

Filler für bituminöses Mischgut

Untersuchung an 10 industriellen Füllern

Uebersetzen von Prüf- und Qualitätsvorschriften

Eidgenössisches Departement des Innern, Bern

Forschungsauftrag 3 / 83

Z U S A M M E N F A S S U N G

Wichtigste in der Schweiz gebräuchliche Filler und drei Referenzfiller (Kalk, Quarz und Ton) genau definierter Zusammensetzung wurden in vorliegender Forschungsarbeit untersucht. Verschiedene, teilweise schon in früheren Untersuchungen verwendete Methoden wurden auf heutige Fremd- und Rückgewinnungsfiller angewendet. Die Korngrößenverteilung heutiger Rückgewinnungsfiller ist signifikant fein- und feinstkornreicher als die der vor 15 Jahren untersuchten Filler.

Zum Erfassen der versteifenden Wirkung wurden neu Viskositätsmessungen herangezogen. Dabei erwies sich das Auswerten der Fliesskurven als nützlich. Es kann aus ihrer Steigung bei sehr kleinem Schergefälle der Grenzwert der Viskosität für ein gegen 0 strebendes Schergefälle ermittelt werden. Nach den vorliegenden Untersuchungen bildet dieser Wert für die Temperatur von 60 °C einen sehr guten Kennwert für die versteifende Wirkung von Fillern. Um diese Methode normieren zu können, sind noch Ringversuche durchzuführen.

Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Mischungen konnten mittels Schwingprüfungen detailliert erfasst werden. Beispielsweise führen Veränderungen des Fillergerüsts unter Belastung zu starken Abnahmen der Steifigkeit von solchen Mischungen unter Belastung. Im Bereich tiefer Temperaturen konnten Rissbildungen und beim Wiederaufwärmen "Heilungsvorgänge" beobachtet werden. Die ausgearbeiteten Methoden zum umfassenden und genauen Abklären verschiedenster Aspekte des mechanischen Verhaltens sind nach unserer Auffassung wichtig für die Praxis.

Die Gesamtheit der durchgeführten Untersuchungen liefert ein repräsentatives Bild heute gebräuchlicher Fremd- und Rückgewinnungsfiller. Die Ergebnisse haben auch für Restfiller Gültigkeit.

Die Grundlage für die im Dezember 1988 erschienene Schweizer Norm SN 670'760a bildeten die vorliegenden Resultate, die rechtzeitig den Normenkommissionen zur Verfügung standen.

R E S U M E

Les principaux fillers courants en Suisse et trois fillers de référence (calcaire, quartz et argile) de composition exactement définie ont été étudiés dans ce travail de recherche. Différentes méthodes d'essai, pour certaines déjà utilisées dans des études précédentes, ont été appliquées aux fillers d'apport et aux fillers récupérés actuels. La composition granulométrique des fillers récupérés actuels est significativement plus riche en grains fins et en grains très fins que celle des fillers étudiés il y a 15 ans.

Pour déterminer l'action rigidifiante, on a utilisé, ce qui est nouveau, des mesures de viscosité. L'interprétation des courbes d'écoulement s'est révélée utile. A partir de leur pente pour de très faibles gradients de cisaillement, on peut déterminer la valeur limite de la viscosité pour un gradient de cisaillement tendant vers 0. Cette étude a montré que cette valeur pour une température de 60°C constitue une très bonne valeur indicatrice de l'action rigidifiante des fillers. La normalisation de cette méthode demandera encore des essais interlaboratoires.

Les propriétés mécaniques des mélanges filler/bitume peuvent être déterminées de manière détaillée par des essais oscillatoires. Par exemple, des modifications du squelette de filler sous charge peuvent conduire à une forte diminution de la rigidité de tels mélanges sous charge. On a pu observer des fissurations dans le domaine des basses températures et des "régénérations" lors du réchauffement. Les méthodes élaborées pour étudier de manière complète et précise les aspects les plus différents du comportement mécanique sont à notre avis importantes pour la pratique.

L'ensemble des examens effectués fournissent une image représentative des fillers d'apport et des fillers récupérés actuellement courants. Ces résultats sont aussi valables pour les fillers résiduels.

Les résultats de la présente étude, qui ont pu être mis à temps à la disposition des commissions de normalisation, constituent la base de la norme suisse SN 670'760a parue en décembre 1988.

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

Seite

I	Einleitung	4
II	Zweck des Forschungsauftrages	5
III	Begriffe, Definitionen	6
IV	Untersuchungsmaterialien	7
V	Untersuchungen über Materialbeschaffenheit	7
A	Petrographisch-mineralische Untersuchung	7
B	Charakterisieren der Kornform	10
C	Korngrössenverteilung	15
1.	Korngrössenverteilung der Steinmehle	
2.	Korngrössenverteilung der Filler	
D	Ermittlung des Gehaltes an Tonmineralien mittels Differenzen-Thermoanalyse (DTA-Diagramme)	31
VI	Volumetrische Untersuchungen	32
E	Hohlraumgehalt nach Rigden	32
F	Volumenänderung von EMPA-Prüfkörpern nach Wasserlagerung	33
G	Bitumenzahl nach Verfahren NL	34
VII	Stabilisierungswirkung der Filler	35
H	Erweichungspunkte Ring und Kugel von Filler-Bitumen-Gemischen	35
I	Viskositätsmessungen mittels Rotationsviskosimeter an Filler-Bitumen-Gemischen	51

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S	Seite
VIII Mechanische Untersuchungen an Gemischen von Fillern mit Bitumen mittels Schwingbelastung	95
J Zielsetzung	95
K Beschreibung der Prüfung	96
L Resultate der Untersuchung	125
M Auswertung der mechanischen Kennwerte	178
N Diskussion der Ergebnisse	241
O Anwendbarkeit des Prüfverfahrens	246
P Beurteilung des Prüfverfahrens	247
Q Zusammenhang mit den Resultaten anderer Prüfungen	248
IX Auswertung, Kommentar	249
X Folgerungen	262

I Einleitung

Nach Abschluss umfangreicher, grundlegender Forschungsarbeiten an Fillern (1968 bis 1974) in den Forschungsaufträgen 10/68 und 6/71, 1. und 2. Teil der "Untersuchung von Steinmehlen zur Erarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften" wurde die Norm SN 670'760 "Filler für bituminöses Mischgut, Qualitätsvorschriften" und die entsprechenden Prüfvorschriften 1976 veröffentlicht.

In der Folge wurden weitere Forschungsarbeiten an Filler-Bitumen-Gemischen durchgeführt, wobei insbesondere Fragen der Stabilisierungswirkung im Vordergrund standen. In den Forschungsaufträgen 31/77 und 1/81 wurden in Ergänzung des empirisch-technologischen Prüfverfahrens der Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Filler-Bitumen-Gemischen (im Vergleich zum Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bindemittels) Messungen der Viskosität mit dem Rotationsviskosimeter und dem Balance-Rheometer durchgeführt. Diese Viskositätsmessungen zeigten deutlich differenzierende und besser reproduzierbare Ergebnisse. Somit werden in dieser Richtung weitere Untersuchungen bezüglich Stabilisierungswirkung der Filler dringend nötig. In den letzten Jahren war ausserdem bei den industriellen Fillern eher eine Zunahme der Mahlfineinheit festzustellen. Ebenso wurde die Korngrössenverteilung der Rückgewinnungsfüller durch Verwendung neuer Einrichtungen (Tuchfilter) wesentlich verändert.

Durch die vorstehend erwähnten Gegebenheiten sowie im Zusammenhang mit der neu gegebenen Korngrössengrenze bis 0.09 mm gegenüber bisher 0.08 mm (Wechsel der Analysensiebe) sollen in umfangreichen Untersuchungen an etwa zehn industriellen Fillern (Eigen- und Fremdfüller) weitere Grundlagen zur Ueberarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften für Filler geschaffen werden. Insbesondere sind in Ergänzung zu den Forschungsaufträgen 31/77 und 1/81 umfangreiche, vergleichende Untersuchungen mit den in der Praxis tatsächlich zur Anwendung gelangenden Filler angezeigt.

Zudem ist zehn Jahre nach Abschluss der ersten umfangreichen Untersuchungen im Sinn einer Bestandesaufnahme "State of the Art" eine umfassende Untersuchung hauptsächlicher, heute zur Anwendung gelangender Filler erforderlich. Die aus neuen Untersuchungen zur gewinnenden Resultate sollen weitere Erkenntnisse zur Beurteilung der Filler und für die Praxis daraus neue und direkt umsetzbare Ergebnisse liefern. Damit sollen die Untersuchungen an Fillern abgeschlossen und die Revision der Norm SN 670'760 ermöglicht werden.

II Zweck des Forschungsauftrages

In den Forschungsaufträgen 31/77 und 1/81 wurden in Ergänzung des empirisch-technologischen Prüfverfahrens der Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel von Filler-Bitumen-Gemischen (im Vergleich zum Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bindemittels) die Messung der Viskosität mit dem Rotationsviskosimeter und dem Balance-Rheometer zur Bestimmung der Stabilisierungswirkung der Filler durchgeführt. Die Viskositätsmessungen zeigten deutlich differenzierendere und besser reproduzierbare Ergebnisse, wobei die Messungen lediglich an den drei petrographisch grundsätzlich verschiedenen, gut definierten Fillerarten K (Kalkfiller), Q (Quarzfiller) und T (Opalinus-Tonfiller) durchgeführt wurden.

Im Zusammenhang mit der für Filler neu gegebenen Korngrössengrenze bis 0.09 mm gegenüber bisher 0.08 mm sollen in umfangreichen Untersuchungen an etwa zehn industriellen Fillern (Rückgewinnungs- und Fremdfiller) weitere Grundlagen zur Ueberarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften für Filler geschaffen werden. Insbesondere sind in Ergänzung zu den Forschungsaufträgen 31/77 und 1/81 umfangreiche und vergleichende Untersuchungen über die Stabilisierungswirkung der in der Praxis tatsächlich zum Einsatz gelangenden Filler durchzuführen.

In den letzten Jahren war ausserdem bei den Fremdfillern eher eine Zunahme der Mahlfeinheit festzustellen. Ebenso wurde die Korngrößenverteilung der Rückgewinnungsfiller durch Verwendung neuer Einrichtungen (Tuchfilter) wesentlich verändert.

Zudem ist etwa zehn Jahre nach Abschluss der ersten umfangreichen Untersuchungen im Sinn einer Bestandesaufnahme eine umfassende Untersuchung hauptsächlich, heute zur Anwendung gelangender Filler erforderlich. Damit sollen die Untersuchungen an Fillern abgeschlossen und die Revision der Norm SN 670'760 ermöglicht werden.

III Begriffe, Definitionen

Steinmehl	Angeliefertes Untersuchungsmaterial. Sehr feine, meist gebrochene Gesteins- und Mineralkörnungen.
Filler	Ausgesiebte Kornfraktion unter 0.09 mm eines Steinmehles.
Fremdfiller	Durch Mahlen des Ausgangsgutes und anschliessendes trockenes Trennen hergestelltes Steinmehl bzw. Filler.
Rückgewinnungsfiller	Steinmehle und Filler aus Entstaubungsanlagen beim Aufbereiten von bituminösem Mischgut sowie beim Herstellen von Brechsand und Splitt.
Restfiller	Im Sand verbleibender Anteil unter 0.09 mm.

IV Untersuchungsmaterialien

Grundsätzlich gelangen bei den Untersuchungen Filler gleicher Provenienzen zur Verwendung, die auch bei den Forschungsaufträgen 10/68, 6/71, 31/77 und 1/81 untersucht worden sind. Zusätzlich werden veränderte sowie neue Rückgewinnungsfiller untersucht.

