messkampagne (Versuchsdatum 25.5.1988) wurden in analoger Weise Versuche mit Gummispitze (wie früher) und harter PVC-Spitze (10 Mittelungen) angestellt. Der Messstellenumfang war dabei auf die Querfugenumgebung gemäss Fig. 4 beschränkt. Die Messaufzeichnungen beinhalten entsprechend auch die DMS-Signale.

3. Dynamische Belastung durch rollenden Verkehr

Für die Untersuchungen mit Verkehrslast wurden 2 beladene Lastwagen (Bild 2) mit bekannten Daten herangezogen (kein normaler Zufallsverkehr).

Fahrzeug A (LWA):
Schwerlastwagen mit 3 Achsen
Typ DAF 2800/310 PS
Gesamtmasse 24'100 kg (Mai 1987) bzw. 24'200 kg (Mai 1988)
Achsabstände 234 cm und 136 cm
Fahrzeug B (LWB):
Schwerlastwagen mit 3 Achsen
Typ SCANIA 112H
Gesamtmasse 26'300 kg

Die richtungskonforme Anregung der Messplatte erfolgte ausschliesslich durch Fahrzeug A, während der LWB lediglich für Zusatzversuche mit Belastung der Gegenfahrbahn im Überhol- bzw. Kreuzungsvorgang diente. Messungen mit dem LWA wurden bei den Fahrgeschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h durchgeführt. Die Messungen der ersten Versuchskampagne (Versuchsdatum 21.5.1987) umfassen alle 18 Beschleunigungsaufnehmer, diejenigen der zweiten Versuchskampagne (Versuchsdatum 26.5.1988) nur den Bereich gemäss Fig. 4.

F. Auswertung der Messdaten

1. Modalanalyse

Der Fahrbahnoberbau lässt sich *nicht* zu periodischen Schwingungen anregen. Eine Beschreibung des Systems durch Eigenschwingungen ist deshalb nicht möglich. In der Fig. 5 ist die dynamische Nachgiebigkeit (Weg pro Krafteinheit) über der Frequenz dargestellt. Dem Ergebnis mit Rüttler-Erregung ist noch ein im Frequenzbereich um eine Dekade erweitertes Resultat aus den Hammerschlagversuchen gegenübergestellt. Darin zeigt sich, dass das zunächst federartige Verhalten (Frequenzen unter etwa 100 Hz) ohne Resonanzüberhöhung in eine Massencharakteristik übergeht.

Bemerkenswert ist der kleine Wert der wirksamen Masse (modale Masse), gemessen an der gesamten Plattenmasse. Die Auswertung der Phasengänge an den unterschiedlich weit vom Erregungsort entfernten Messstellen zeigt recht deutlich das Laufzeitverhalten von frequenzabhängigen Biegewellen (Fig. 6).

2. Vertikalbewegung unter Verkehrslast

Die Auswertungen der dynamischen Bewegungsgrössen unter Belastung durch rollenden Verkehr zeigen, dass auch hier Eigenbewegungen (im Sinne eines freien Ausschwingens) nicht relevant sind. Vielmehr treten beim Überfahren der Querfugen sehr scharf akzentuierte Stösse auf (bis etwa 1,5facher Erdbeschleunigung). In den Fig. 7 bis 12 ist der gesamte Belastungszyklus am Beispiel der Messstellen entlang dem Fahrbahnaussenrand, für die drei Fahrgeschwindigkeiten 40,60 und 80 km/h dargestellt. Fig. 13 zeigt vergrösserte Ausschnitte der Beschleunigungsstösse beim Überfahren der Anfangsquerfuge mit der ersten Achse. Diese Diagramme lassen deutlich das spiegelbildliche Wechselspiel der beiden Fugenseite erkennen (MP12 wird entlastet, MP7 wird belastet). Aus der zeitlichen Zuordnung zur 0,5 m entfernten Triggerschwelle geht eindeutig hervor, dass der am MP7 angezeigte Abwärtsstoss mit dem Überfahren der Querfuge zusammenfällt, bei gleichzeitig schwach ausgeprägter Aufwärtsbewegung am MP12. Der sich um eine konstante Fahrstrecke (nicht Zeit!) verzögert einstellende spiegelbildliche Schlagvorgang kann nicht zweifelsfrei erklärt werden.

3. Dehnungsmessungen unter Verkehrlast

In den Fig. 14 bis 16 sind die Signale aller 6 Dehnungsmessstellen, für die Fahrgeschwindigkeit 40, 60 und 80 km/h zusammengestellt. Aus dieser Übersicht ist zunächst zu entnehmen, dass die Längsdehnungen - gemessen an den extrem kurzen Fugenstössen - einen quasistatischen Charakter haben. Die Maximalamplituden erweisen sich als weitgehend unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit, während die Zeitachse ein Abbild der Geschwindigkeit ist. Die zeitliche Folge von Maximalausschlägen entspricht der Belastungssequenz durch die 3 Fahrzeugachsen. Aus der Triggerzuordnung geht hervor, dass die Negativ-Maxima (Druckspannungen) mit dem Passieren der Fahrzeugachse am jeweiligen Messpunkt zusammenfallen. Der Wechsel von Druck- und Zugspannungen *widerlegt andererseits klar die Vorstellung von einer kragbalkenartigen Beanspruchung der Randzonen.* Vielmehr ist wohl eher von Beulungsvorgängen auszugehen. Die im Beschleunigungsmass sehr ausgeprägten Querfugenstösse sind in den Dehnungsverläufen nicht feststellbar. Allerdings muss hier einschränkend bemerkt werden, dass die entsprechenden Querfugenstösse (Messkampagne 1988) wesentlich schwächer waren als anlässlich der Messung 1987.

Eine Betrachtung der Dehnungsänderungsrate liefert insofern interessante Ergebnisse, als die gemessenen Maximalwerte (1×10^{-3} s^{-1}bei 80 km/h) s. Fig. 17 oben, um Grössenordnungen höher liegen als in der Literatur [1] angegeben wird, s. Tafel 1.

Ursache der Belastung	Dehnungsgeschwindigkeit, s^{-1}
Verkehr	10^{-6} ... 10^{-4}
Gasexplosion	$5 . 10^{-5}$ ... $5 . 10^{-4}$
Erdbeben	$5 . 10^{-3}$ ... $5 . 10^{-1}$
Rammen von Pfählen	10^{-2} ... 10^{0}
Flugzeugaufprall	$5 . 10^{-2}$ ... $2 . 10^{0}$
Harter Stoss	10^{0} ... $5 . 10^{-1}$
Höchstgeschwindigkeitsstoss	10^{2} ... 10^{6}

Tafel 1: Beton unter Stossbelastung [1]

4. Versuche mit Impulserregung

In den Fig. 18 bis 20 sind die Beschleunigungsantworten aus den Hammerschlagversuchen im Fugenbereich gemäss Fig. 4 zusammengestellt. Dabei sind alle Resultate mit Gummispitze auf einen einheitlichen Erregungsscheitelwert von 5000 N, diejenigen mit PVC- Spitze auf 20000 N korrigiert. Im Vergleich der Gummihammer-Ergebnisse von 1987 und 1988 zeigen sich markante quantitative sowie auch gewisse qualitative Unterschiede. Darin manifestieren sich wohl recht deutlich die unterschiedlichen Untergrundeigenschaften. Eine weitere bemerkenswerte Feststellung besteht darin, dass die *Impulsdauer* (Härte) des Fugenstosses bei den LW-Versuchen sehr viel mehr derjenigen eines Hammerschlages mit harter PVC-Spitze entspricht, als der erwarteten Ähnlichkeit mit einem Gummihammerschlag (Fig. 21). Im Hinblick auf Modellierungsfragen sind einige Eckpunktdaten in Fig. 22 und 23 im Frequenzbereich dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, zeigt diese Darstellung ein zunächst federartiges Verhalten, das oberhalb von rund 100 Hz ohne Resonanzüberhöhung in einen masseähnlichen Verlauf übergeht. Die Grösse dieser Masse ist dabei vergleichsweise gering, wie aus Fig. 5 hervorgeht. In diesem Zusammenhang von Interesse ist auch die Relation von Unterlags- und Plattennachgiebigkeit, wie dies in der Fig. 24 für drei Messstellen präsentiert wird. Neben einer offensichtlich *sehr guten Kopplung von Betonplatte und Unterlage,* zeigt der vergrösserte Ordinatenmassstab die hier bei etwa 50 Hz einsetzende Übergangszone zwischen Feder- und Masse-Charakteristik.

Einen zusätzlichen Einblick in die Systemcharakteristik liefert die schrittweise Integration der zeitabhängigen Beschleunigungsantwort. Die Fig. 25 und 26 zeigen diese Integrationsschritte an je einer Messung mit PVC- bzw. mit Gummi-Hammerspitze. Entsprechend der in diesem Frequenzband (< 100 Hz) dominierenden Federcharakteristik findet sich der Kraftpuls beim Fall mit Gummispitze annähernd in der Wegantwort wieder. Aufschlussreicher hingegen ist die deutliche Abbildung des Kraftpulses in der Geschwindigkeitsantwort beim Versuch mit PVC-Spitze. Dies bedeutet, dass die Systemdämpfung in erster Näherung einem viskosen Gesetz folgt (Widerstand proportional Geschwindigkeit). In Anbetracht der zweifellos im Untergrund wirkenden hydrodynamischen Mechanismen erscheint dieses Ergebnis glaubhaft. Von einiger Bedeutung für das weitere Verständnis der Fahrbahnbeanspruchung unter rollendem Verkehr, kann unter Umständen der von

einem Hammerpuls ausgehende zeitliche und örtliche Verlauf der Dehnungen sein. In den Fig. 27 und 28 ist dies für die Erregungspunkte 7 und 12 dargestellt.

G. Folgerungen

- Die in der (ungebundenen) Fundationsschicht und im Untergrund enthaltene grosse Dämpfung bewirkt, dass die Betonplatte nicht mehr zu periodischen Schwingungen angeregt werden kann.
- Die dynamische Beschreibung unter Anwendung der Modalanalyse scheidet für weitere Betrachtungen aus.

Die *Modalanalyse* lässt sich als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode in der Zustandsüberwachung von Strassenoberbauten (auch solchen mit Betonbelägen) *nicht* einsetzen.

- Messungen unter „Betriebsbedingungen" (Anregung durch Verkehrslasten) als auch Versuche mit künstlicher Impulserregung (Hammer-Pulse), lassen die Betonplatte als *nicht biegesteif*, eher als relativ *schlaffe*, „dünne" Platte erscheinen. Die Systemdynamik wird demnach durch die Bettungseigenschaften des Unterbaus geprägt .
- Die vorgenommenen Dehnungsmessungen liefern zwar unbedeutende Beanspruchungswerte quasistatischen Charakters. Sie weisen indessen auf einen komplexen zeitlich/örtlichen Verlauf hin. Die Frage, ob nicht in anderer Form Beanspruchungen auftreten, die durch die festgestellten ausgeprägt kurzzeitig wirkenden („schlagartig") Belastungen bestimmt werden, lässt sich im Rahmen dieses Forschungsumfanges nicht beantworten.
- Die Versuche mit instrumentiertem Hammer lassen erkennen, dass die Methode der Punktimpedanz-Bestimmung mittels Impulserregung, mit relativ geringem Aufwand nützliche Informationen im Rahmen der Zustandsüberwachung aber auch mit Blick auf die Systemmodellierung zu liefern vermag.
- Zwei Ergebnisse aus diesen Puls-Tests (Impulserregung mit Hammer) sind bemerkenswert:
  - Die sehr gute Kopplung der Betonplatte mit ihrer stützenden Unterlage (Fundationsschicht und Untergrund) in ihrer beider dynamischen Nachgiebigkeit und
  - der Übergang von einer Federcharakteristik bei Frequenzen < 50 Hz zu einer Massecharakteristik für höhere Frequenzen.

H. Ausblick

Die diesem Forschungsvorhaben zu Grunde liegende Zielsetzung, Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der *Modalanalyse* im Betonstrassenbau auszuloten führte zwar zur Feststellung, dass das System Strassenoberbau eine modalanalytische Untersuchung *nicht zulässt*. Das System lässt sich nicht zu periodischen Schwingungen anregen, wegen zu hoher Dämpfung. Deshalb wurde auf eine Weiterverfolgung des hier beschriebenen Forschungsvorhabens über diese erste Phase hinaus (Abschnitt B) verzichtet.

Trotzdem könnten einzelne andere dabei gewonnenen Informationen Ansätze vermitteln für Forschungsbemühungen mit *neuer* Orientierung:

- Untersuchung dynamisch beanspruchter Betonstrassen, auf welche Weise sie die *rollenden* Verkehrslasten auf unterschiedlich steife Bettung (ungebundene resp. gebundene Fundationsschichten *unterschiedlicher* Dicke, Masse) abtragen.

Die Forschungsstellen

Betonstrassen AG	Sulzer Innotec AG
Prof. W. Wilk	J. Eberl

Literatur

1) Reinhardt H.W., Beton unter Stossbelastung, Schweizer Ingenieur und Architekt, H. 22/1988,. Zürich

2) Cantieni R., Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland - 60 years experience of EMPA, EMPA-Report Nr. 211, 1983, Dübendorf

3) Natke H.G., Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen - und Modalanalyse, Vieweg & Sohn, 1983

4) Morgan Bruce J., Oesterle Ralph G., On-Site Modal Analysis - A new powerful inspection technique, Construction-Technologies-Laborotories, PCA, Skokie/Illinois. IBC-85-19

5) Antes H., von Estorff O., Erschütterungsausbreitung im Boden und dynamische Interaktionseffekte, Bauingenieur H. 5/1987, Berlin

6) Bühlmann E.T. Brandenberger U., Analyse von komplexen, linearen und dynamischen Systemen, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 1-2, 1990

Bildverzeichnis

		Seite
Bild 1:	Rüttler zur Anregung der Betonplatte	18
Bild 2:	Anregung durch rollenden Verkehr: Betriebszustand. Die beiden eingesetzten LKW's mit 24, resp. 26 t Gesamtgewicht. Gefahrene Geschwindigkeiten: 40, 60 und 80 km/h	18
Bild 3:	Bohrlöcher in Betonplatte zur Aufnahme der Beschleunigungsgeber	14
Bild 4:	Beschleunigungsgeber (vertikal eingesetzt)	15
Bild 5	Eingesetzte und fixierte Geber sowie Übertragsleitungen	16

Figuren- und Tabellenverzeichnis

		Seite
Fig.1	Massenvergleich zwischen Verkehrslastgrösse und dem Eigengewicht der dynamisch erregten Betonplatte	1
Fig. 2	Die drei Elemente des dynamischen Systems: Lastspektrum/ Tragsystem/Antwortspektrum	2
Fig. 3	Instrumentierung der von Randstörungen befreiten Einzelplatte	20
Fig. 4	Plazierung der Beschleunigungsgeber und Dehnmesstreifen (DMS)	21
Fig. 5	Dynam. Nachgiebigkeit, inf. Rüttler- resp. Hammerschlag-Erregung, in Funktion der Frequenz (Feder-, resp. masseähnliches Verhalten der Tragstruktur)	22
Fig. 6	Laufzeitverhalten frequenzabhängiger Biegewellen	23
Fig. 7+8	Antwortspektren an den Beschleunigungsgebern im Betriebszustand (Überfahrt LKW A mit V = 40 km/h)	24-25
Fig. 9+10	Anwortspektren an den Beschleunigungsgebern im Betriebszustand (Überfahrt LKW A mit V = 60 km/h)	26-27
Fig. 11+12	Antwortspektren an den Beschleunigungsgebern im Betriebszustand (Überfahrt LKW A mit V = 80 km/h)	28-29
Fig. 13	Einige ausgewählte, dilatierte Ausschnitte der Fig. 7 ÷ 12	30
Fig. 14	Längsdehnungen, (DMS-Daten) für Betriebszustand (V = 40 km/h)	31
Fig. 15	Längsdehnungen für Betriebszustand (V = 60 km/h)	32
Fig. 16	Längsdehnungen für Betriebszustand (V = 80 km/h)	33
Fig. 17	Dehnungsänderungs-Geschwindigkeit für V = 40, resp. 80 km/h, an der Messstelle D1	34
Fig. 18 - 20	Antwortspektrum (Beschleunigungen) aus Hammerschlag-Versuchen. Hammerschläge über Gummi-, resp. PVC-Spitze	35-37
Fig. 21	Vergleich der Impulsdauer (Härte der Stösse) zwischen Betriebszustand (V = 40, resp. 80 km/h) und Hammer-Puls mit PVC-, resp. Gummi-Spitze	38
Fig. 22	Impulsdauer bei Schlag über Gummispitze im Frequenzbereich 10 ÷ 100 Hz.	39