Neben den vorgenannten Fremd- und Rückgewinnungsfillern werden die in den abgeschlossenen Forschungsaufträgen eingehend untersuchten, petrographisch grundsätzlich verschiedenen, gut definierten Fillerarten K (Kalkfiller), Q (Quarzfiller) und T (Opalinus-Tonfiller) bei den Untersuchungen ebenfalls mitverwendet.

Die zum Einsatz gelangenden Filler aus der Praxis sind die folgenden mit Buchstaben verschlüsselten Filler **A, B*, C, D, E*, F, G*, H, M, N* und O***. Mit * sind Rückgewinnungsfiller zusätzlich bezeichnet.

Die gut definierten Filler Kalkfiller, Quarzfiller und Opalinus-Tonfiller werden mit den Buchstaben **K, Q und T** bezeichnet.

Bei den Untersuchungen wird wie bei den abgeschlossenen Forschungsaufträgen das im Strassenbau meist verwendete Bindemittel Bitumen B 80/100 eingesetzt. Das verwendete Bitumen B 80/100 stammt aus dem Bestand der EMPA.

V Untersuchungen über die Materialbeschaffenheit

A Petrographisch-mineralogische Untersuchung

Filler A

Karbonatgehalt 55 Masse-%. Im übrigen weit vorwiegend Quarz- und Hornstein (kryptokristalline bis mikrokristalline Kieselaggregate aus Kieselkalk-Gesteinen). Untergeordnet Glaukonit, Chlorit und

einzelne weitere Silikate, darunter auch Spuren von Tonmineralien. Spuren von Russ- und Aschepartikeln. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.34 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: negativ.

Filler B*

Karbonatgehalt 59 Masse-%. Im übrigen weit vorwiegend Quarz- und Hornstein sowie andere Mineralien, wie oben. Etwa 2 bis 4 vol-% Russ- und Aschepartikel. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.37 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: schwach alkalisch.

Filler C

Karbonatgehalt 57 Masse-%. Im übrigen vorwiegend Hornsteinfragmente sowie in kleineren Mengen Quarzkörner, Spuren von Glaukonit, Chlorit und Tonmineralien. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.30 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: negativ.

Filler D

Karbonatgehalt 99 Masse-% in Form von mittel- bis grobkristallinem Kalkspat. Rest vorwiegend Quarz. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.35 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: sehr schwach alkalisch.

Filler E*

Karbonatgehalt 55 Masse-%. Im übrigen vorwiegend Quarzkörnchen. In kleineren Mengen auch Hornstein. Untergeordnet Feldspat, Amphibol und weitere Silikate. Spuren von Glimmer. Spuren von Russ- und Aschepartikeln. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.29 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: schwach alkalisch.

Filler F

Karbonatgehalt 100 Masse-% in Form von feinstkristallinem Kalkspat. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.36 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: sehr schwach alkalisch.

Filler G*

Karbonatgehalt 40 Masse-%. Im übrigen vorwiegend Quarzkörnchen. In kleineren Mengen auch Hornsteinfragmente. Untergeordnet Feldspat und weitere Silikate, darunter auch etwa 2 bis 3 vol-% Glimmerblättchen und Chlorit. Etwa 5 bis 7 vol-% Russ- und Aschepartikel. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 3.0 Masse-% (vorwiegend Kalkhydrat und Spuren von Sulfat). Reaktion mit Phenolphthalein: sehr stark alkalisch.

Filler H

Karbonatgehalt 48 Masse-% in Form von sehr grobem Kalkspat aus Marmorgesteinen. Im übrigen vorwiegend Quarz- und Silikatmineralien (Feldspat, Diopsid, Granat, Epidot). Etwa um 10 vol-% Glimmerblättchen (meist Biotit) sowie Chlorit. Untergeordnet Erzminerale und Graphitpartikel (ca. 2 bis 3 vol-%). Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.33 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: negativ.

Filler M

Karbonatgehalt 65 Masse-%. Im übrigen weit vorwiegend Quarz- und Hornsteinkörnchen. Untergeordnet Feldspat und andere Silikate, darunter auch deutliche Spuren von Tonmineralien. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.78 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: schwach alkalisch.

Filler N*

Karbonatgehalt 61 Masse-%. Im übrigen Quarz- und Hornsteinkörnchen. Untergeordnet Feldspat und weitere Silikate, darunter auch Glimmer in unbedeutenden Spuren und deutliche Mengen von Tonmineralien. Etwa 4 bis 6 vol-% Russ- und Aschepartikel. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 3.02 Masse-% (weit vorwiegend Kalkhydrat). Reaktion mit Phenolphthalein: sehr stark alkalisch.

Filler O*

Karbonatgehalt 46 Masse-%. Im übrigen vorwiegend Quarzkörnchen. In kleineren Mengen Hornsteinfragmente. Untergeordnet Feldspat und

weitere Silikate, darunter auch deutliche Mengen von Tonmineralien. Etwa 5 bis 6 vol-% Russ- und Aschepartikel. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 2.88 Masse-% (grösstenteils Kalkhydrat). Reaktion mit Phenolphthalein: sehr stark alkalisch.

Filler K

Karbonatgehalt 100 Masse-% in Form von feinstkristallinem Kalkspat. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.34 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: sehr schwach alkalisch.

Filler Q

Die Probe besteht nahezu ausschliesslich aus kristallinen Quarzkörnchen. In geringen Spuren treten Feldspat und Hornstein auf. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.28 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: negativ.

Filler T

Gehalt an Ton-, Chlorit- und Glimmermineralien 55 bis 65 Masse-%. Karbonatgehalt 7 Masse-%. Im übrigen weit vorwiegend Quarz und Feldspat. Untergeordnet auch andere Silikate. Gehalt an wasserlöslichen Salzen: 0.78 Masse-%. Reaktion mit Phenolphthalein: negativ.

B Charakterisieren der Kornform

Die mikroskopische Prüfung der Filler erlaubt folgende allgemeine Kornform-Charakterisierung:

Die Filler **D**, **F** und **K** weisen vorwiegend gedrungene Kornform auf. Größere Kalkspatrhomboeder sind durchwegs eckig und scharfkantig, feinkristalline Körner sind vor allem im Filler **F** stumpfkantig bis rund.

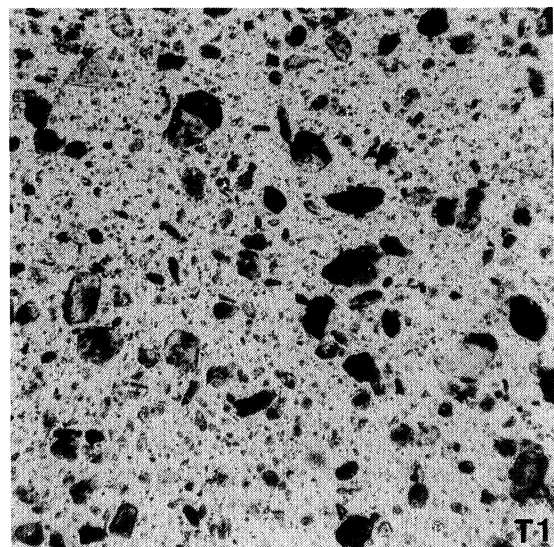
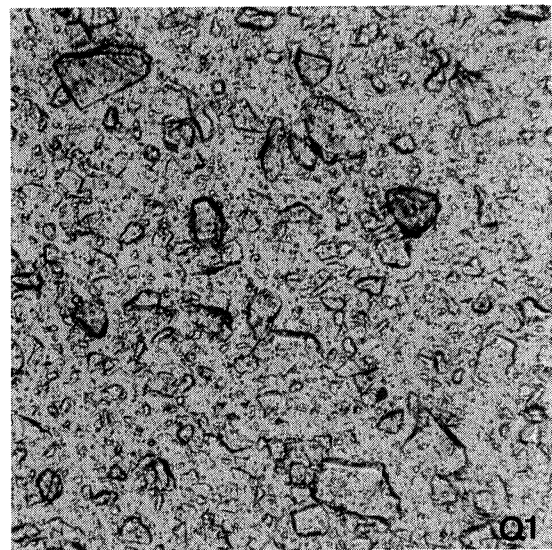
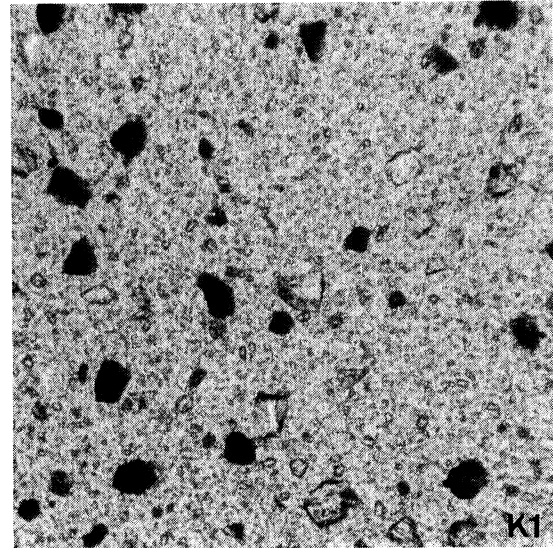
Der Filler **Q** besteht fast ausschliesslich aus scharfkantigen, splittrigen bis spiessigen Körnern. Aehnliche Kornformen dominieren auch in den Fillern **E* und H**, wobei der Filler **H** auch merkliche Mengen an blättrigen Anteilen führt.

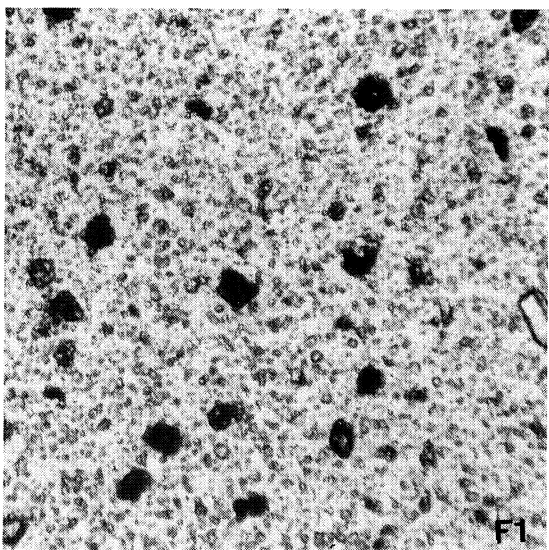
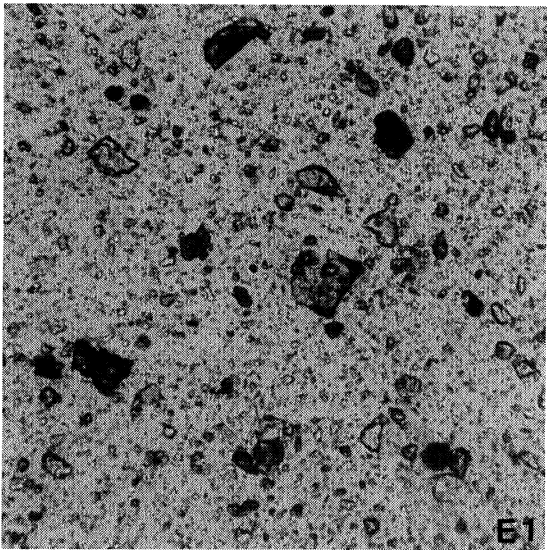
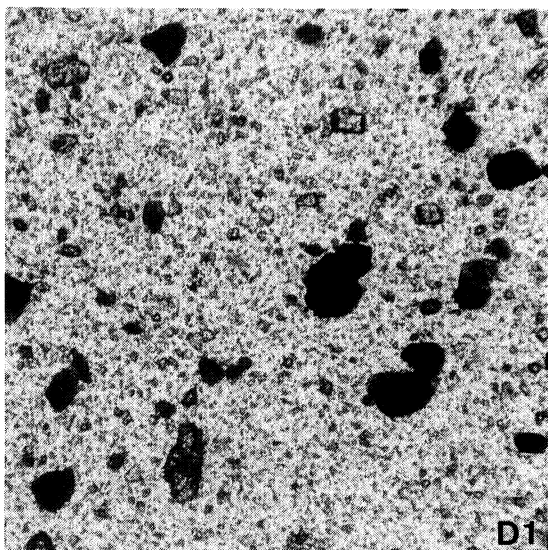
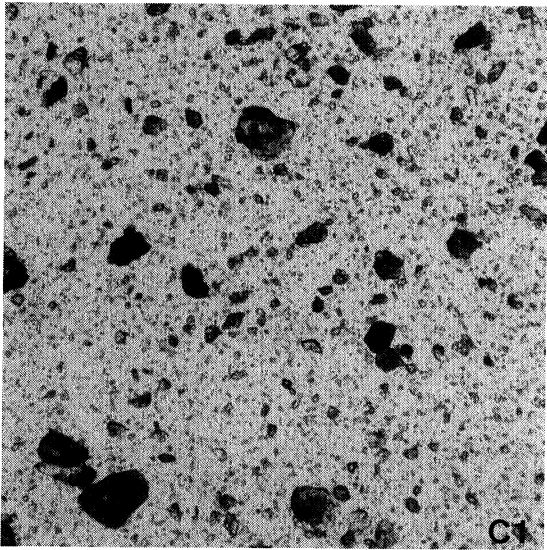
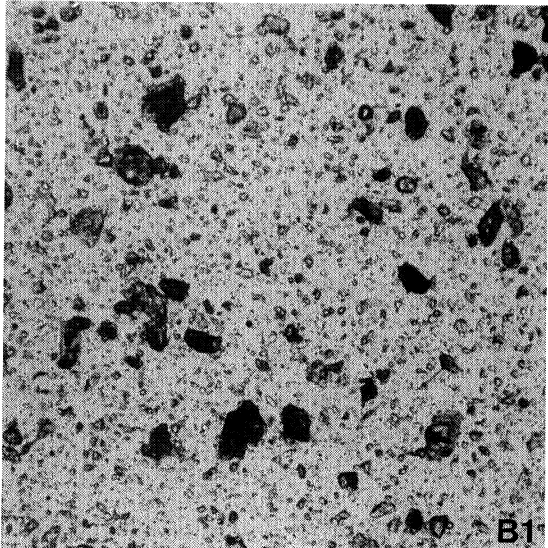
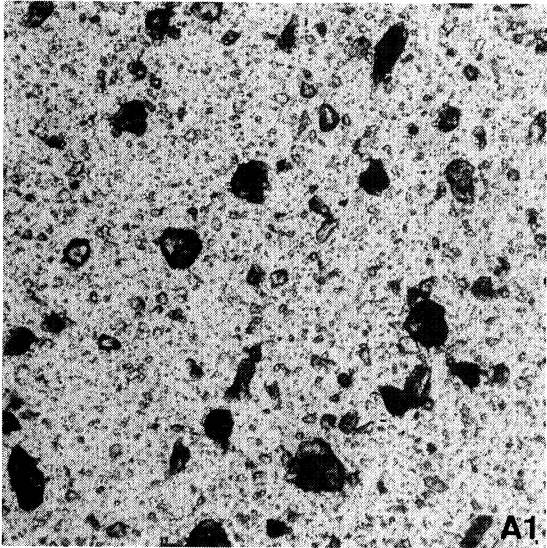
In den Fillern **A und C** treten vorwiegend nichtkubische (spiessige bis flache) Kornformen auf; gedrungene Körner sind nur in kleineren Mengen festzustellen.

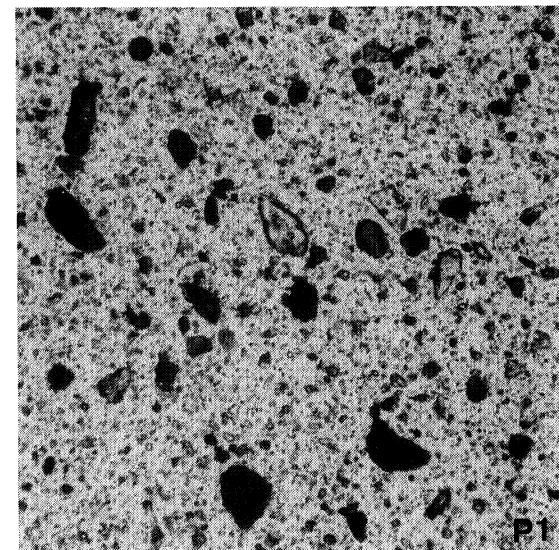
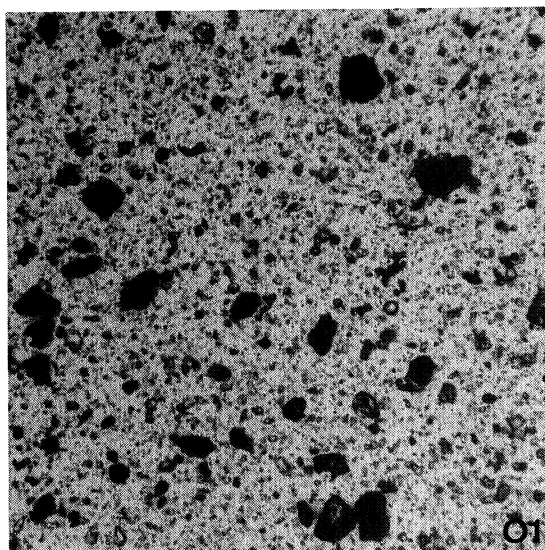
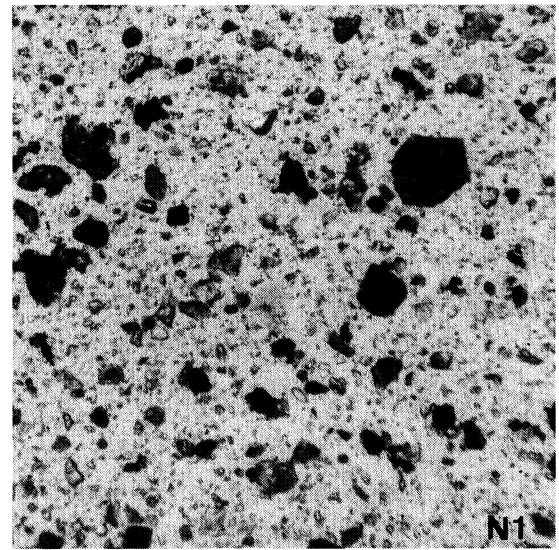
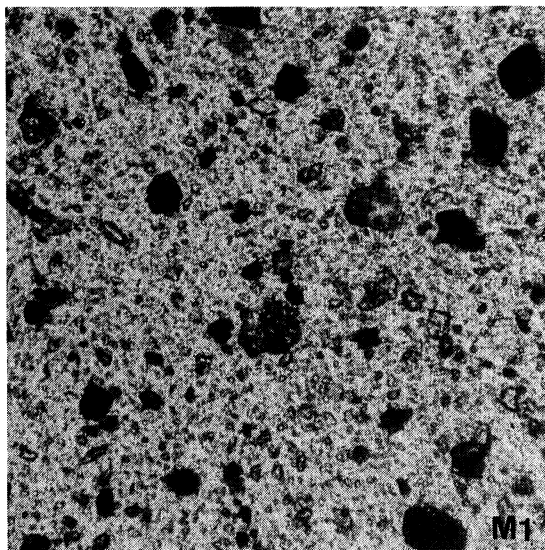
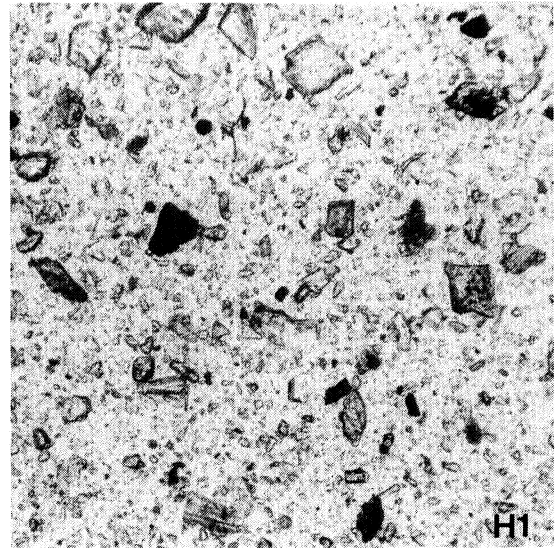
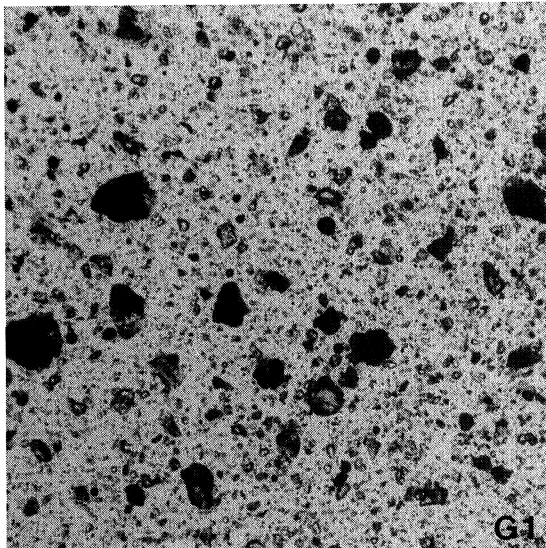
In den Fillern **B*, G*, M, N* und O*** halten sich gedrungene und nichtkubische Körner etwa die Waage, wobei die Einzelkörner vorwiegend eckig und scharfkantig erscheinen.

Der Filler **T** führt vorwiegend feinblättrige bis stengelige Körner und enthält auch merkliche Mengen an gedrungenen Körnern.

Kornformen (Vergrösserung: ca. 95-fach)







C Korngrößenverteilung

1. Korngrößenverteilung der Steinmehle (Siebanalyse)

Trockensiebung der angelieferten Steinmehle durch Maschensiebe mit den Maschenweiten:

0.5	mm
0.25	mm
0.125	mm
0.09	mm

Die Anteile unter 0.09 mm stellen den im Steinmehl vorhandenen Filler dar.

2. Korngrößenverteilung der Filler (Fraktion unter 0.09 mm, Sedimentationsanalyse)

Die Korngrößenverteilung der Filler wird gemäss Norm SN 670'818 "Sedimentationsanalyse nach Andreasen EMPA" durchgeführt. Die stark alkalisch reagierenden Filler **G***, **N*** und **O***, die in Wassersuspension ausflockten, wurden in Alkohol suspendiert, wobei Calciumchlorid als Dispersionsmittel verwendet wurde. Alle anderen Filler wurden in Wasser mit Natriumpyrophosphat dispergiert.

Die in Steinmehl enthaltenen Filleranteile, Fraktion unter 0.09 mm, werden bei der Sedimentationsanalyse als 100 Masse-% angenommen.

Auf den folgenden Seiten sind die Korngrößenverteilungen der Steinmehle und der Filler aufgelistet und graphisch dargestellt.