Fig. 23	Impulsdauer bei Schlag über PVC- Spitze im Frequenzbereich 10 ÷ 1000 Hz. (Federartiges Verhalten für f < 100 Hz, masse-ähnliches Verhalten für f > 100 Hz)	40
Fig. 24	Vergleich der frequenzabhängigen Verformungssteifigkeit von Platte und Unterlage	41
Fig. 25 + 26	Stufenweise Integration der Beschleunigungsantwort bei Stoss über Gummi-, resp. PVC-Spitze	42-43
Fig. 27 + 28	Zeitlicher und örtlicher Dehnungsverlauf in der Platte nach Hammer-Puls an den Erregungspunkten MP 7, resp. MP 12	44-45
Tafel 1	Beton unter Stossbelastung, Dehnungsgeschwindigkeiten, aus (1).	8

Bild 1

Anregung der Betonplatte durch schweren Rüttler (Shaker) zur Bestimmung der Eigenfrequenzen der Systemdämpfung

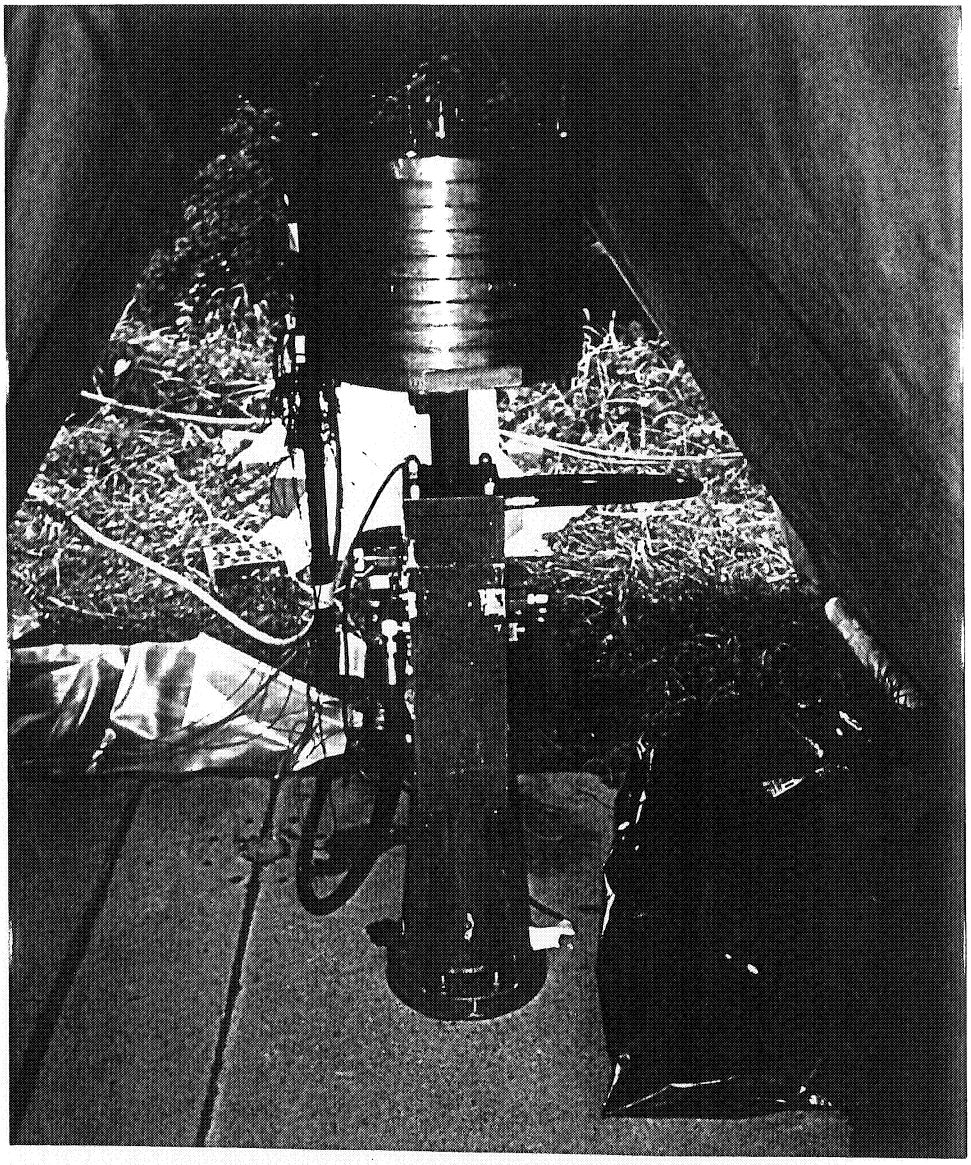
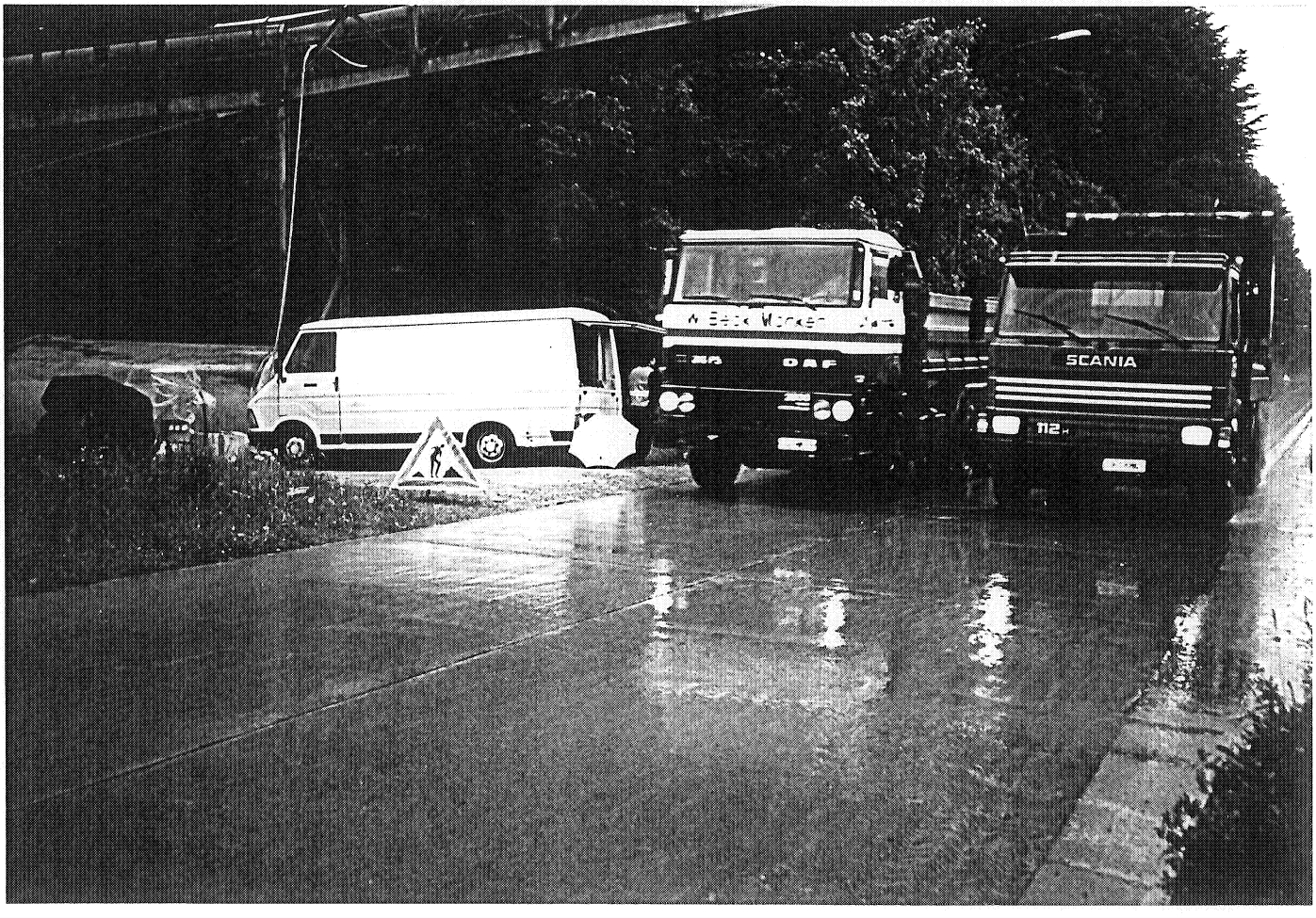


Bild 2

Betriebszustand:
Anregung durch rollenden Verkehr, beide Strassenhälften dynamisch belastet



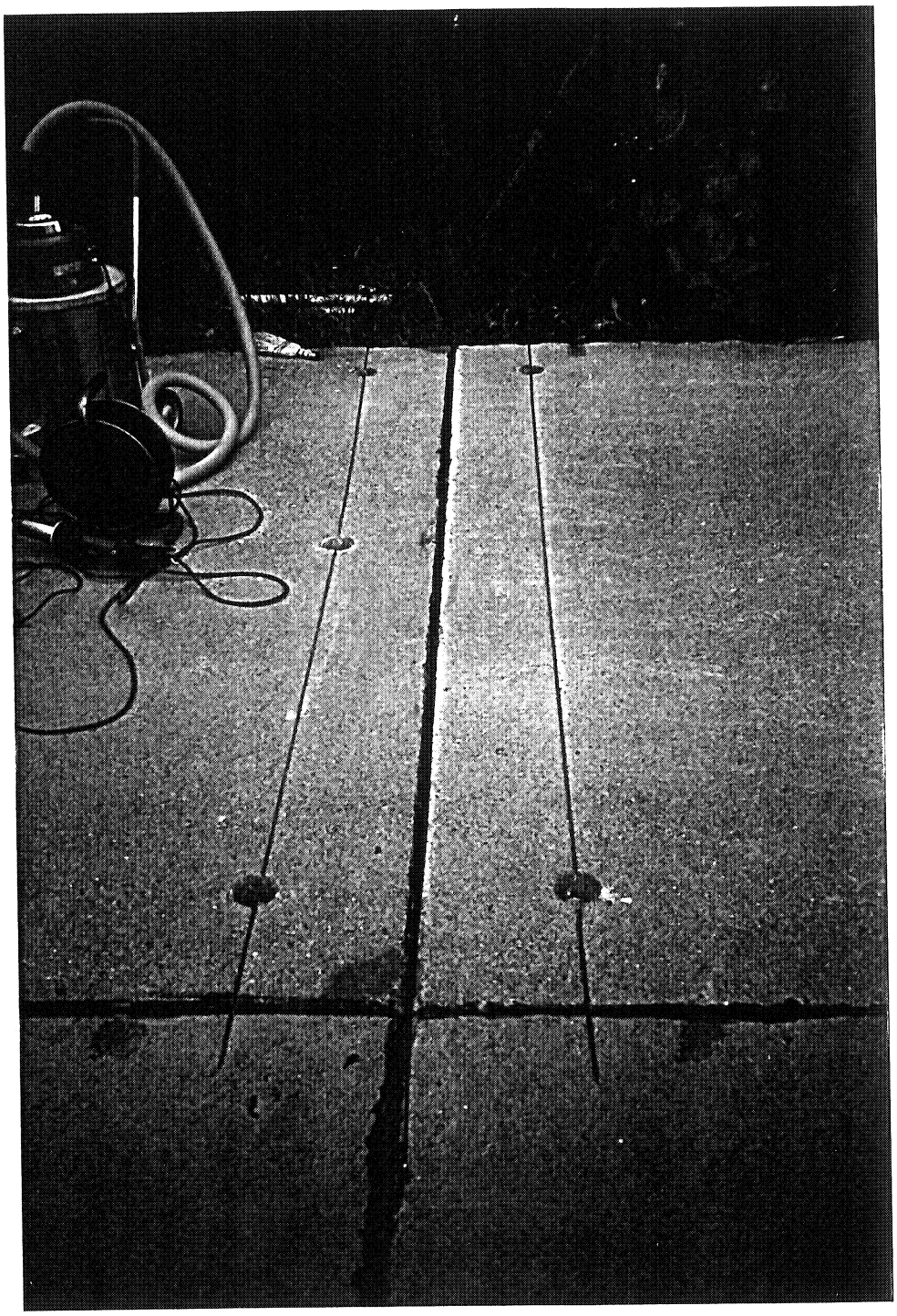


Bild 3

Gebohrte Löcher in Betonplatte zur Aufnahme der Beschleunigungsgeber. Frässchlitze zur Aufnahme der Signalübermittlungsdrähte

Bild 4

Bohrloch mit Beschleunigungsgeber

Bild 5

Eingesetzte Geber und Übertragungsleitungen.
Kunstharz-Verguss

Fig. 3 Instrumentierung mit vertikal messenden Beschleunigungsaufnehmern

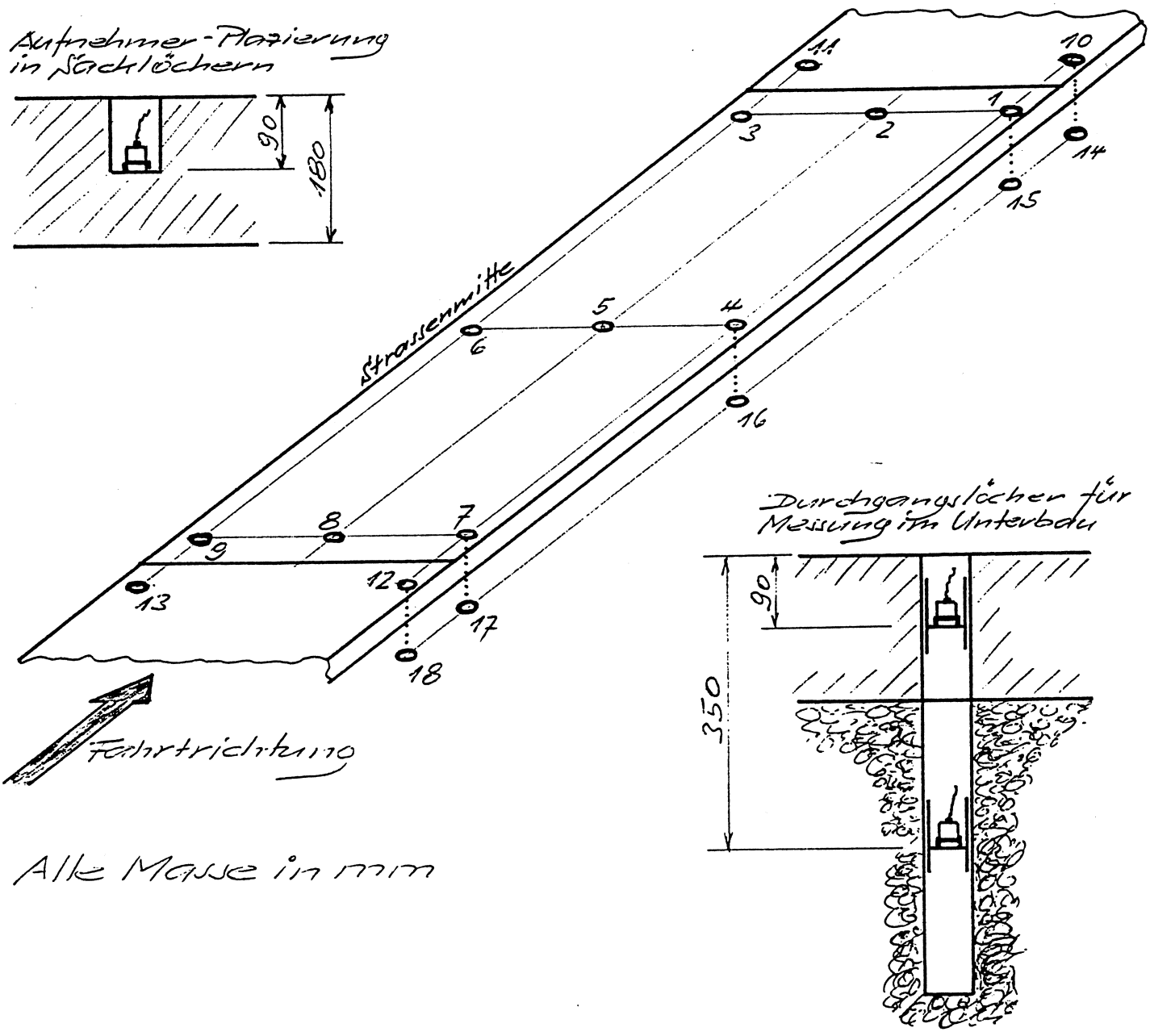


Fig. 4 Plazierung der Beschleunigungsgeber und Dehnmessstreifen (DMS)