Korngrößenverteilung F I L L E R A

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	99.8	99.4	95.0	84.8

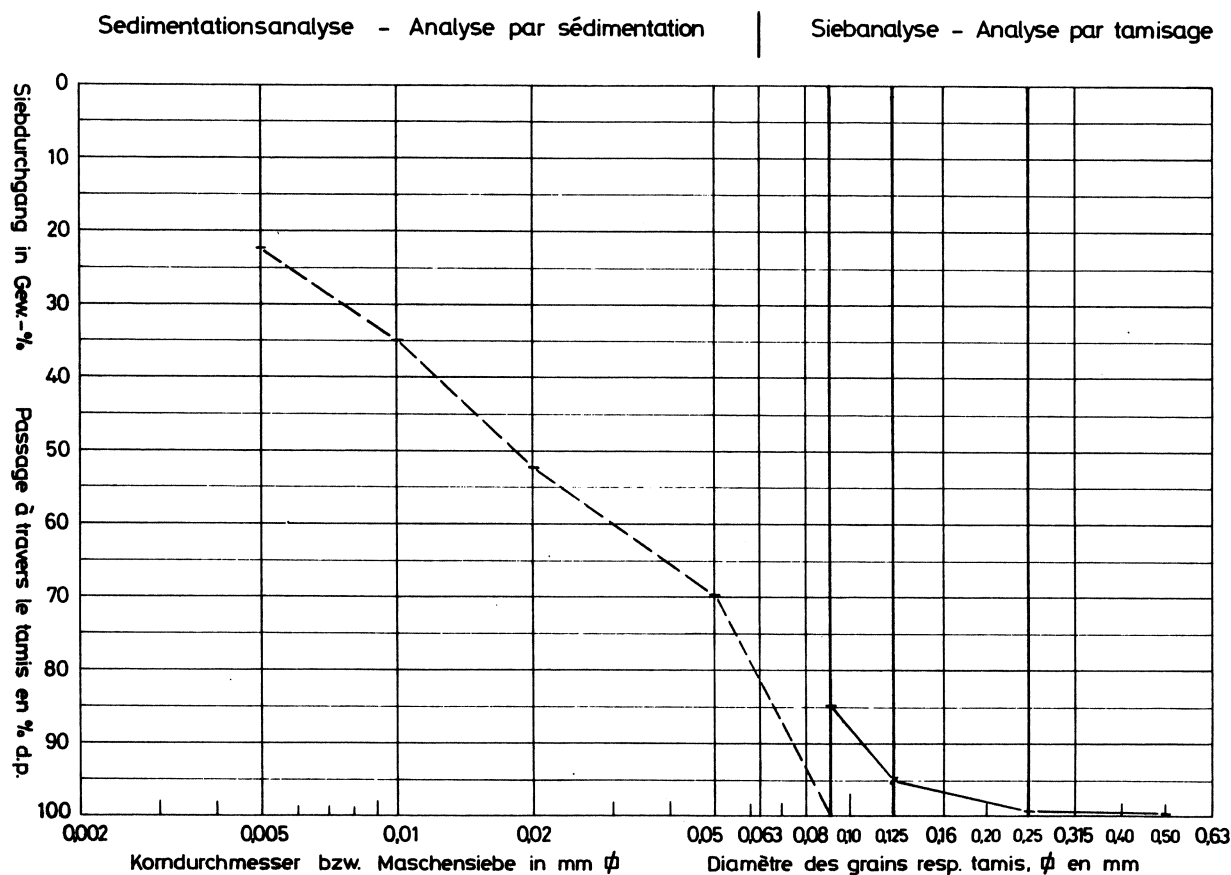
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	69.8	52.1	34.9	22.3

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

————— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R B*

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	99.8	99.4	97.2	93.0

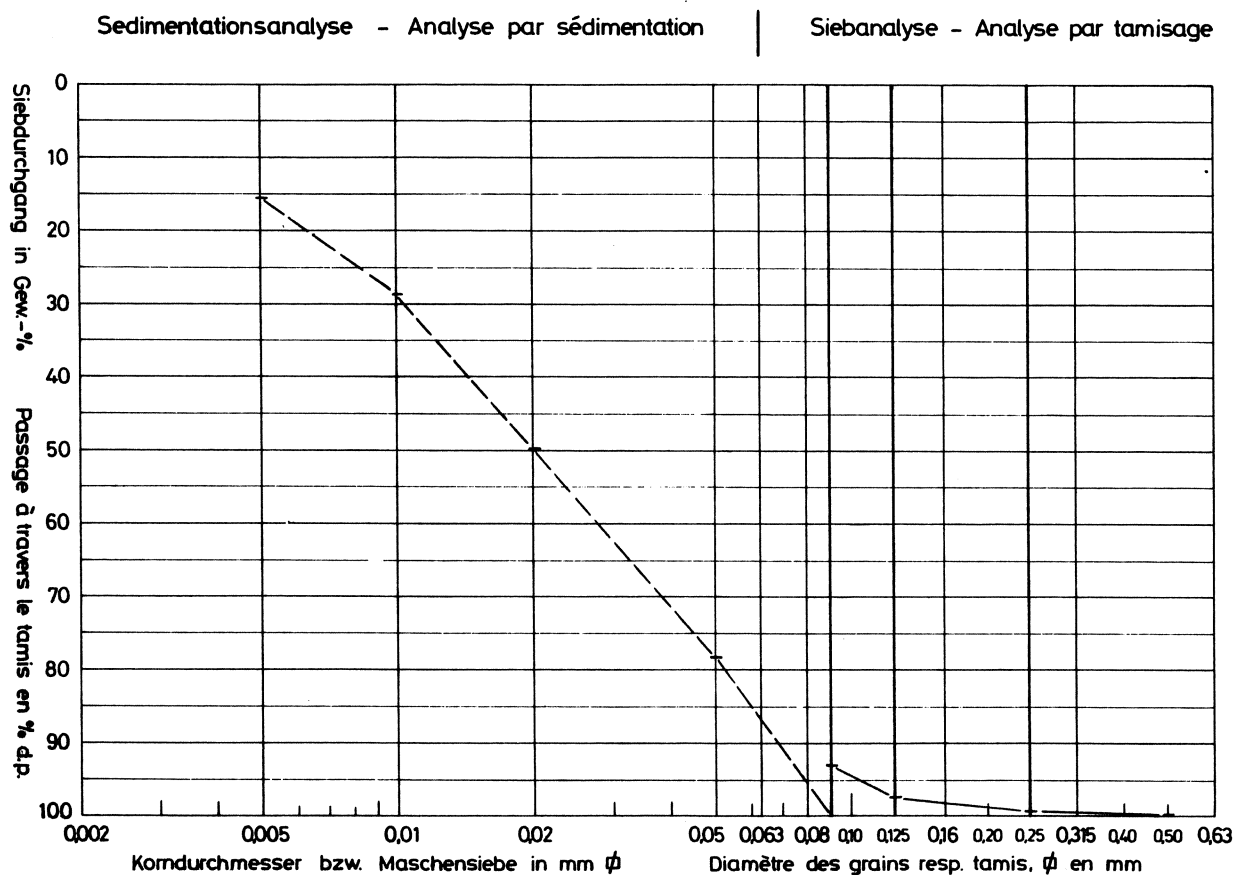
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	78.2	49.7	28.6	15.5

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

————— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrößenverteilung F I L L E R C

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%		100.0	97.0	86.6

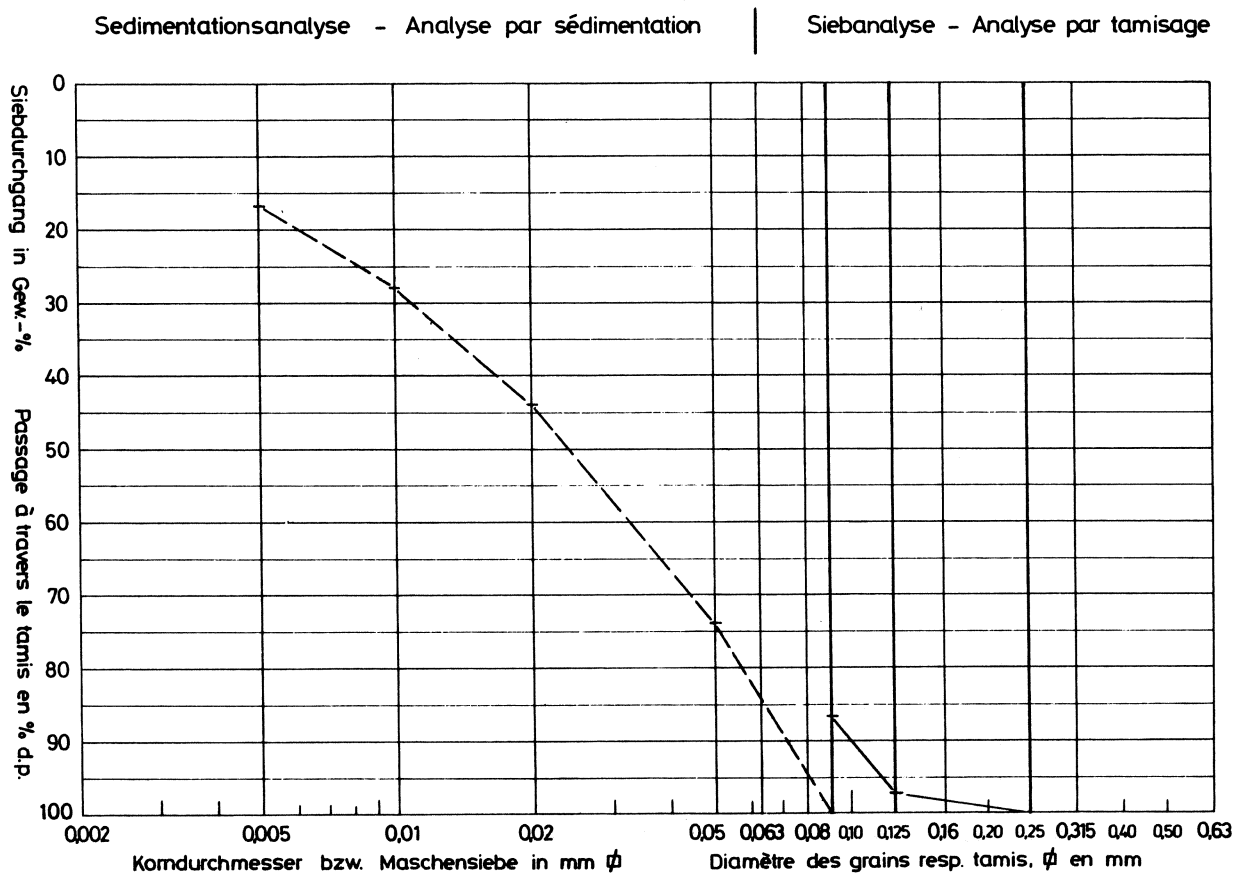
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	73.9	43.9	27.8	16.8

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrößenverteilung F I L L E R D

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	100.0	99.8	95.0	81.4

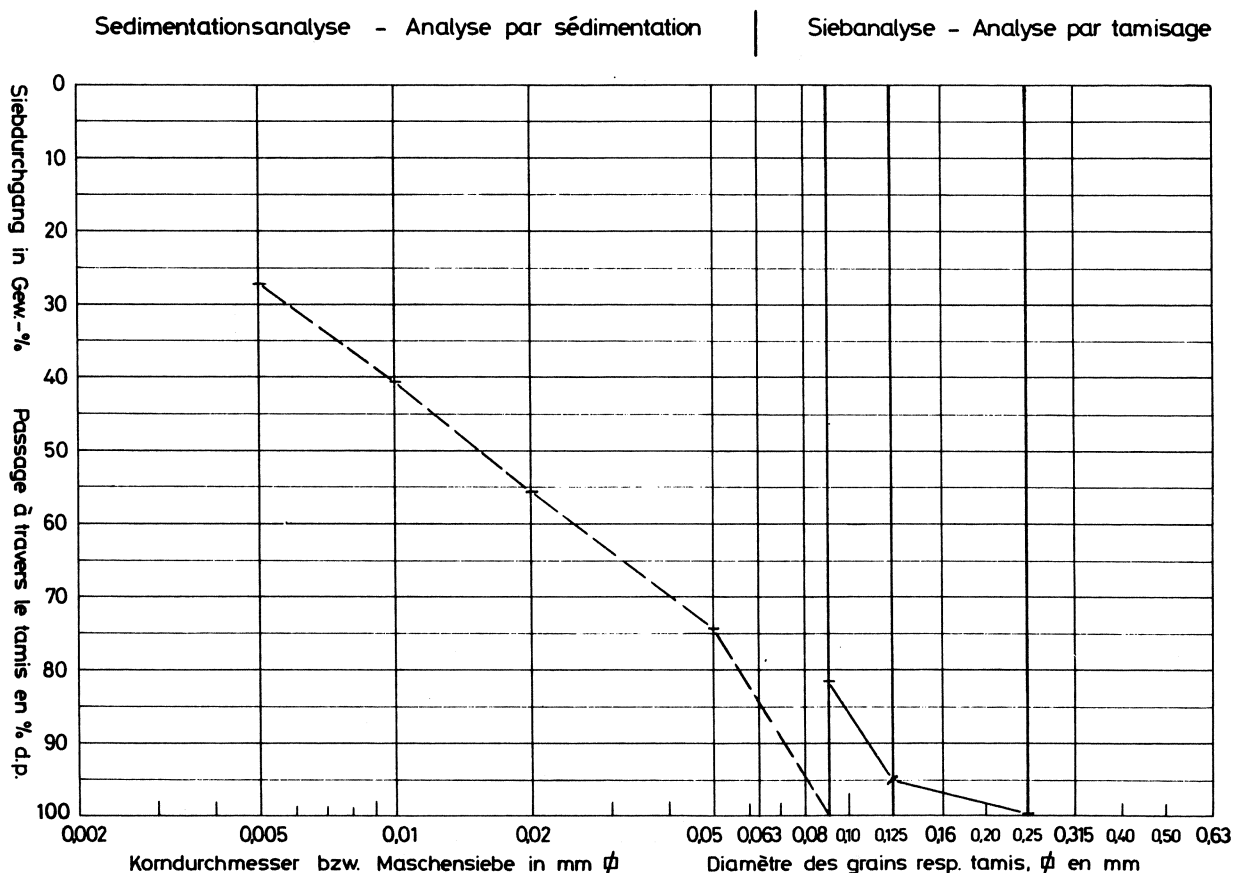
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	74.2	55.6	40.6	27.0

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

————— Steinmehl im Anlieferungszustand
 - - - - - Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrößenverteilung F I L L E R E*

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	100.0	98.8	90.8	83.6

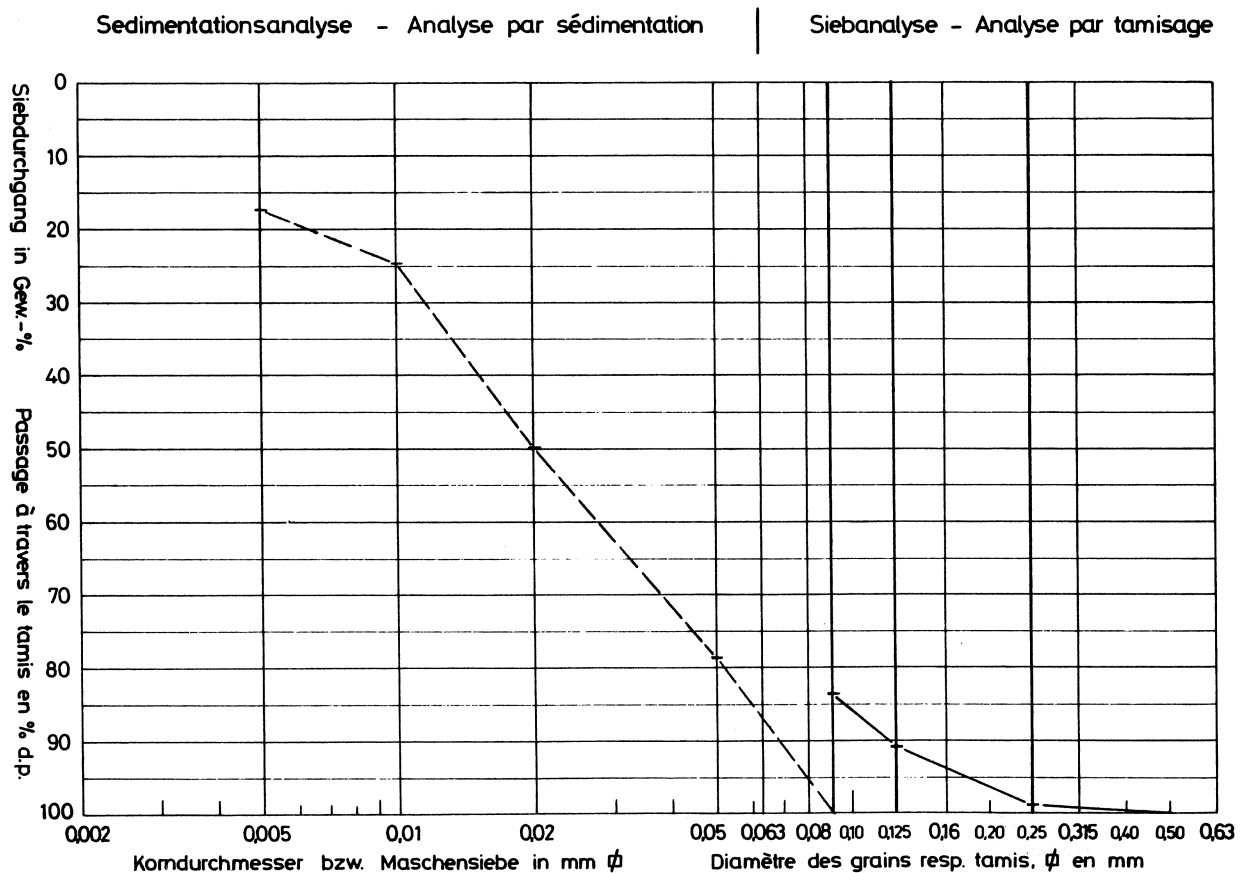
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	μm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	78.5	49.8	24.6	17.2

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

————— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R F

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%		100.0	94.8	89.4

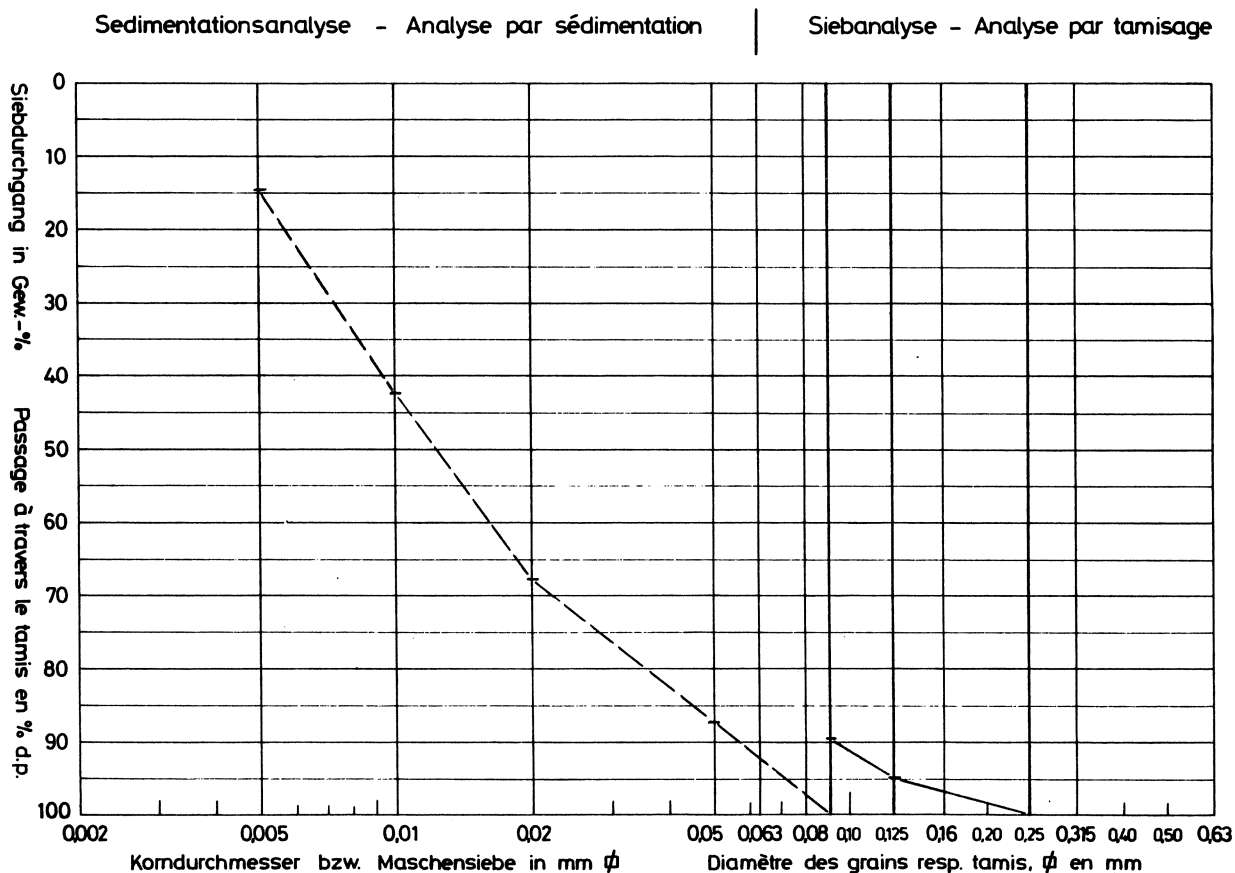
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	87.1	67.6	42.3	14.6

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrößenverteilung F I L L E R G*

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	100.0	99.2	86.4	73.4

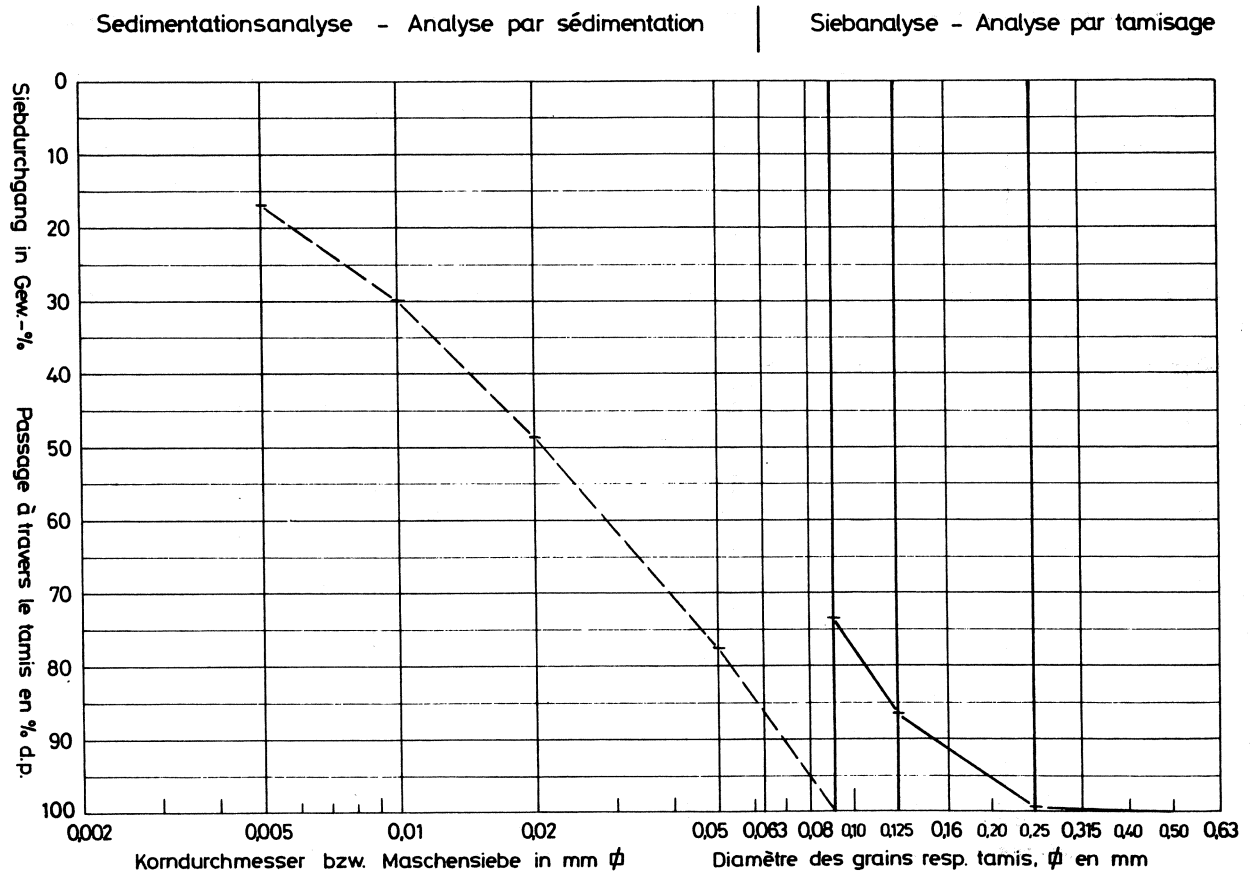
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	77.6	48.5	29.9	16.9