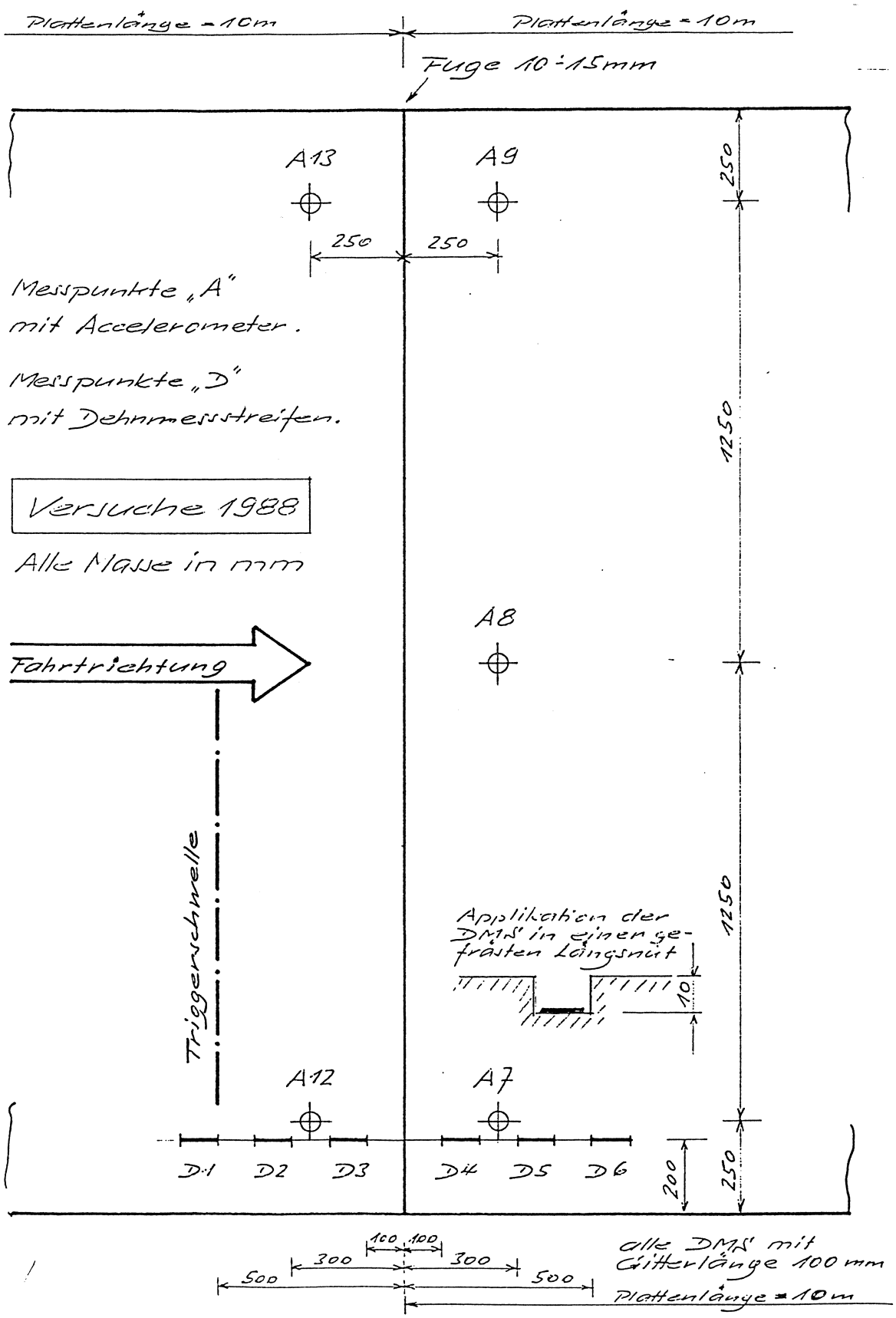


Fig. 5 Dynamische Nachgiebigkeit (Reflektion in Funktion der Frequenz)
oben: bei Erregung durch Rüttler
unten: bei Erregung durch Hammer mit PVC-Spitze

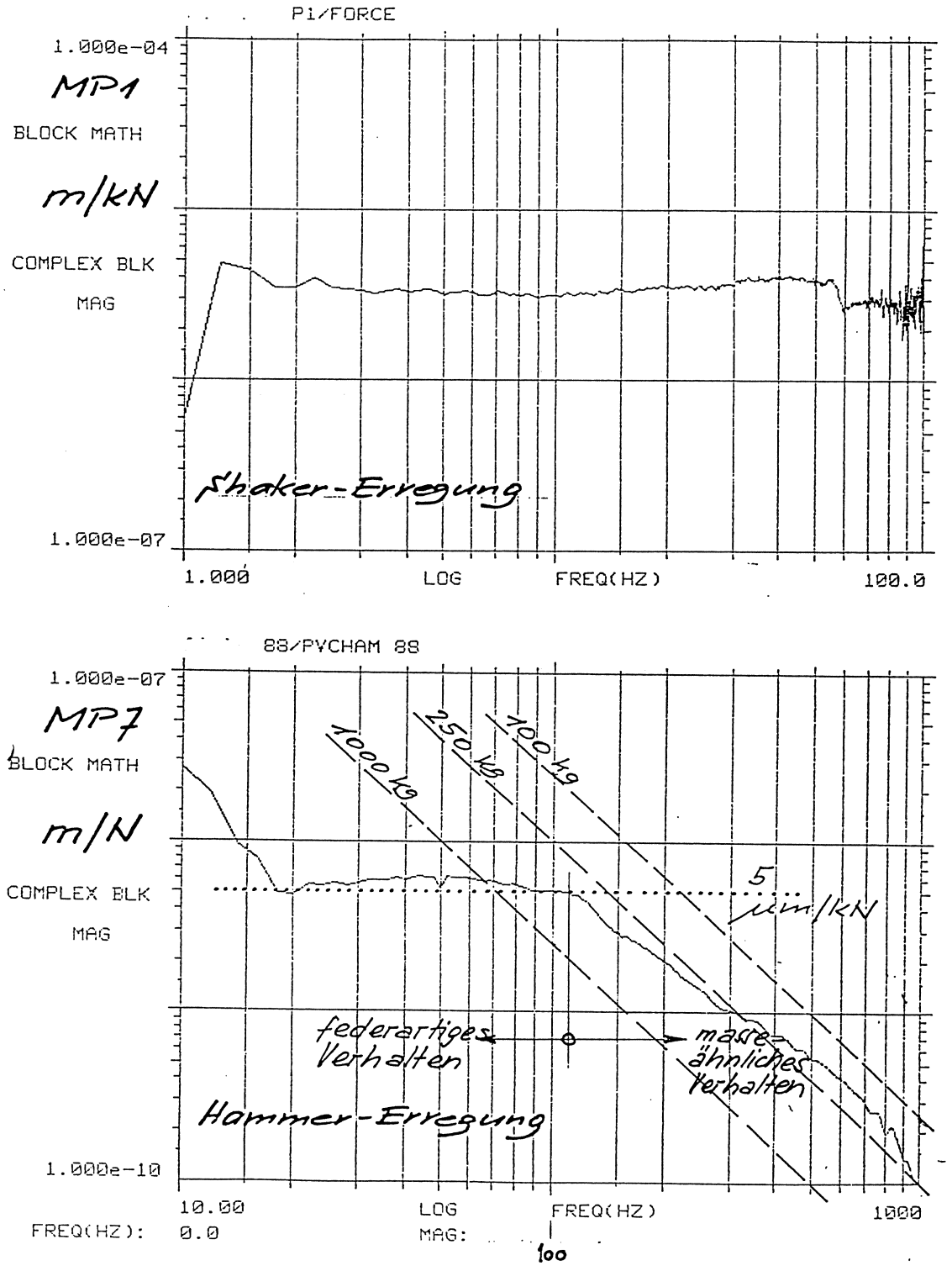


Fig. 6 Laufzeitverhalten frequenzabhängiger Biegewellen
oben: Messstelle an Position 2
unten: Messstelle an Position 9

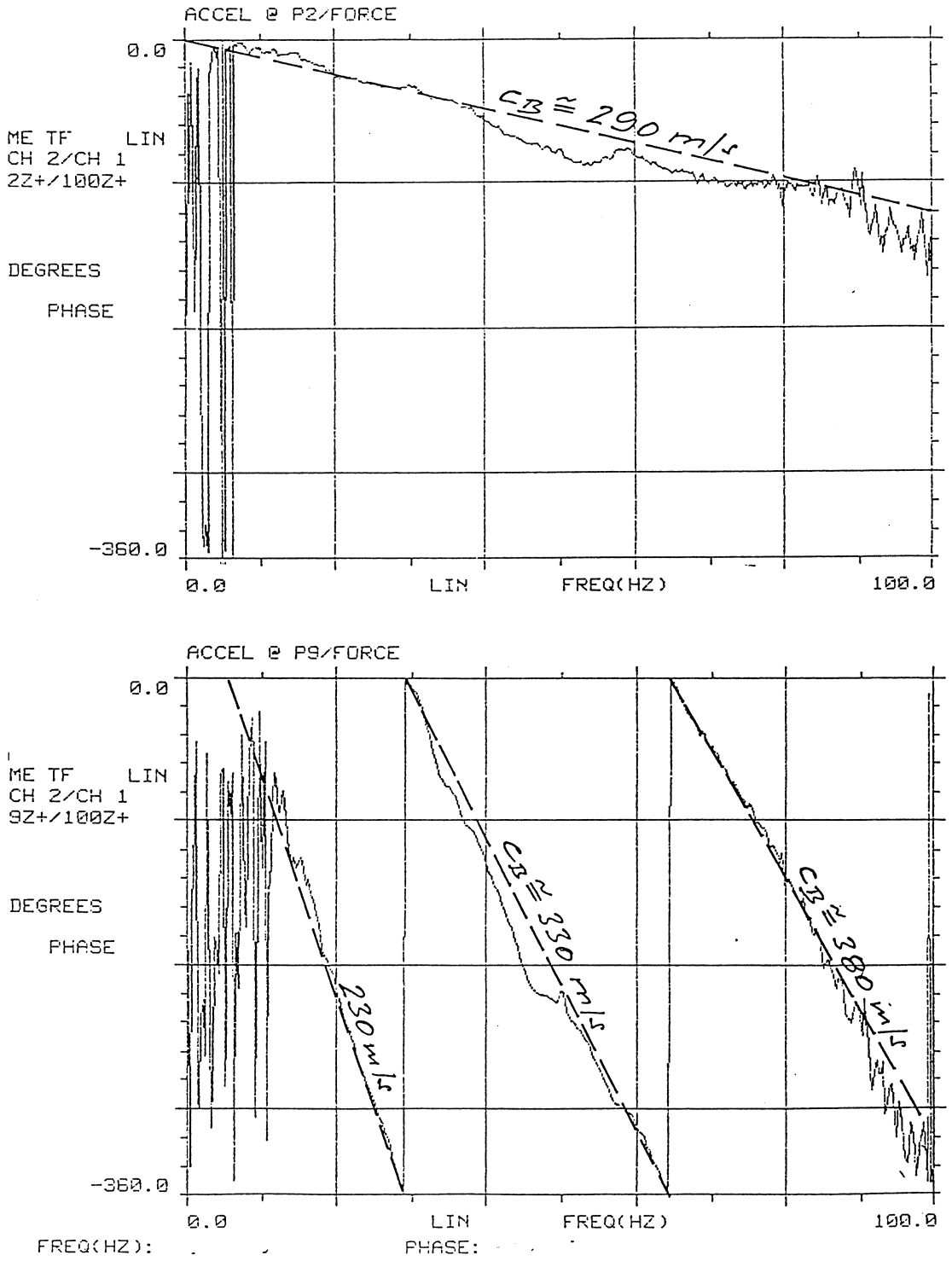


Fig. 7 + 8 Antwortspektren an den Beschleunigungsgebern im Betriebszustand (Überfahrt LKW A mit V = 40 km/h)