Filler sedimentiert in Alkohol mit Calciumchlorid als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R H

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%		100.0	98.2	93.0

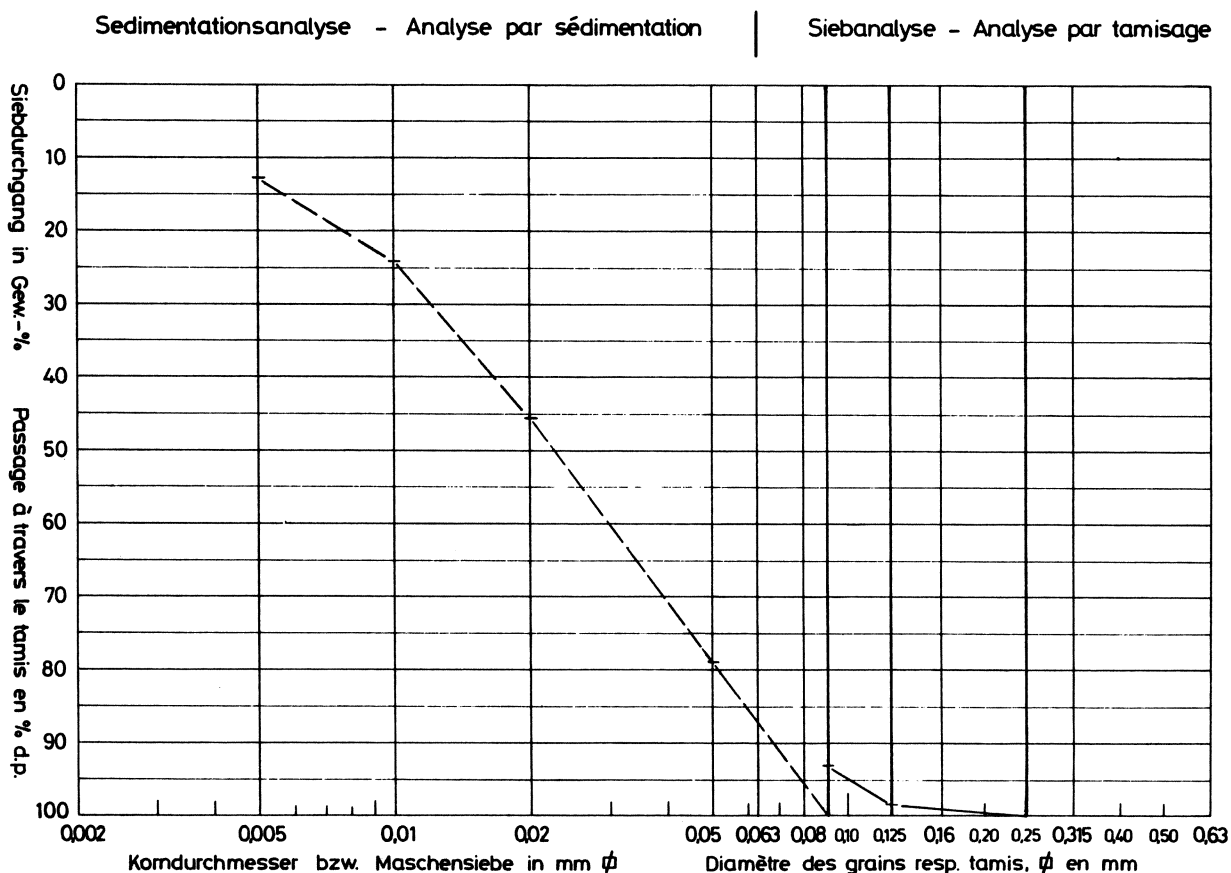
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	78.9	45.3	24.0	12.7

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R M

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%		100.0	97.8	88.6

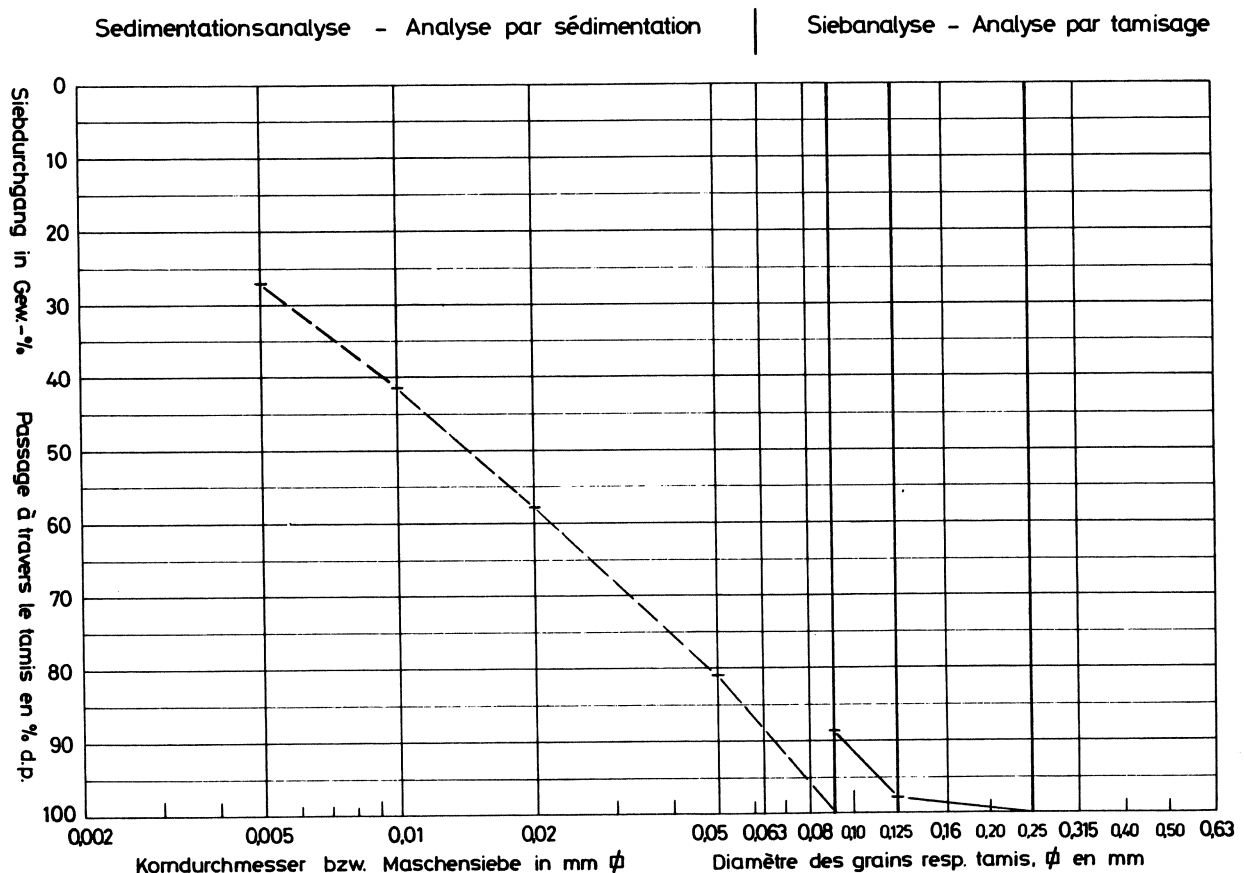
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	81.0	57.8	41.3	27.0

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R N*

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	99.4	92.4	75.4	65.2

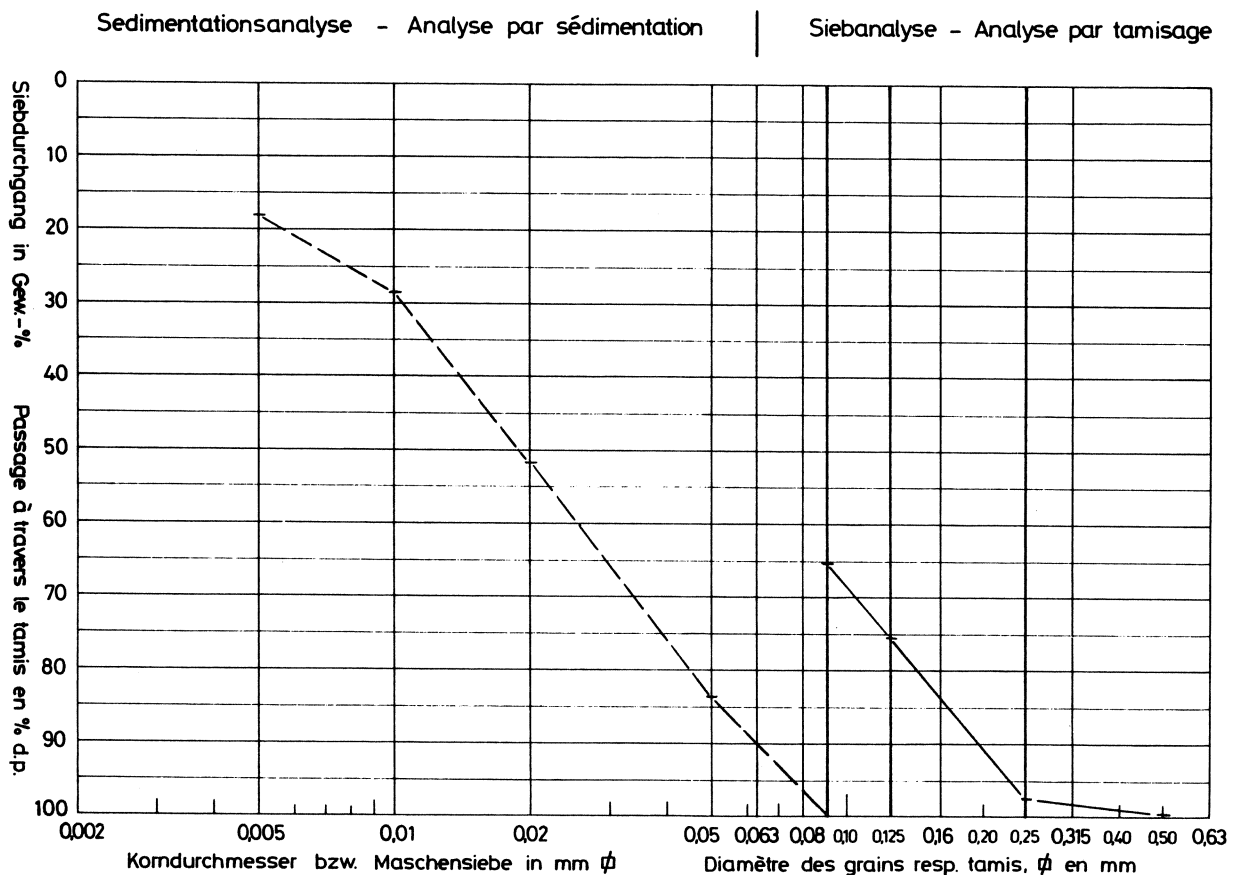
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	83.7	51.6	28.3	18.0