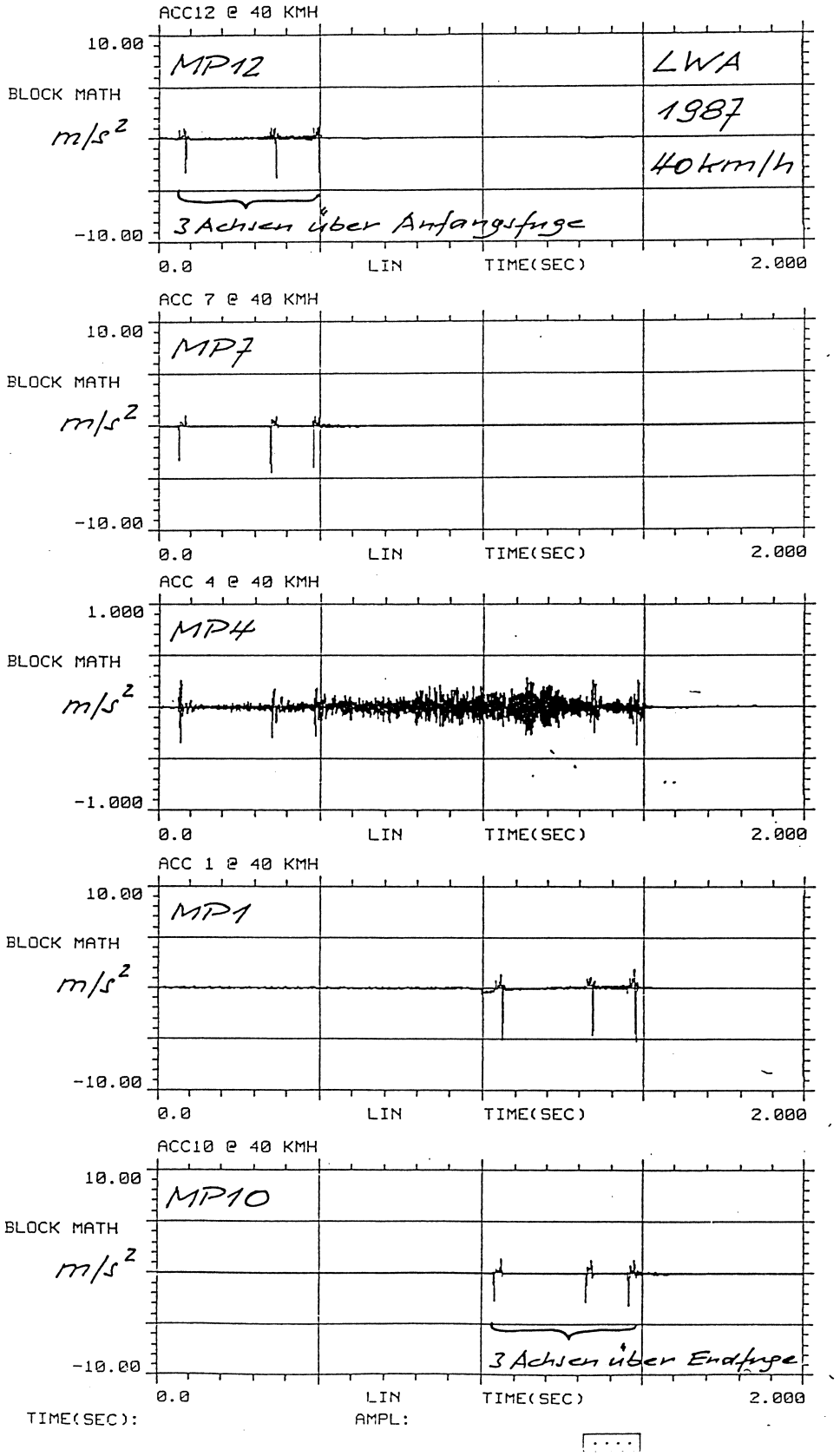


Fig.8

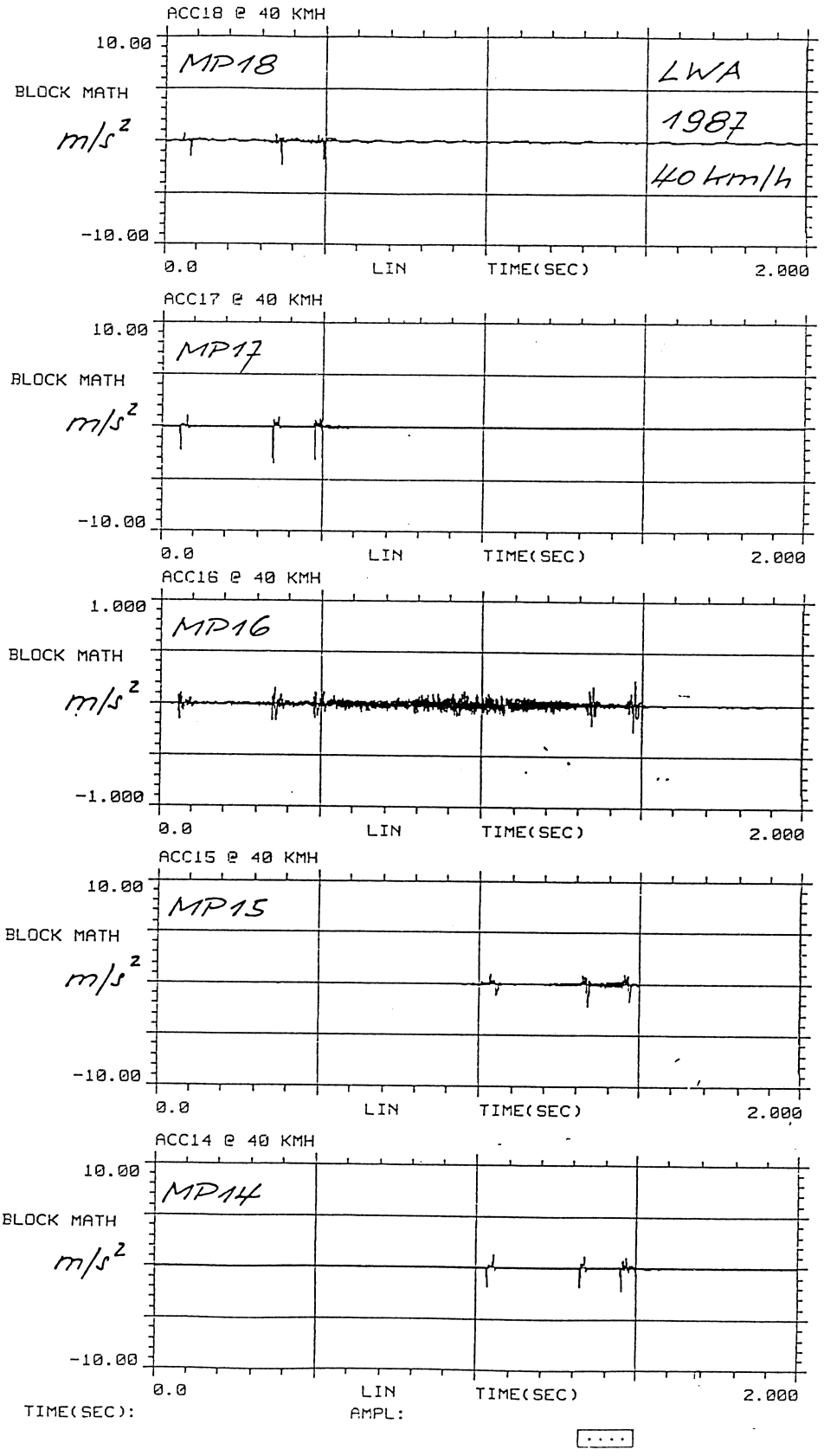

ACC18 @ 40 KMH
10.00
MP18
LWA
BLOCK MATH
1987
m/s²
40 km/h
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
2.000
ACC17 @ 40 KMH
10.00
MP17
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
2.000
ACC16 @ 40 KMH
1.000
MP16
BLOCK MATH
m/s²
-1.000
0.0
LIN
TIME(SEC)
2.000
ACC15 @ 40 KMH
10.00
MP15
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
2.000
ACC14 @ 40 KMH
10.00
MP14
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
2.000
TIME(SEC):
AMPL:

Fig. 9 + 10 Antwortspektren an den Beschleunigungsgebern im Betriebszustand (Überfahrt LKW A mit V = 60 km/h)

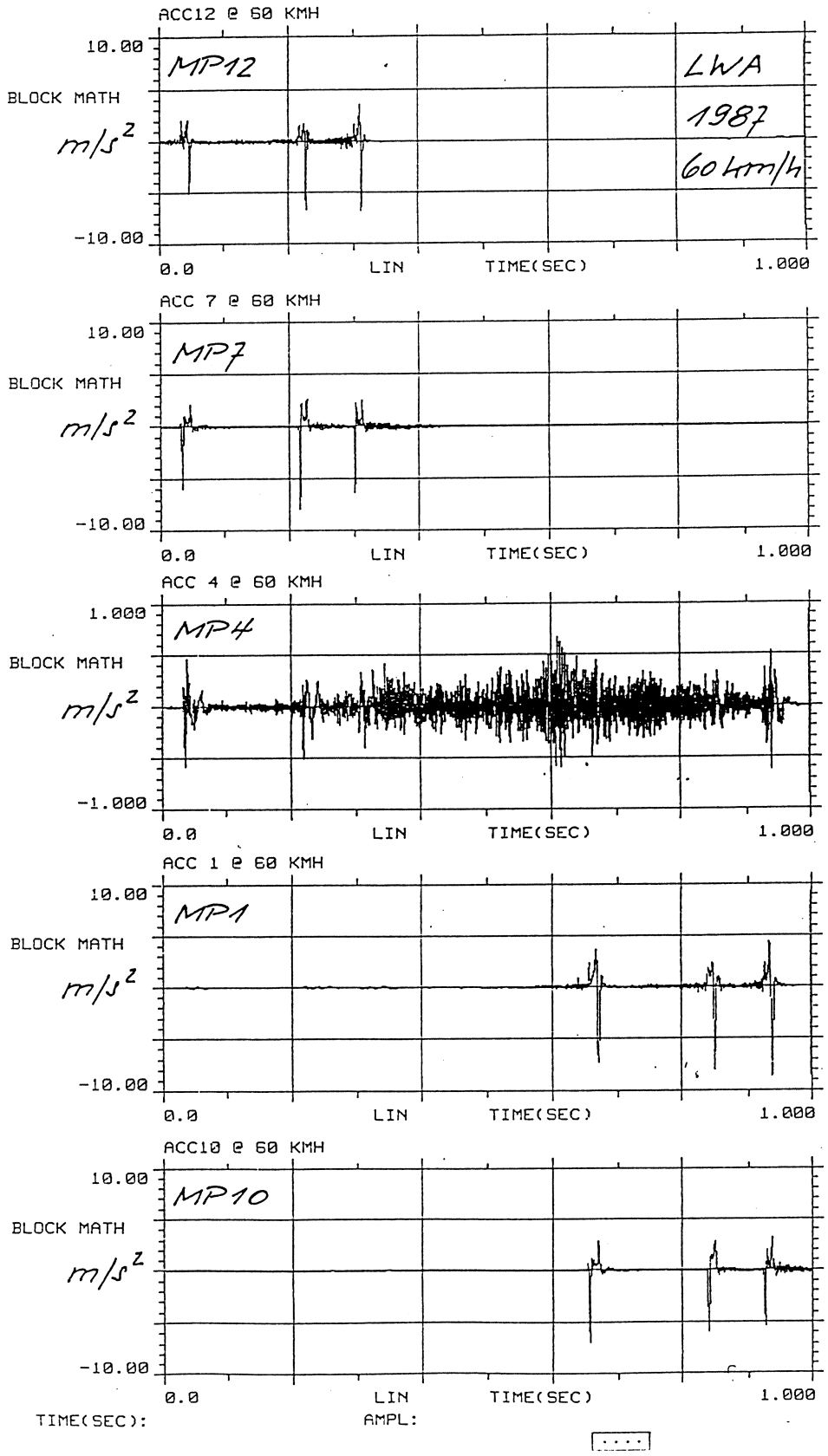


Fig. 10

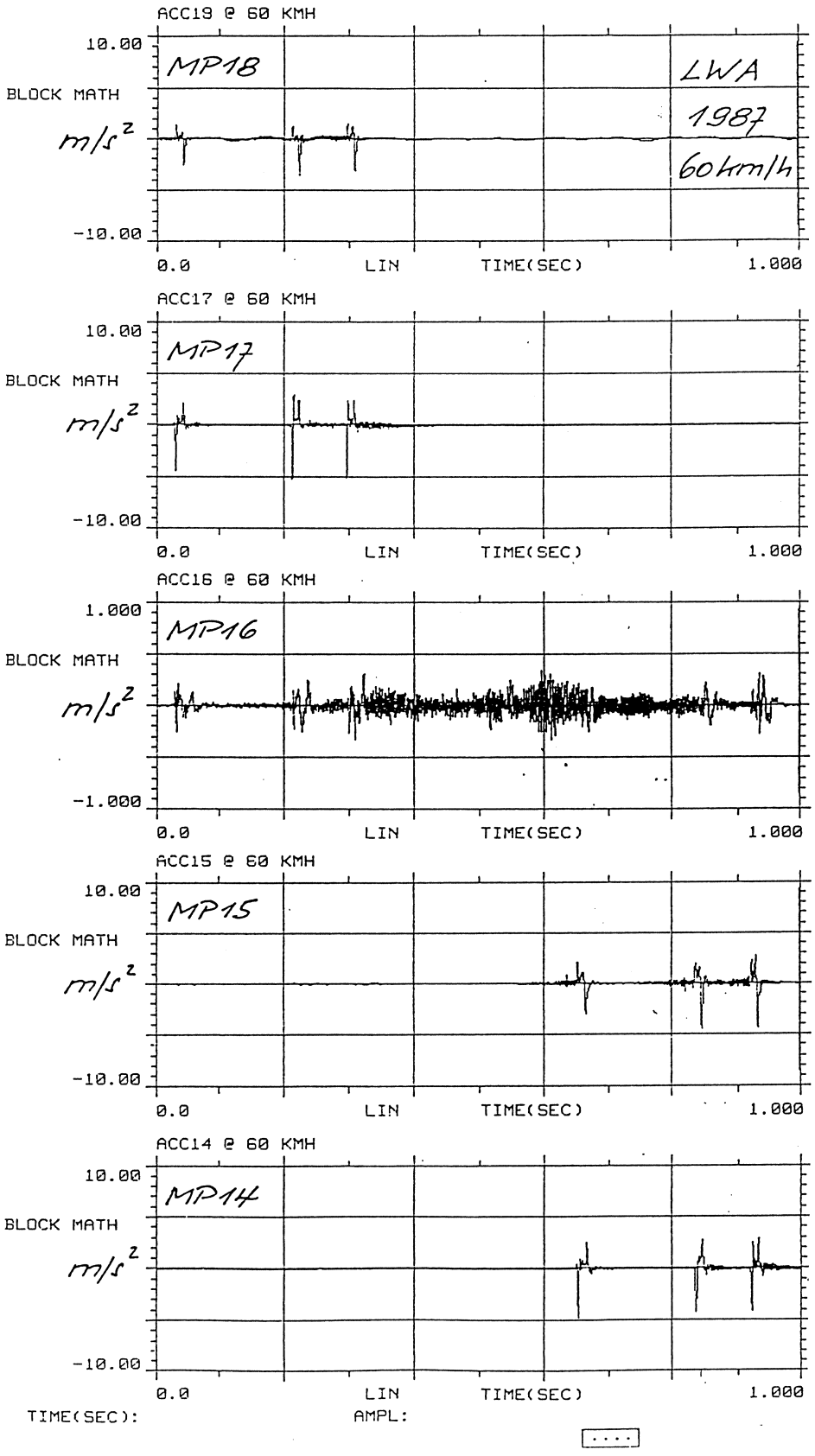

ACC19 @ 60 KMH
10.00
MP18
LWA
1987
60km/h
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC17 @ 60 KMH
10.00
MP17
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC16 @ 60 KMH
1.000
MP16
BLOCK MATH
m/s²
-1.000
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC15 @ 60 KMH
10.00
MP15
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC14 @ 60 KMH
10.00
MP14
BLOCK MATH
m/s²
-10.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
TIME(SEC):
AMPL:

Fig. 11 + 12 Antwortspektren an den Beschleunigungsgebern im Betriebszustand (Überfahrt LKW A mit V = 80 km/h)

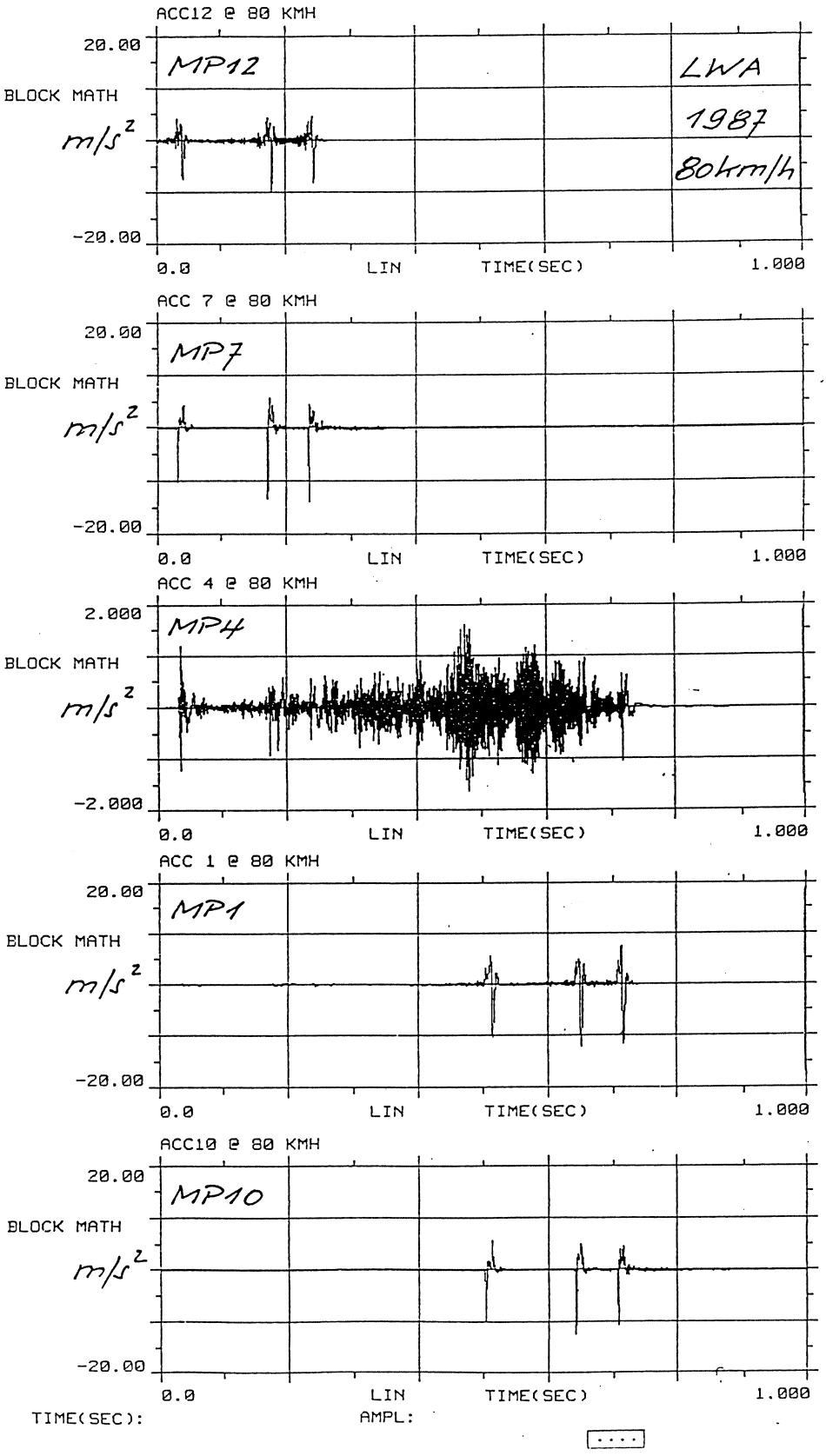


Fig. 12

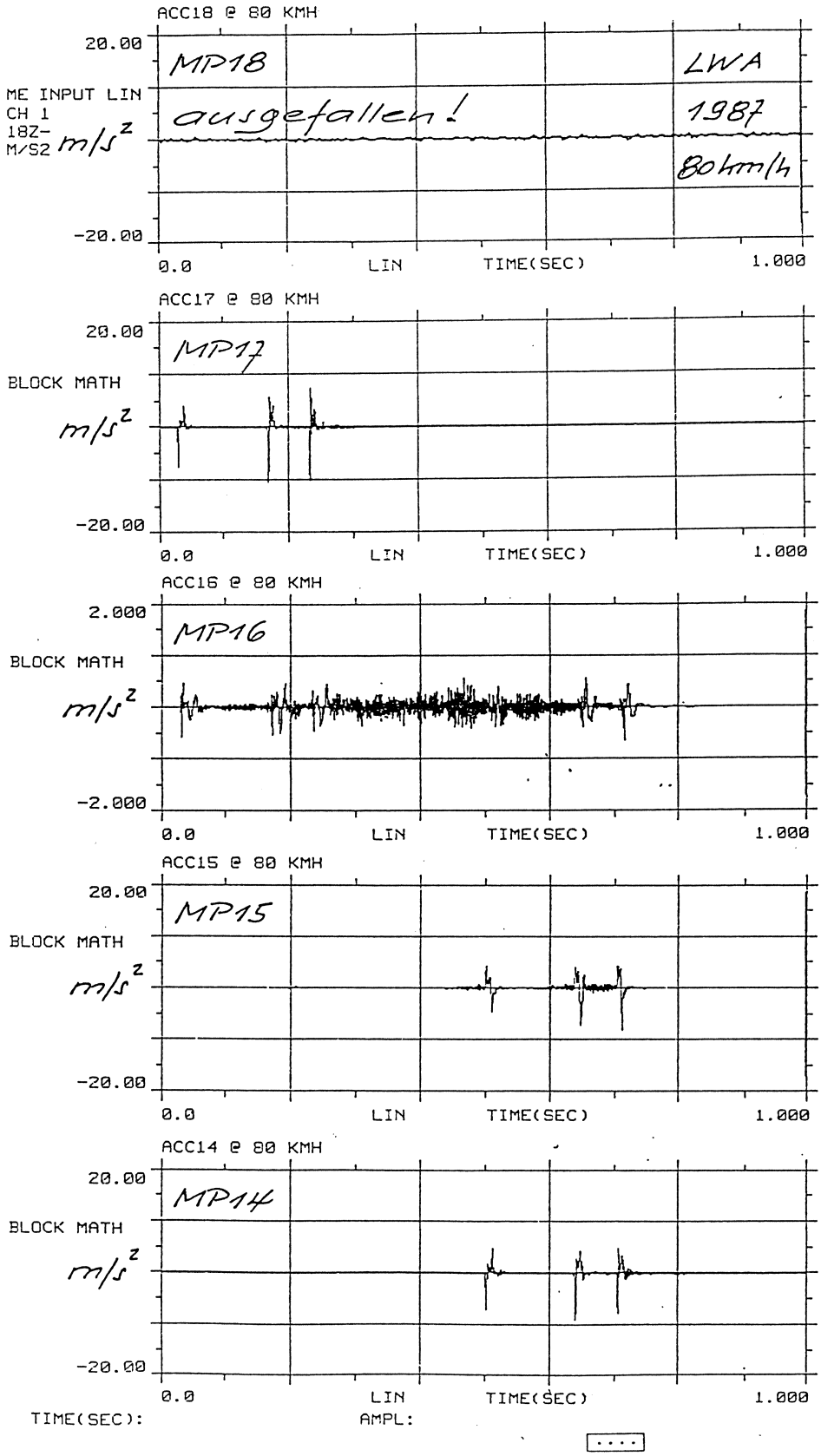

ACC18 @ 80 KMH
20.00
MP18
LWA
ME INPUT LIN
CH 1
18Z-
M/S2
m/s²
ausgefallen!
1987
80km/h
-20.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC17 @ 80 KMH
20.00
MP17
BLOCK MATH
m/s²
-20.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC16 @ 80 KMH
2.000
MP16
BLOCK MATH
m/s²
-2.000
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC15 @ 80 KMH
20.00
MP15
BLOCK MATH
m/s²
-20.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
ACC14 @ 80 KMH
20.00
MP14
BLOCK MATH
m/s²
-20.00
0.0
LIN
TIME(SEC)
1.000
TIME(SEC):
AMPL:

Fig. 13 Einige ausgewählte, dilatierte Ausschnitte der Fig. 7 bis 12

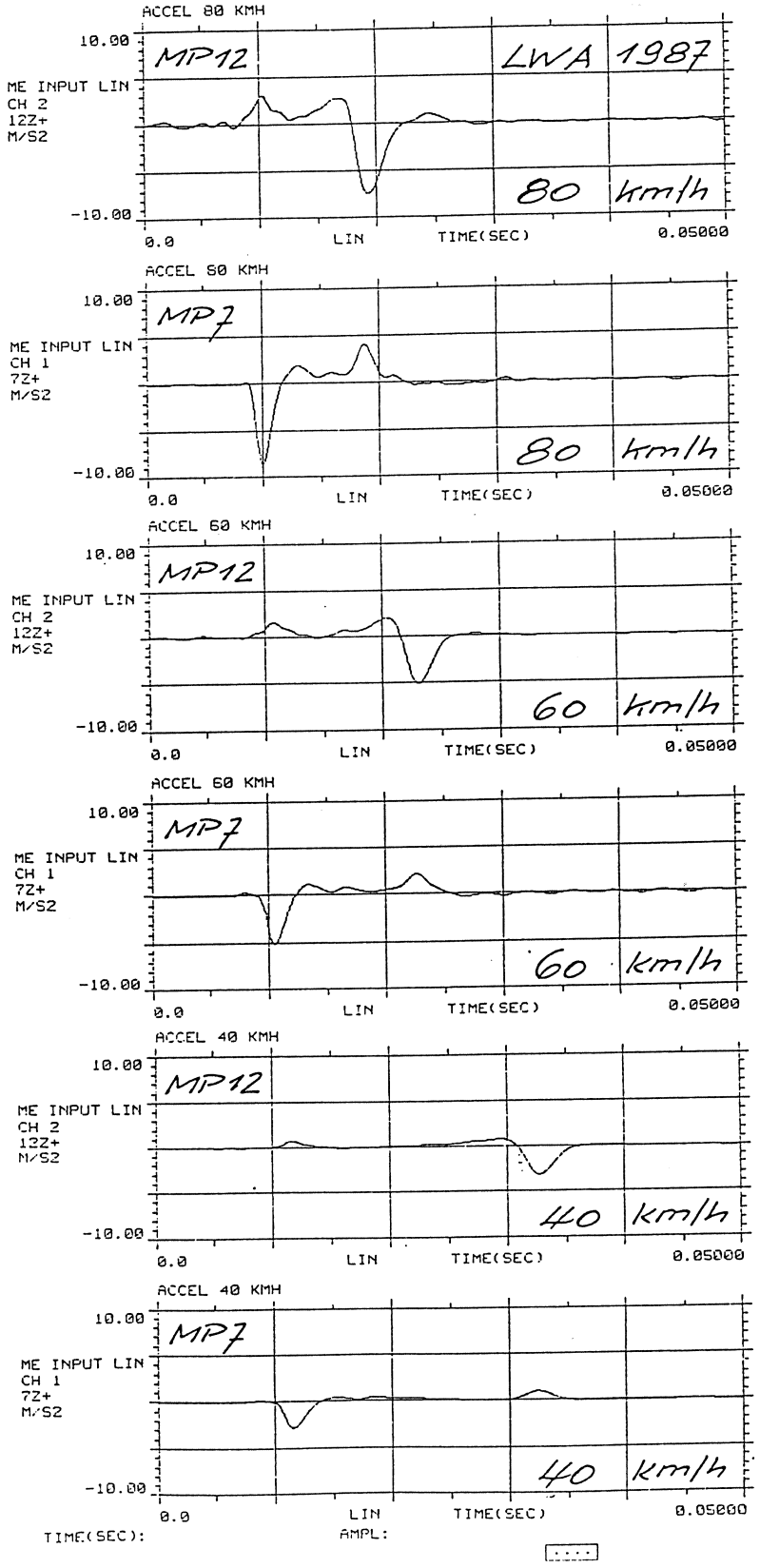


Fig. 14 Längsdehnungen, (DMS-Daten) für Betriebszustand (V = 40 km/h)

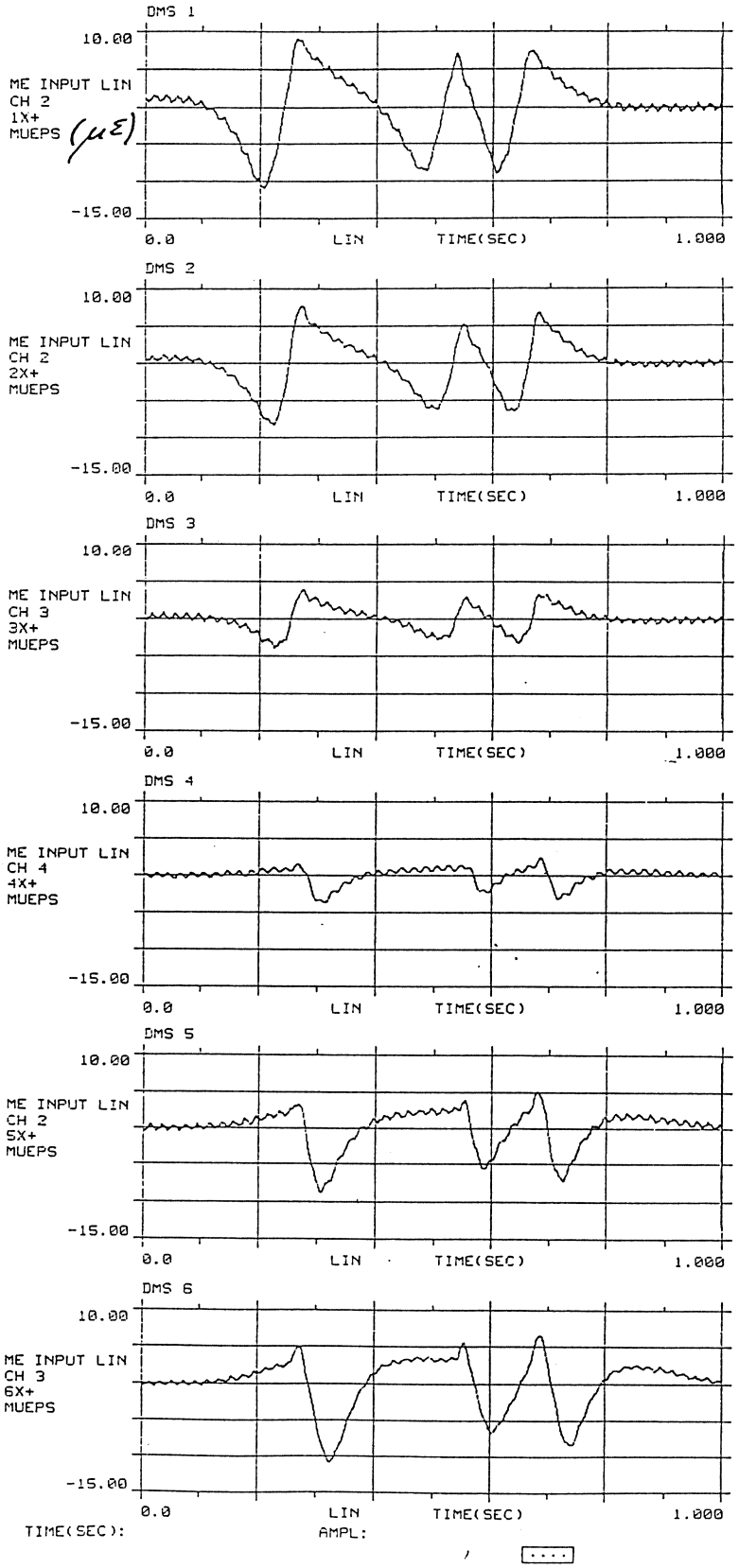


Fig. 15 Längsdehnungen für Betriebszustand (V = 60 km/h)

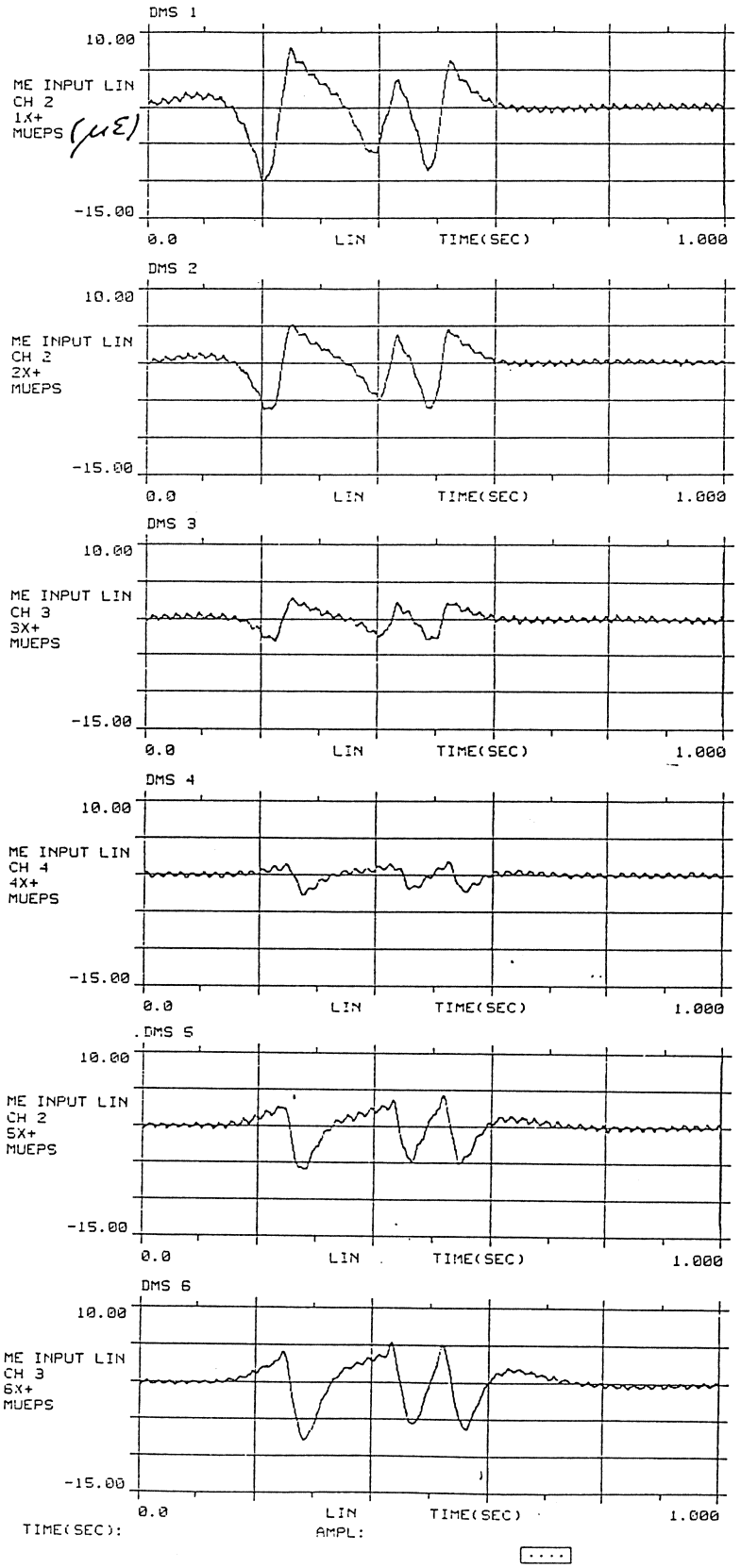


Fig. 16 Längsdehnungen für Betriebszustand (V = 80 km/h)