Filler sedimentiert in Alkohol mit Calciumchlorid als
Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrößenverteilung F I L L E R O*

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	100.0	98.6	88.8	79.4

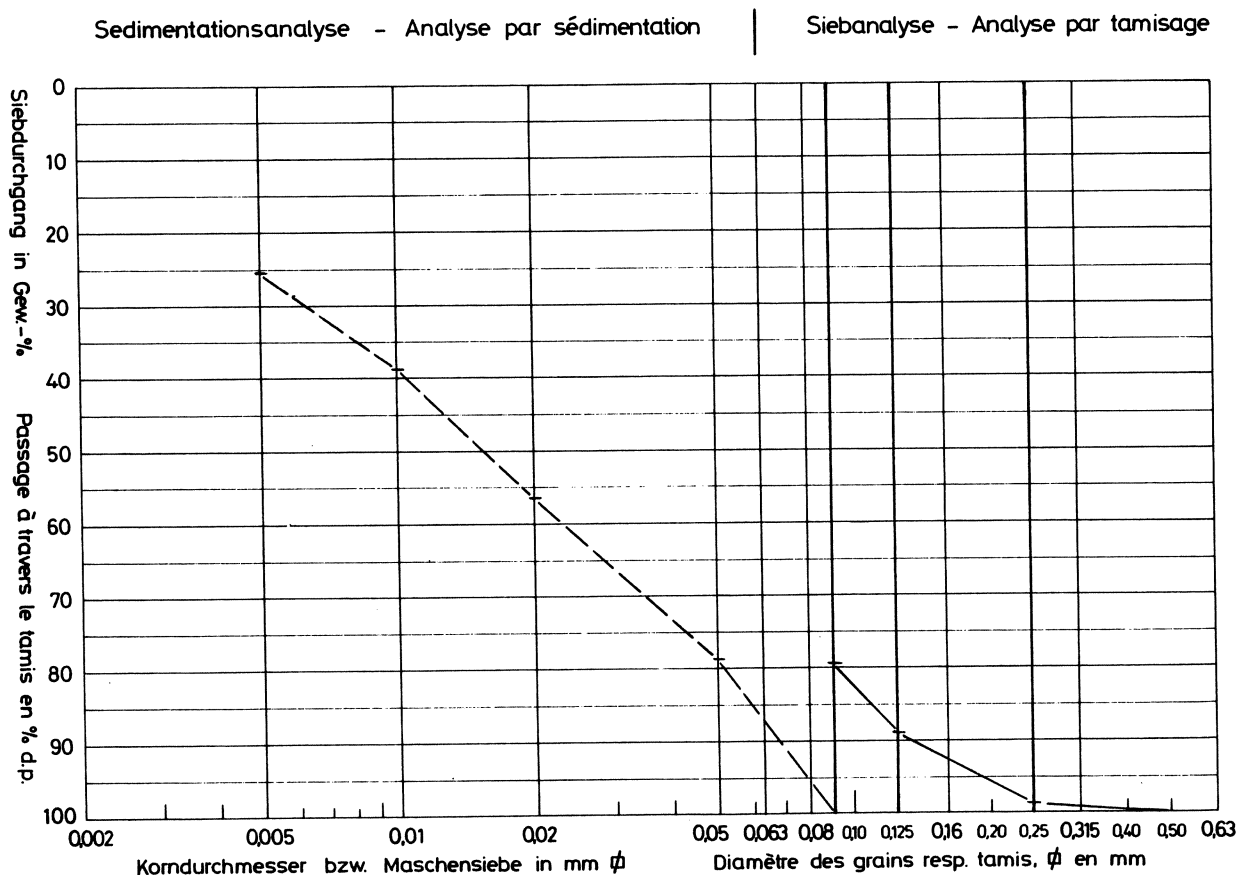
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	78.7	56.3	38.7	25.3

Filler sedimentiert in Alkohol mit Calciumchlorid als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R K

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	99.8	99.4	94.6	84.8

Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	83.8	65.4	51.1	34.9

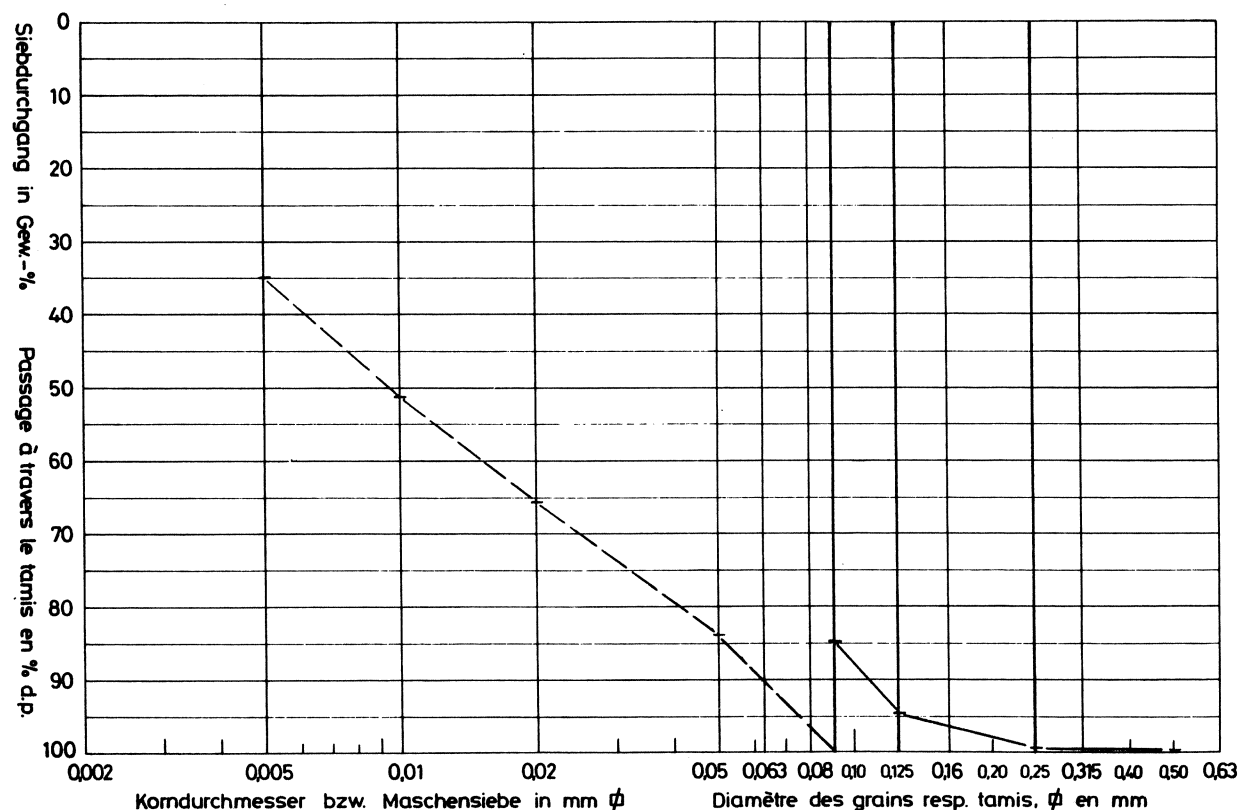
Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

_____ Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)

Sedimentationsanalyse - Analyse par sédimentation

Siebanalyse - Analyse par tamisage



Korngrößenverteilung F I L L E R Q

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%		100.0	99.0	92.8

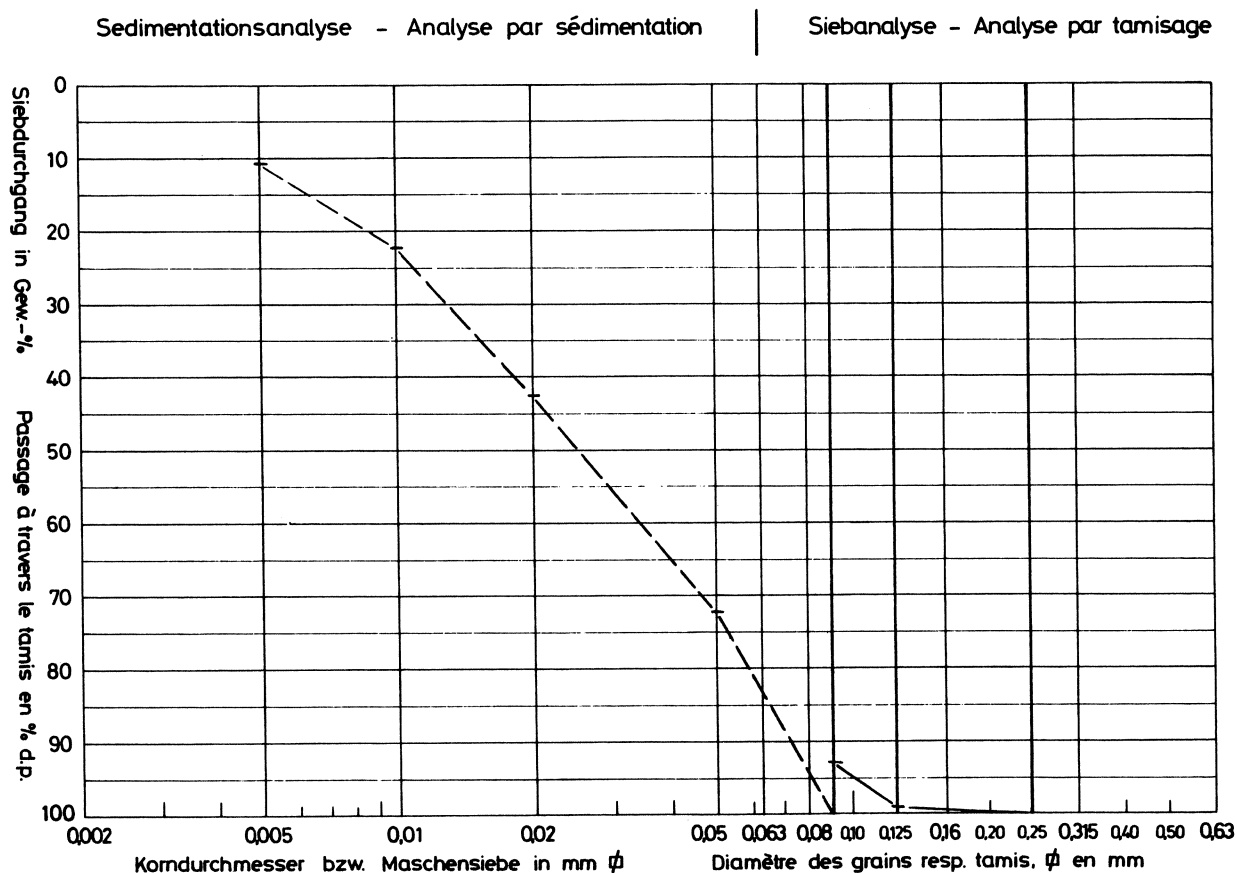
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	72.2	42.5	22.2	10.7

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrößenverteilungs-Diagramm

————— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Korngrössenverteilung F I L L E R T