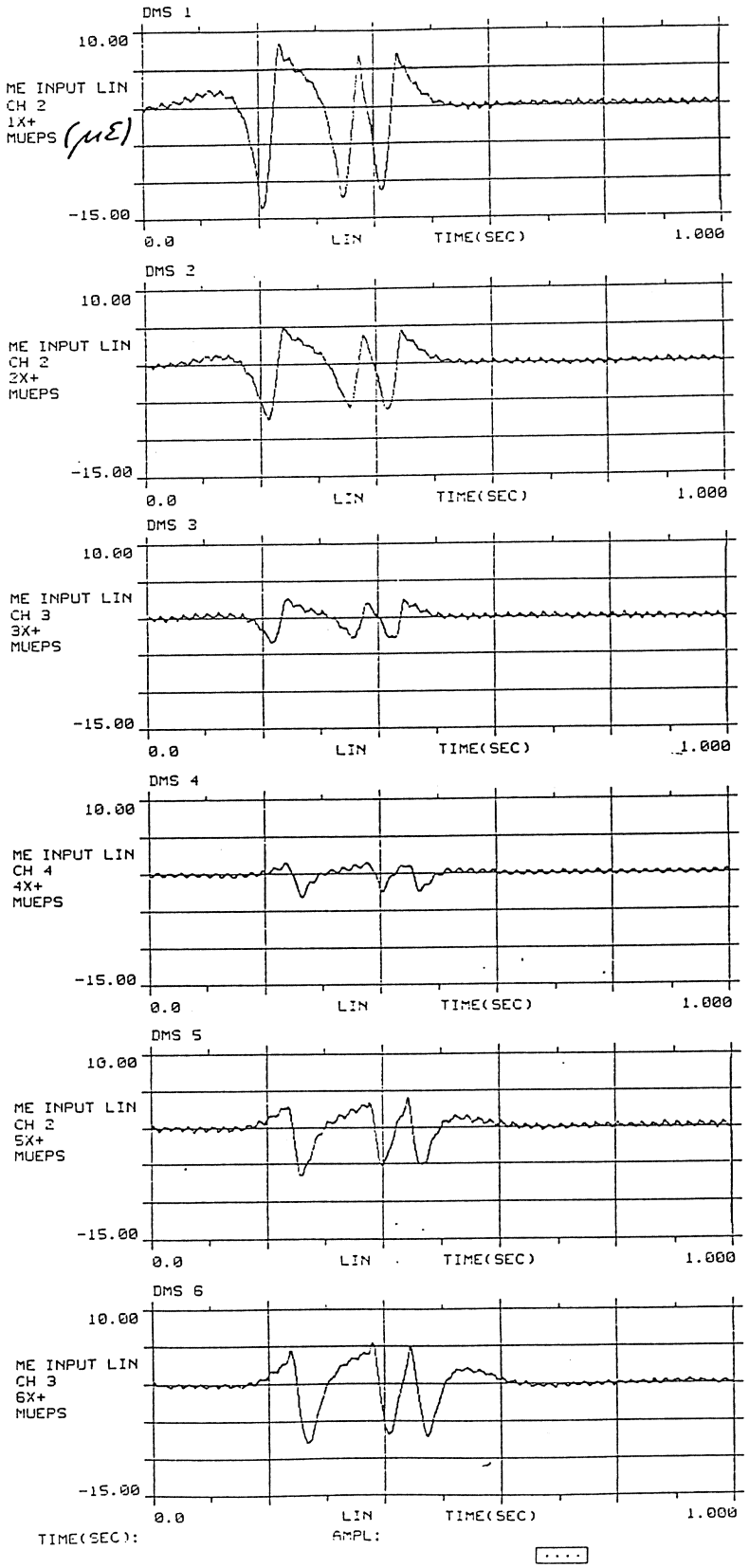


Fig. 17 Dehnungsänderungs-Geschwindigkeit für V = 40, resp. 80 km/h, an Messstelle D1

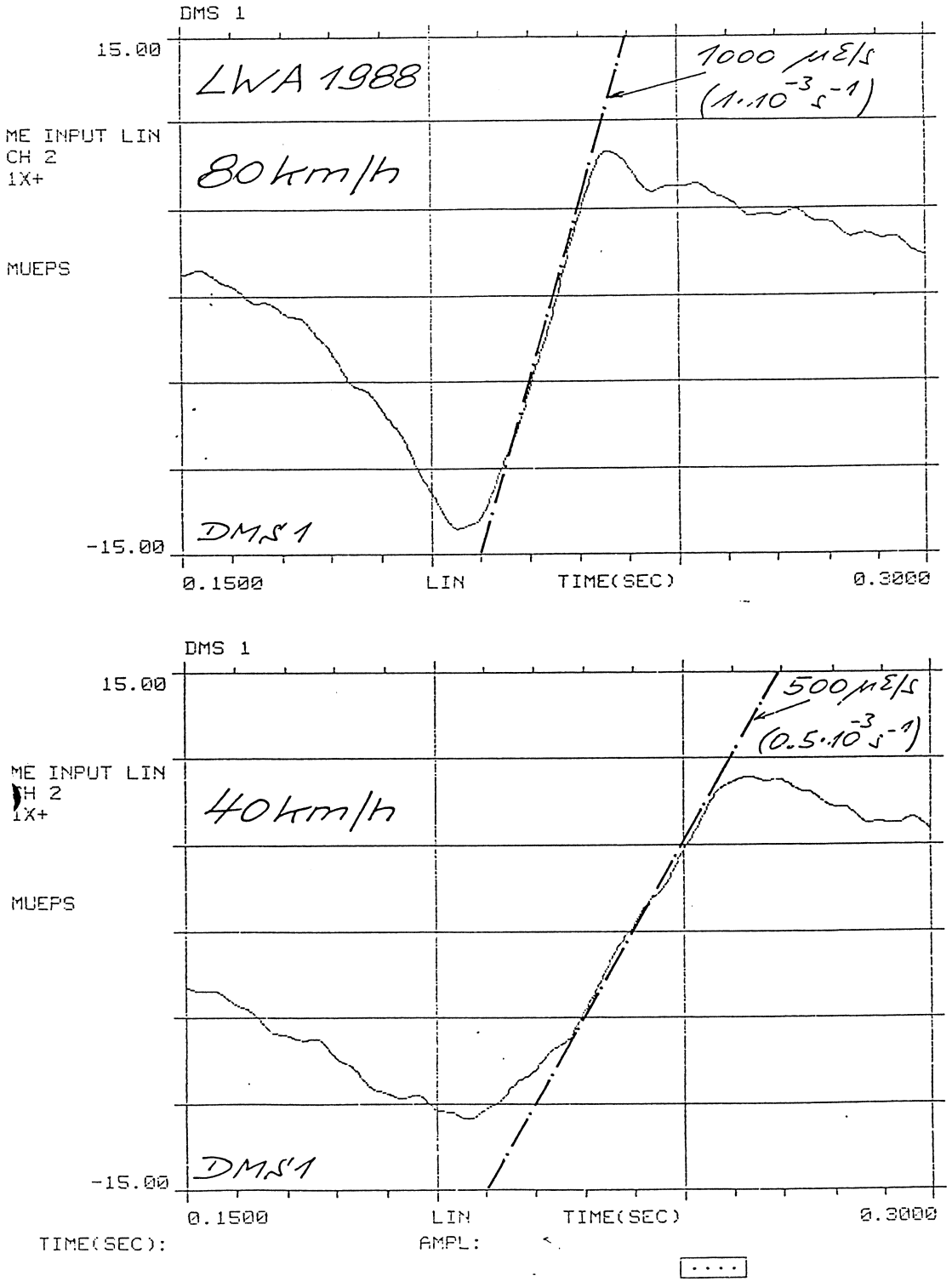


Fig. 18 - 20 Antwortspektren (Beschleunigungen) aus Hammerschlag-Versuchen

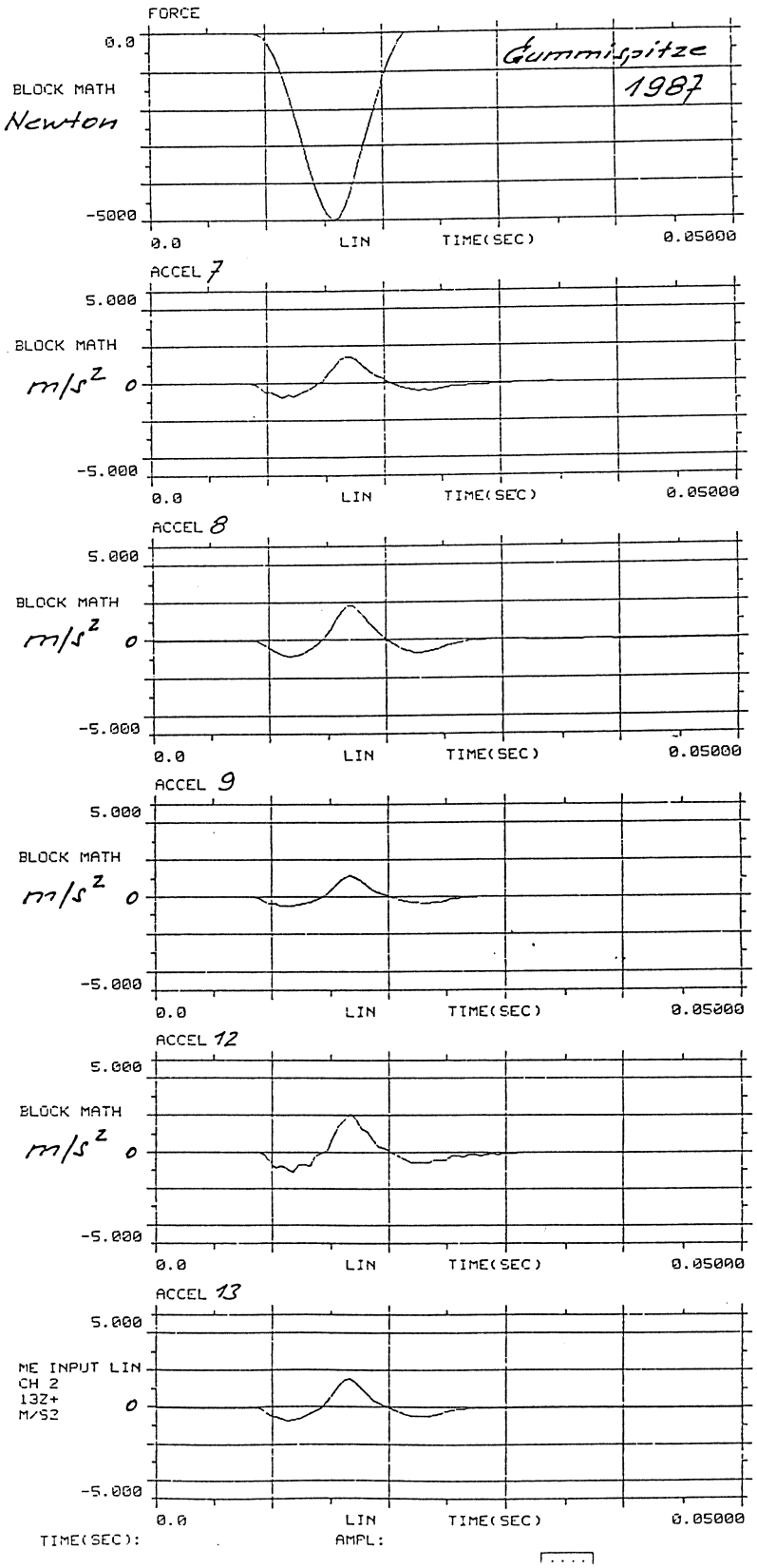


Fig. 19

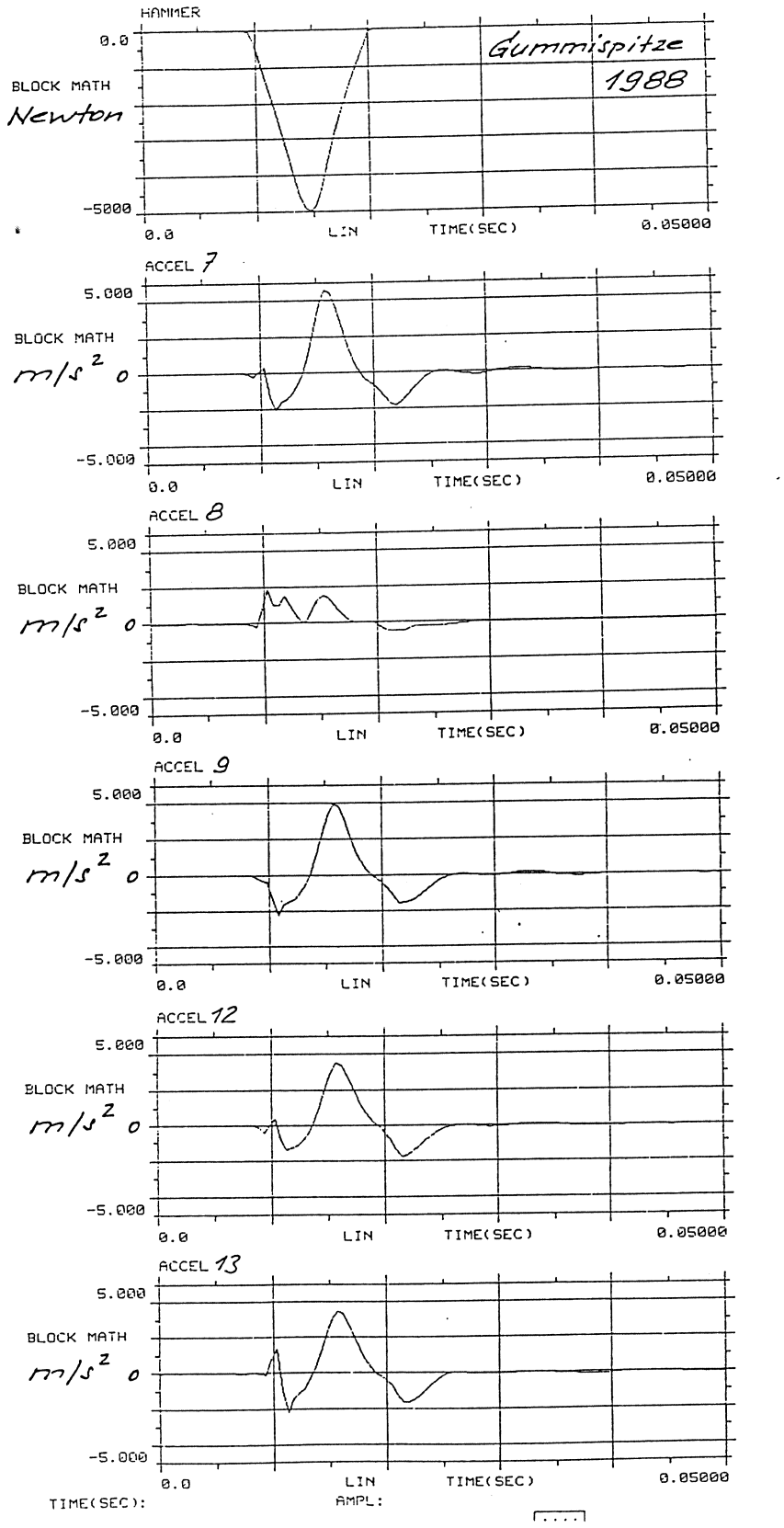

HAMMER
Gummispitze
1988
BLOCK MATH
Newton
0.0
-5000
0.0
LIN
TIME(SEC)
0.05000
ACCEL 7
5.000
BLOCK MATH
m/s²
0
-5.000
ACCEL 8
ACCEL 9
ACCEL 12
ACCEL 13
TIME(SEC):
AMPL:

Fig. 20

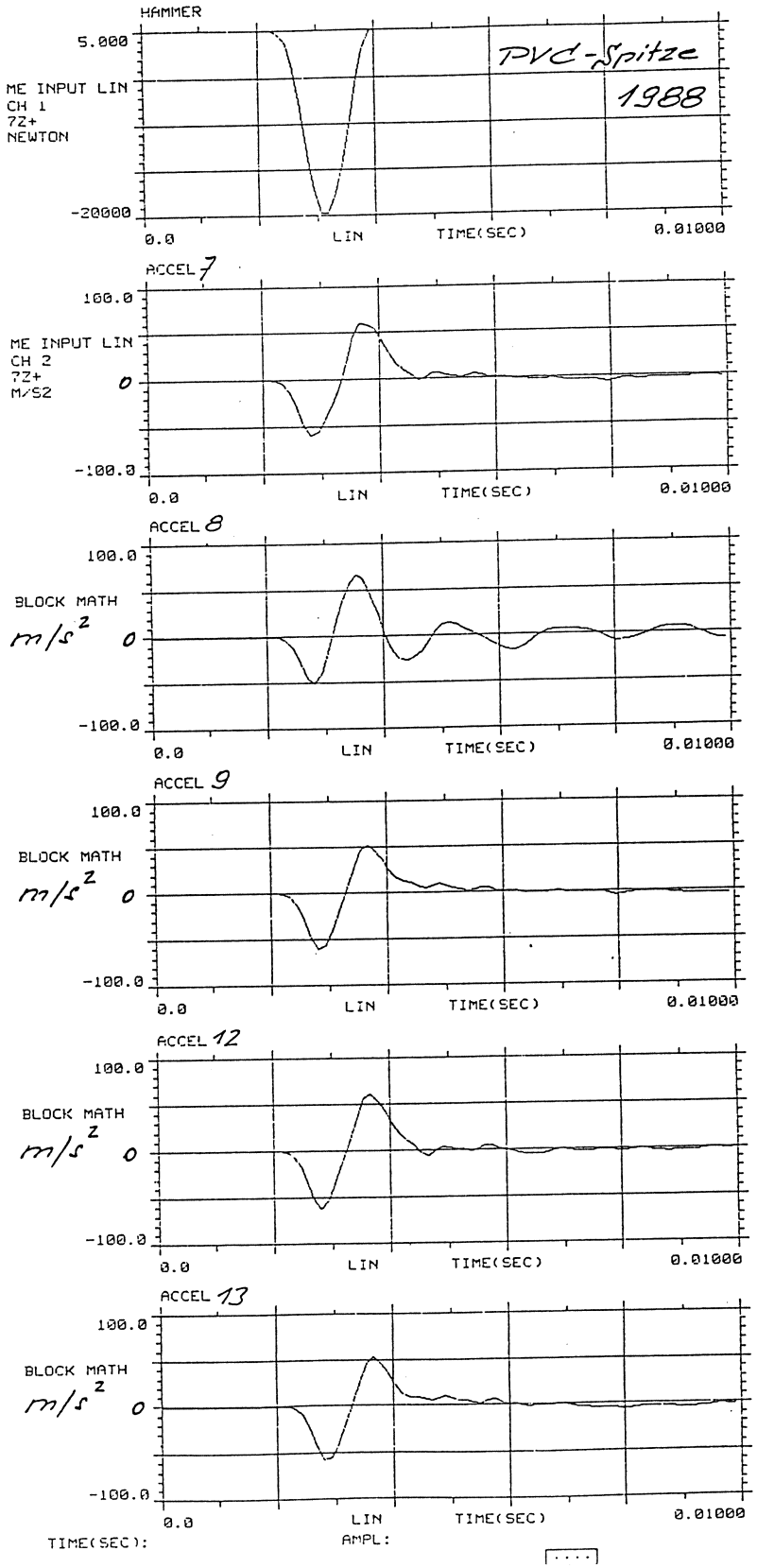

HAMMER
5.000
ME INPUT LIN
CH 1
7Z+
NEWTON
-20000
PVC-Spitze
1988
0.0
LIN
TIME(SEC)
0.01000
ACCEL 7
100.0
ME INPUT LIN
CH 2
7Z+
M/S2
0
-100.0
ACCEL 8
BLOCK MATH
m/s²
ACCEL 9
ACCEL 12
ACCEL 13
TIME(SEC):
AMPL:

Fig. 21 Vergleich der Impulsdauer (Härte der Stösse) zwischen Betriebszustand (V 40, resp. 80 km/h) und Hammer-Puls mit PVC-, resp. Gummi-Spitze

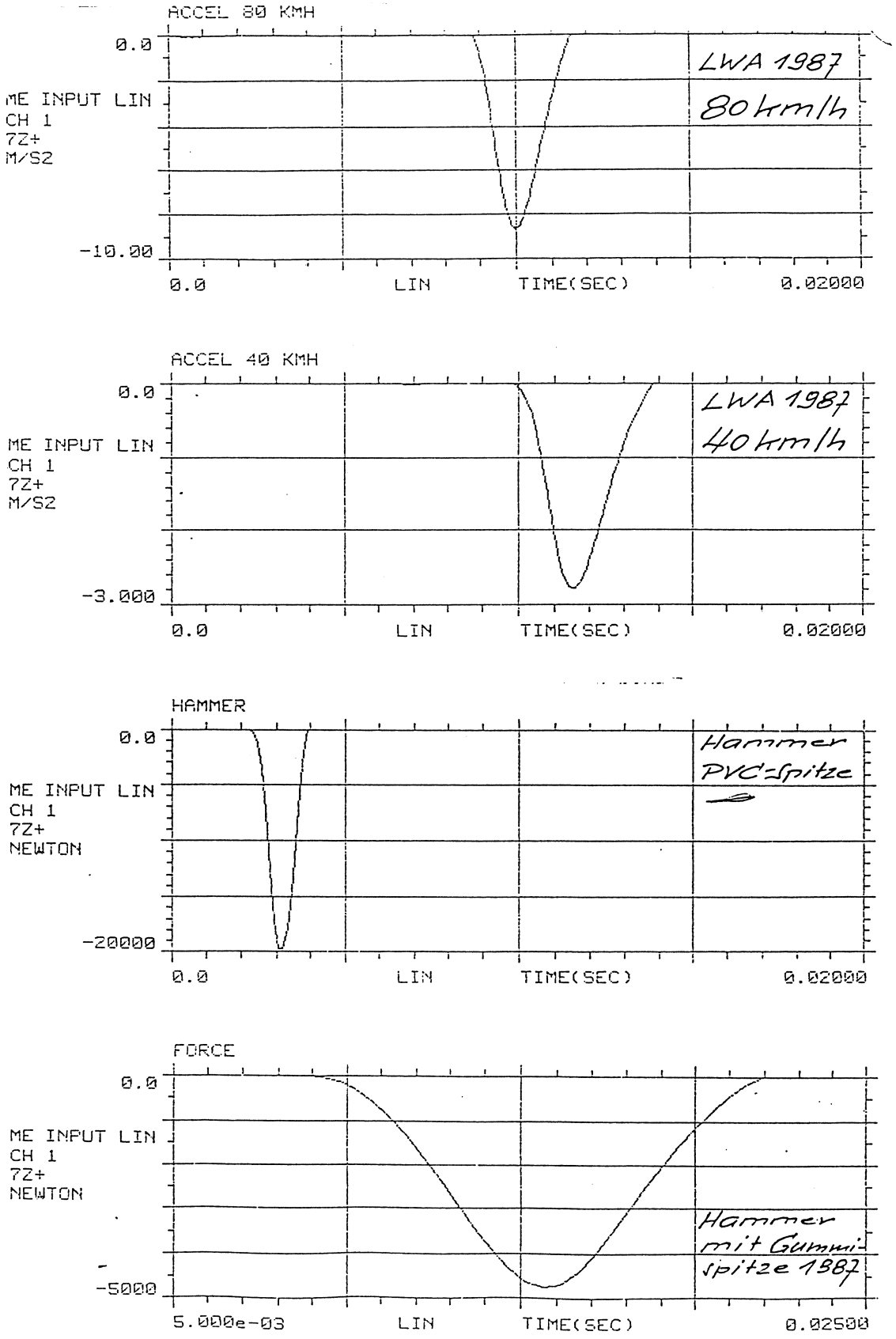


Fig. 22 Impulsdauer bei Schlag über Gummispitze im Frequenzbereich 10 ÷ 100 Hz

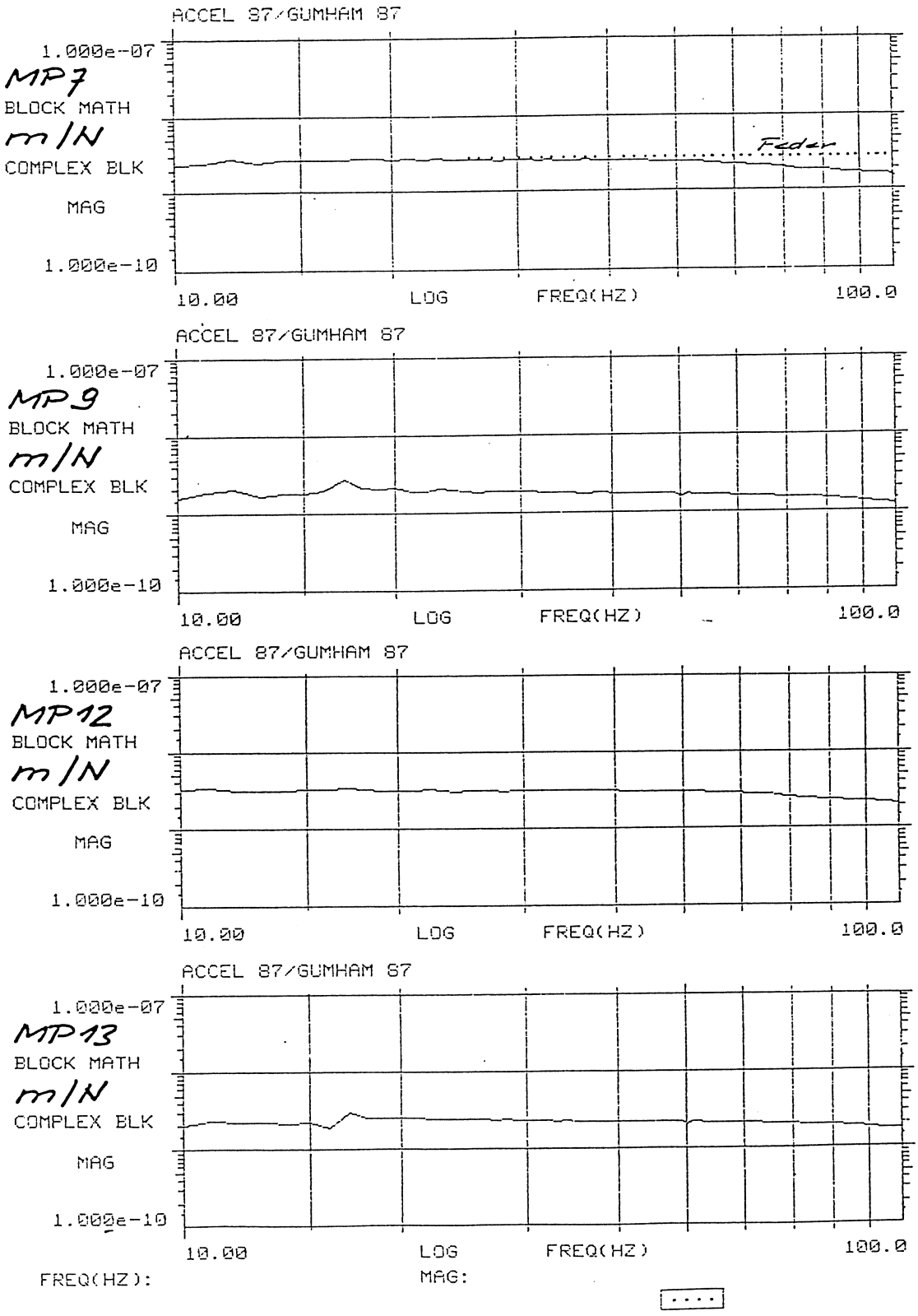


Fig. 23 Impulsdauer bei Schlag über PVC-Spitze im Frequenzbereich 10 ÷ 1000 Hz

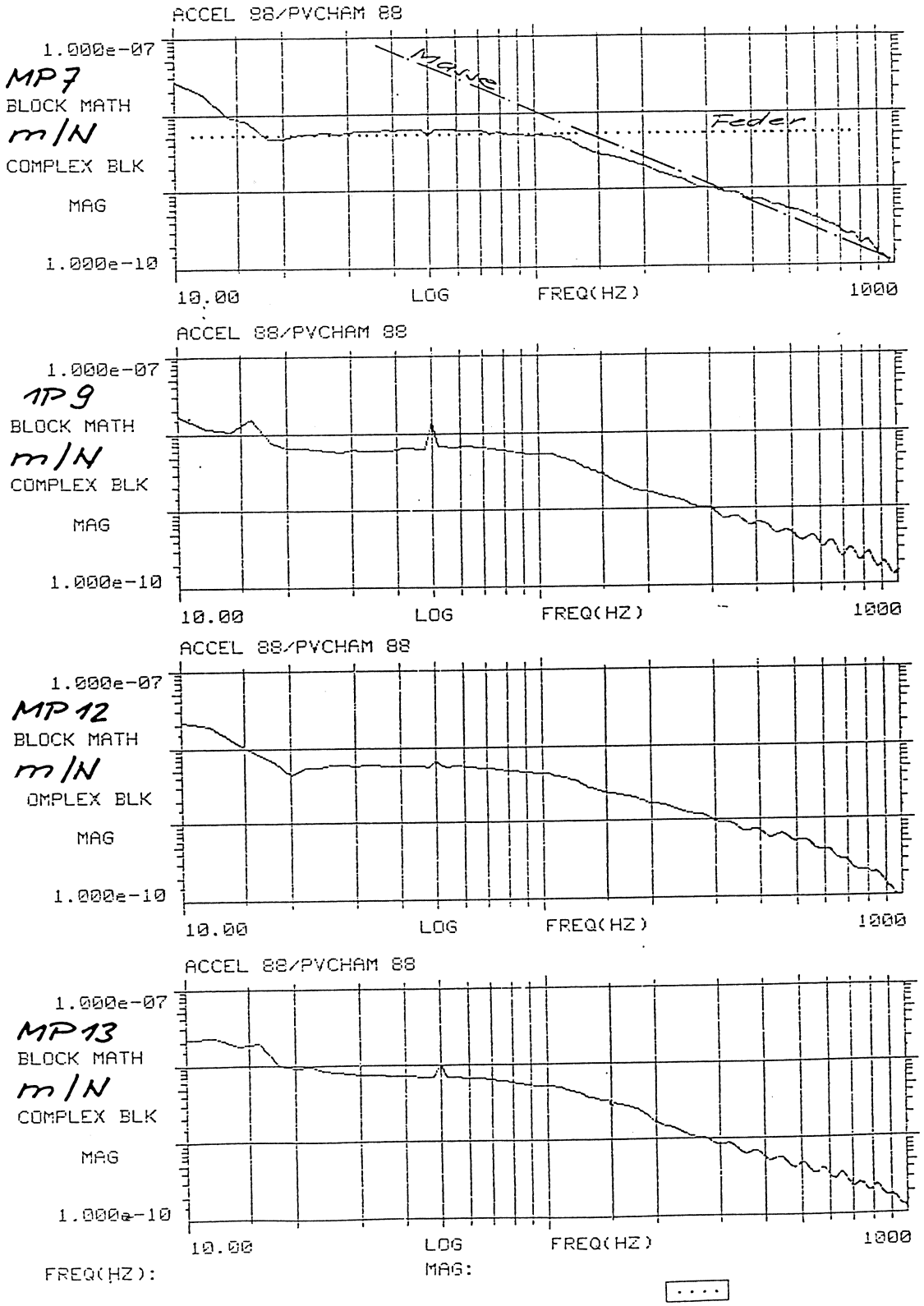


Fig. 24 Vergleich der frequenzabhängigen Verformungssteifigkeit von Platte und Unterlage

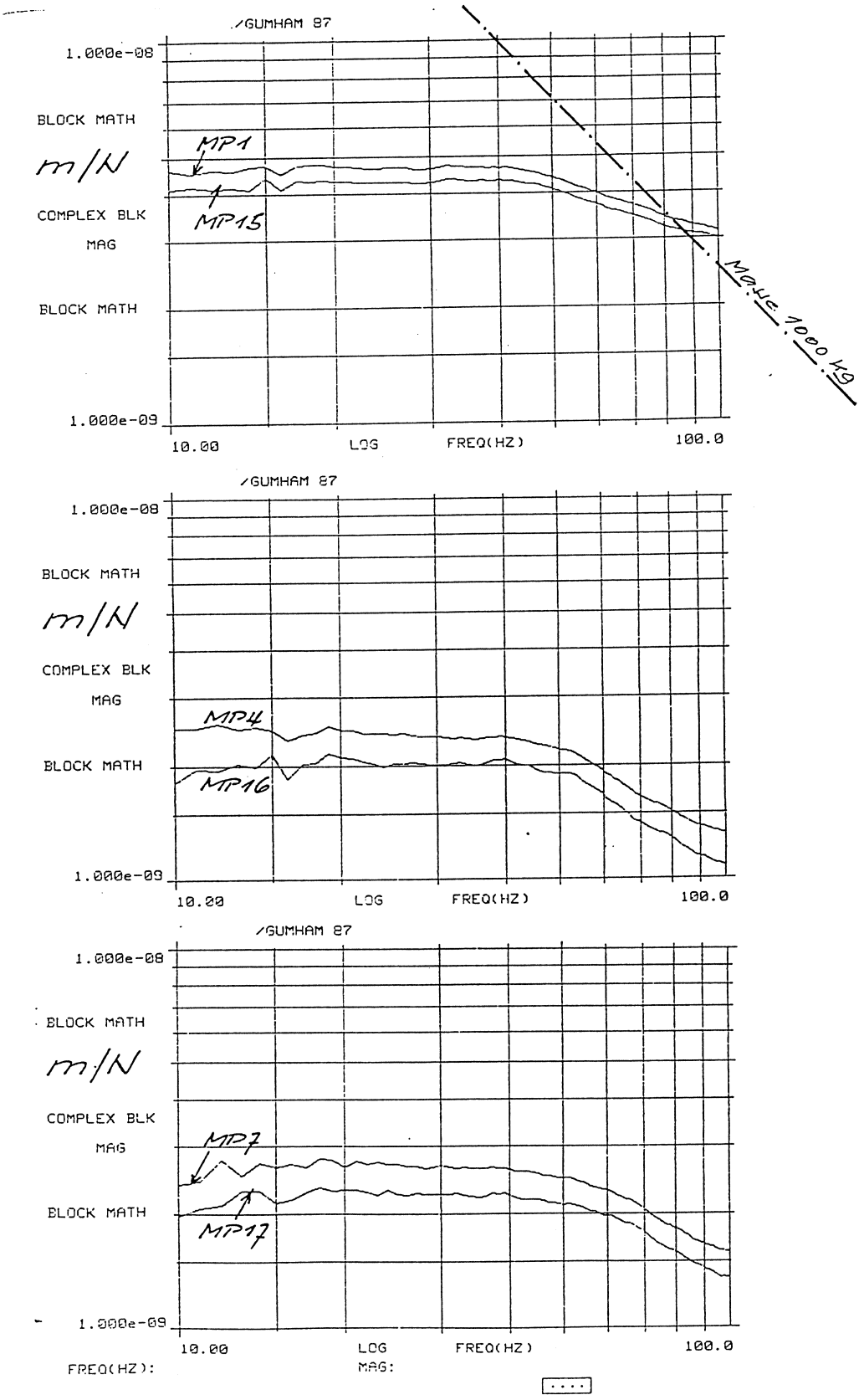


Fig. 25 Integration der Beschleunigungsantwort bei Stoss mit Gummispitze

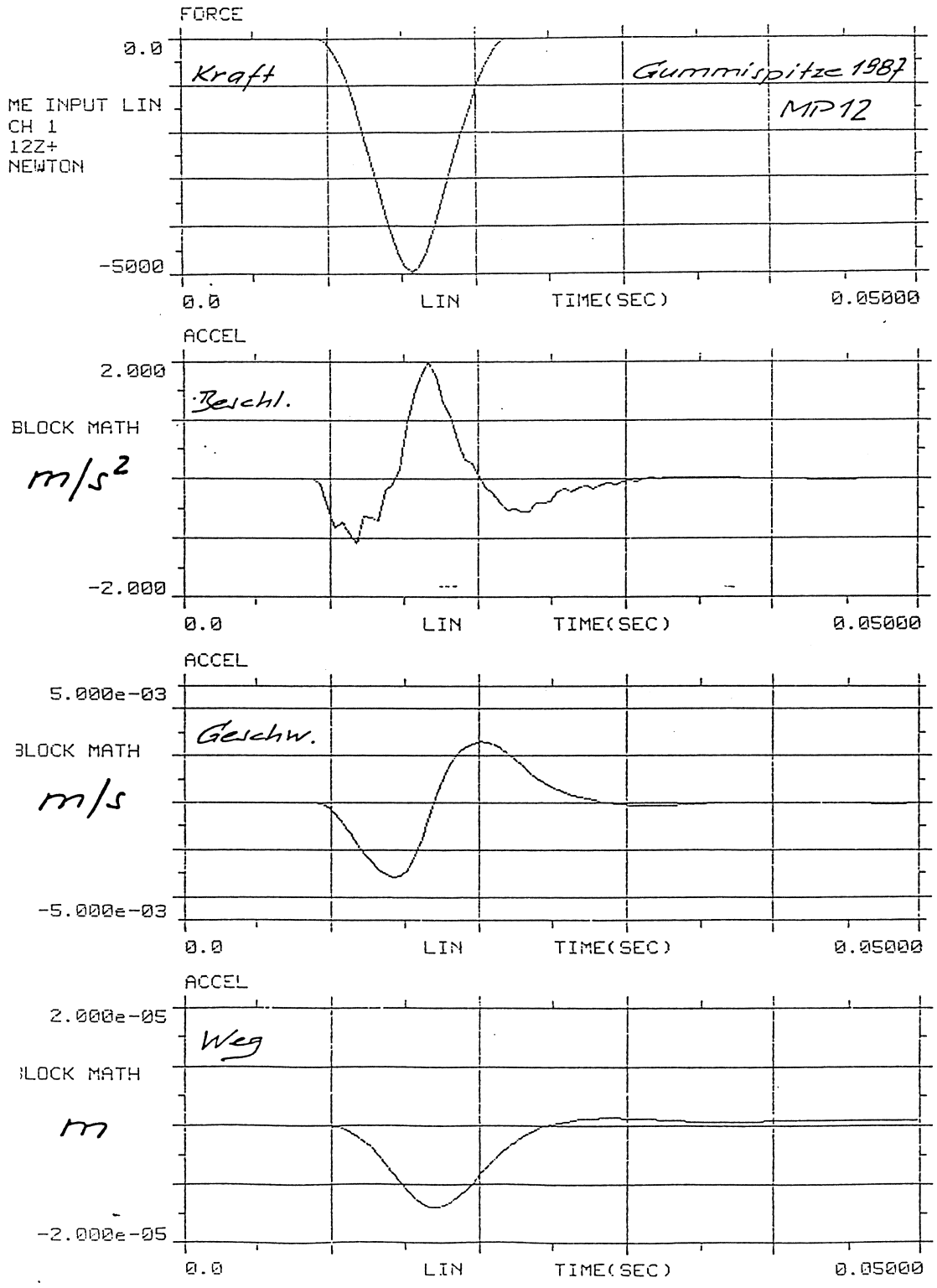


Fig. 26 Integration der Beschleunigungsantwort bei Stoss mit PVC-Spitze

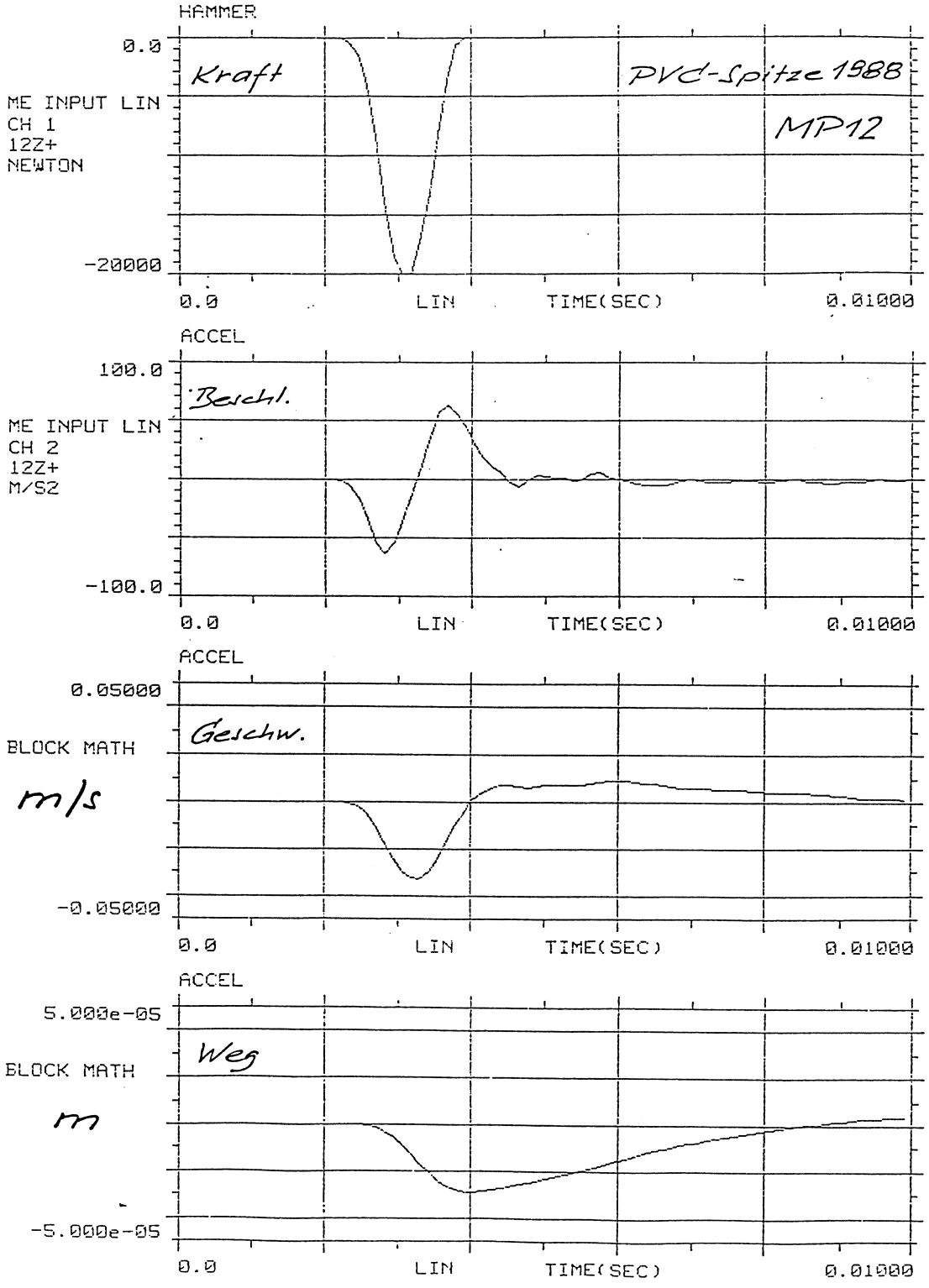


Fig. 27 Zeitlicher und örtlicher Dehnungsverlauf in der Platte nach Hammer-Puls an den Erregungspunkten MP 7

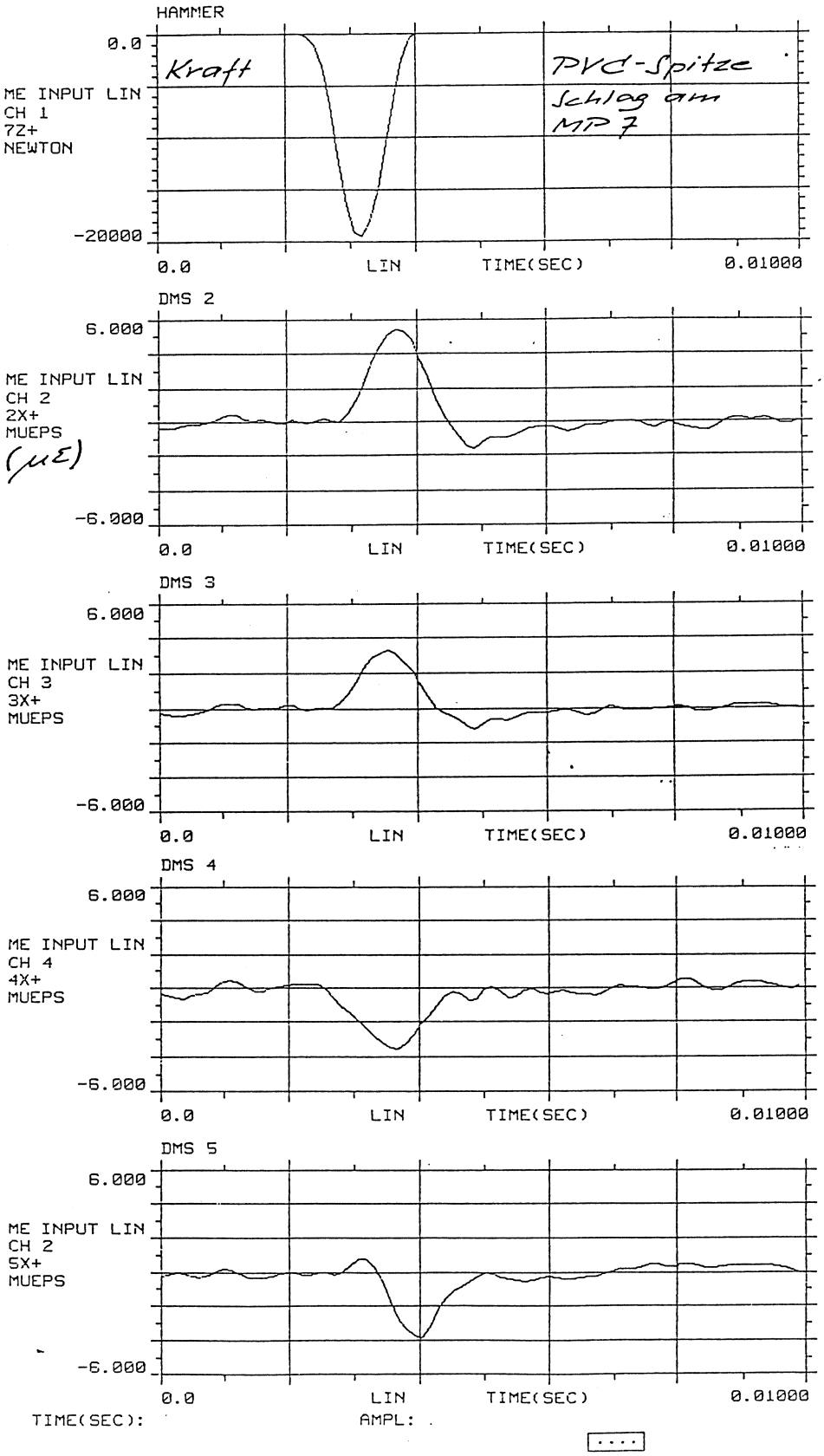
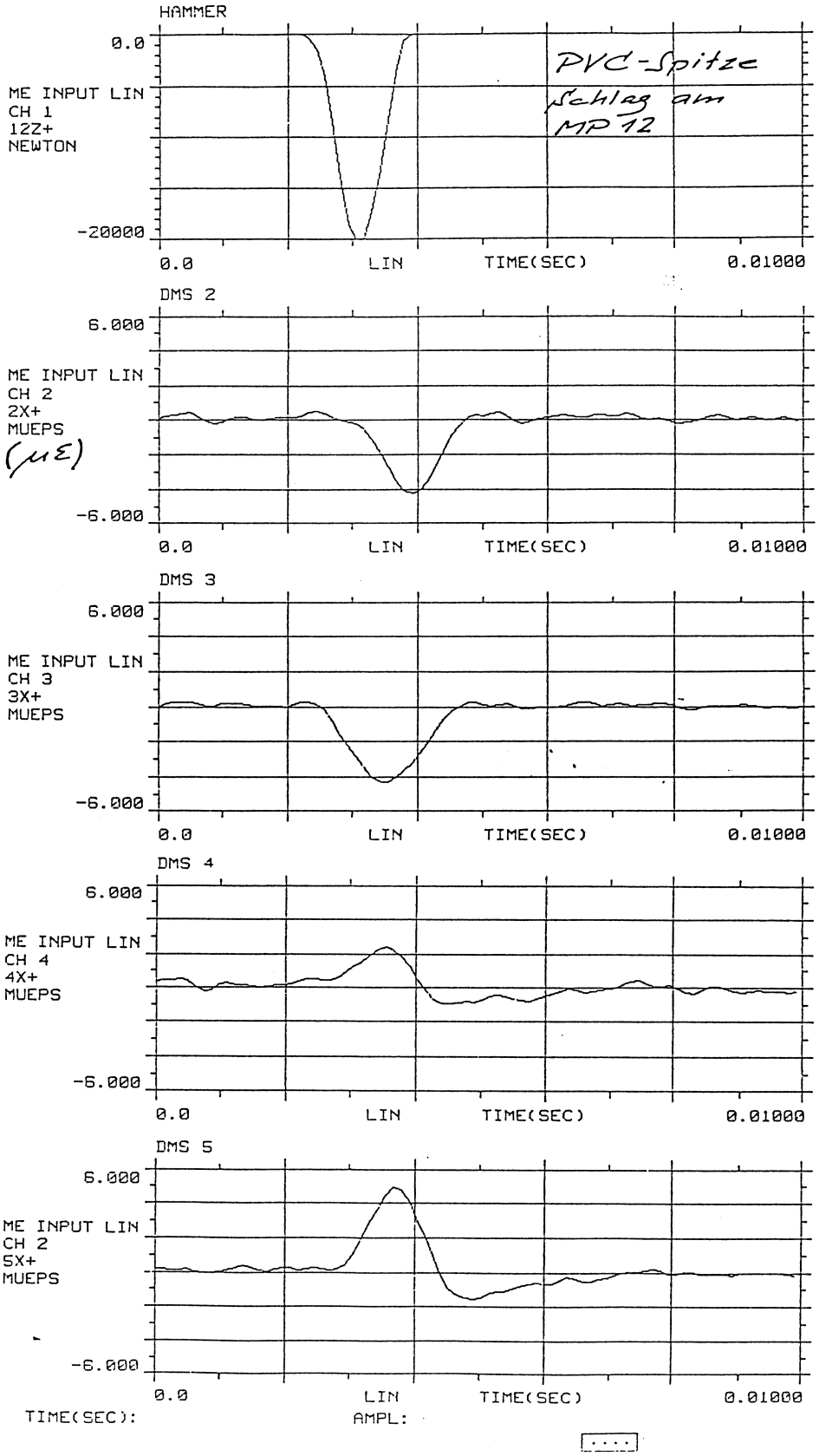



Fig. 28 Zeitlicher und örtlicher Dehnungsverlauf in der Platte nach Hammer-Puls an den Erregungspunkten MP 12