Siebanalyse, Steinmehl im Anlieferungszustand

Maschensieb	mm	0.5	0.25	0.125	0.09
Durchgang	Masse-%	99.8	99.2	93.0	84.4

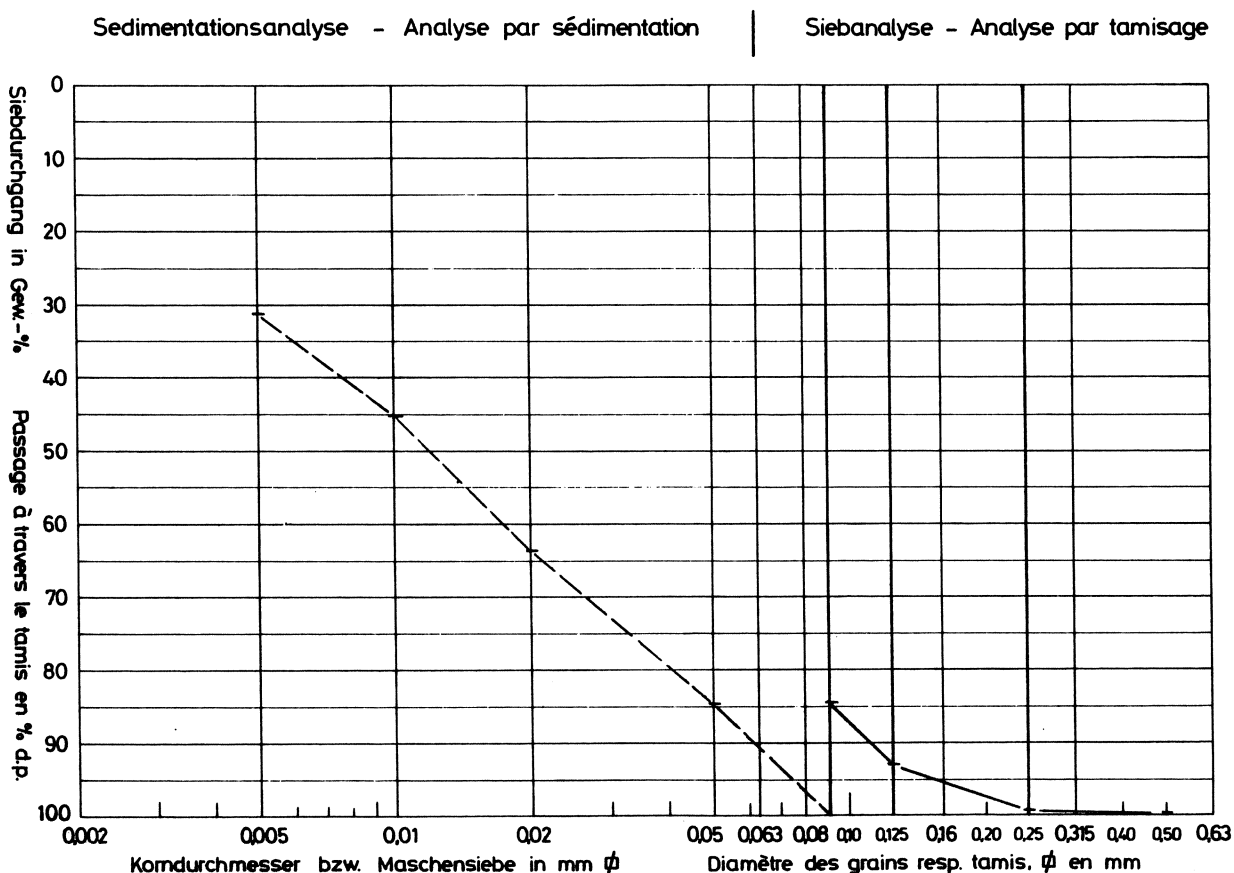
Sedimentationsanalyse, Filler (Anteile <0.09 mm)

Maschensieb	mm	0.09			
Durchgang	Masse %	100.00			
Korndurchmesser	µm	< 50	< 20	< 10	< 5
Anteil	Masse-%	84.7	63.6	45.1	31.1

Filler sedimentiert in Wasser mit Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel.

Korngrössenverteilungs-Diagramm

———— Steinmehl im Anlieferungszustand
 ----- Filler (Anteile < 0.09 mm)



Tabellarische Zusammenstellung der Korngrössenverteilungen**Siebanalyse**

Maschen- sieb [mm]	Steinmehl													
	A	B*	C	D	E*	F	G*	H	M	N*	O*	K	Q	T
	Durchgang [Masse-%]													
0.5	99.8	99.8		100	100		100			99.4	100	99.8		99.8
0.25	99.4	99.4	100	99.8	98.8	100	99.2	100	100	92.4	98.6	99.4	100	99.2
0.125	95.0	97.2	97.0	95.0	90.8	94.8	86.4	98.2	97.8	75.4	88.8	94.6	99.0	93.0
0.09	84.8	93.0	86.6	81.4	83.6	89.4	73.4	93.0	88.6	65.2	79.4	84.8	92.8	84.4

Sedimentationsanalyse

Korn- durch- messer [µm]	Filler													
	A	B*	C	D	E*	F	G*	H	M	N*	O*	K	Q	T
	Anteil [Masse-%]													
< 90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
< 50	69.8	78.2	73.9	74.2	78.5	87.1	77.6	78.9	81.0	83.7	78.7	83.8	72.2	84.7
< 20	52.1	49.7	43.9	55.6	49.8	67.6	48.5	45.3	57.8	51.6	56.3	65.4	42.5	63.6
< 10	34.9	28.6	27.8	40.6	24.6	42.3	29.9	24.0	41.3	28.3	38.7	51.1	22.2	45.1
< 5	22.3	15.5	16.8	27.0	17.2	14.6	16.9	12.7	27.0	18.0	25.3	34.9	10.7	31.1

D Ermittlung des Gehaltes an Tonmineralien mittels Differenzen-Thermoanalyse (DTA-Diagramme)

Die Durchführung der Bestimmung des Gehaltes an Tonmineralien erfolgte gemäss der Norm SN 670'850 "Filler für bituminöses Mischgut, Gehalt an Tonmineralien".

Geprüft wurden nur die quarz- und silikatreichen Filler A, B*, C, E*, G*, H, M, N* und O*. Die praktisch ausschliesslich aus Karbonat bestehenden Filler D und F sowie die Filler K, Q und T wurden nicht untersucht. Die geringen salzsäureunlöslichen Rückstände der Filler D und F bestehen gemäss mineralogischem Befund grösstenteils aus Quarz und weisen kaum messbare Spuren von Tonmineralien auf.

Für die Aufnahme der DTA-Diagramme wurden die karbonatfreien Kornfraktionen unter 5 μm verwendet, wobei sie mit Quarzmehl unter 5 μm als Referenzsubstanz gefahren wurden. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Ergebnisse

Filler	Gehalt an karbonatfreiem Feinstkorn unter 5 μm (Analyseprobe) [Masse-%]	Gehalte an Tonmineralien der Analysenprobe [Masse-%]	Gehalte an Tonmineralien bezogen auf den karbonathaltigen Gesamtfiller [Masse-%]
A	10.0	17	1.7
B*	6.4	6	0.4
C	7.2	25	1.8
E*	7.7	13	1.0
G*	10.1	10	1.0
H	6.6	5	0.3
M	9.5	21	2.0
N*	7.0	51	3.6
O*	13.6	+))	+))

- +) Wegen stark störender Nebeneffekte nicht bestimmbar. Die mikroskopische Vergleichsprüfung mit dem Filler N* zeigte, dass der Filler O* etwas weniger Tonmineralien führt. Da er jedoch mehr karbonatfreies Feinstkorn enthält, dürfte der Gehalt im Gesamtfiller ebenfalls um etwa 3 Masse-% betragen.

VI Volumetrische Untersuchungen**E Hohlraumgehalt nach Rigden****Durchführen der Prüfung**

Gemäss Norm SN 670'840

Ergebnisse

Filler	A	B*	C	D	E*	F	G*
Hohlraumgehalt nach Rigden [vol-%]	37.1	41.9	35.8	32.7	35.3	35.3	35.6
Filler	H	M	N*	O*	K	Q	T
Hohlraumgehalt nach Rigden [vol-%]	37.2	32.4	36.8	40.9	34.5	33.7	43.4

F Volumenänderung von EMPA-Prüfkörpern nach Wasserlagerung**Durchführen der Prüfung**

Gemäss Norm SN 670'845

Ergebnisse

Filler	A	B*	C	D	E*	F
Rohdichte vor Wasserlagerung [t/m ³]	1.954	1.867	1.981	2.212	2.025	1.996
Rohdichte nach Wasserlagerung [t/m ³]	1.901	1.771	1.932	2.203	1.990	1.954
Volumenzunahme [vol-%]	2.77	5.42	2.53	0.39	1.72	2.18
Filler	G*	H	M	N*	O*	K
Rohdichte vor Wasserlagerung [t/m ³]	1.946	1.968	2.106	1.855	1.855	2.217
Rohdichte nach Wasserlagerung [t/m ³]	1.876	1.903	2.069	1.910	1.788	2.216
Volumenzunahme [vol-%]	3.74	3.42	1.79	2.26	3.71	0.04
Filler	Q	T				
Rohdichte vor Wasserlagerung [t/m ³]	1.984	1.767				
Rohdichte nach Wasserlagerung [t/m ³]	1.974	+)				
Volumenzunahme [vol-%]	0.52	+)				

+) Nicht bestimmbar, Prüfkörper zerbröckelten bei Wasserlagerung.

G Bitumenzahl nach Verfahren NL

Durchführen der Prüfung

Dieses Verfahren ist beschrieben in "Eisen voor bouwstoffen in de wegenbouw, 1978".

Bei dieser Methode wird die Eindringtiefe eines zylindrischen Aluminium-Stempels am Filler-Wasser-Gemisch gemessen. Dazu werden 50 g des zu untersuchenden Fillers in eine Schale abgewogen. Gemessene Menge destilliertes Wasser zugeben. 5 min mit Spatel rühren und kneten und die Eindringtiefe des Aluminium-Stempels (Querschnitt 0.5 cm^2 , Masse 15 g) bestimmen. Wassermenge variieren, bis Eindringtiefe 50 bis 70 $\frac{1}{10}$ mm beträgt.

Die zugegebene Wassermenge in cm^3 mit dem Faktor 2 multipliziert, ergibt die Bitumenzahl van der Baan.

Ergebnisse

Filler	A	B*	C	D	E*	F	G*	H	M
Bitumenzahl van der Baan	32	36	32	28	32	25	38	35	33

Filler	N*	O*	K	Q	T
Bitumenzahl van der Baan	38	41	31	30	56

VII Stabilisierungswirkung der Filler

H Erweichungspunkt Ring und Kugel von Filler-Bitumen-Gemischen

Durchführen der Prüfung

Herstellen der Filler-Bitumen-Gemische	SN 670'760
Bestimmen des Erweichungspunktes Ring und Kugel	SN 671'743

Ergebnisse

Im folgenden sind die an den Filler-Bitumen-Gemischen bestimmten Erweichungspunkte Ring und Kugel sowie die errechneten Erhöhungen des Erweichungspunktes Ring und Kugel tabellarisch und graphisch aufgeführt.

Tabellarische Zusammenstellung der Erweichungspunkte Ring und Kugel

Erweichungspunkt Ring und Kugel

Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	A	B*	C	D	E*	F	G*	H	M	N*
50 / 50	56.5	58.1	56.2	54.9	55.7	54.9	55.9	56.4	56.0	57.3
65 / 35	67.5	82.0	68.9	64.3	68.1	64.8	69.3	73.0	67.0	70.1
70 / 30	78.5	103.8	82.5	72.1	81.0	76.1	80.2	92.5	76.6	84.6
75 / 25	101.5	153.5	111.2	89.9	110.7	100.8	107.5	135.2	96.5	126.5

Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	O*	K	Q	T
50 / 50	58.7	57.0	56.4	60.3
65 / 35	75.0	67.4	69.7	97.3
70 / 30	100.5	80.0	86.7	146.5
75 / 25	145.0	108.3	116.5	—

Erhöhter Erweichungspunkt Ring und Kugel

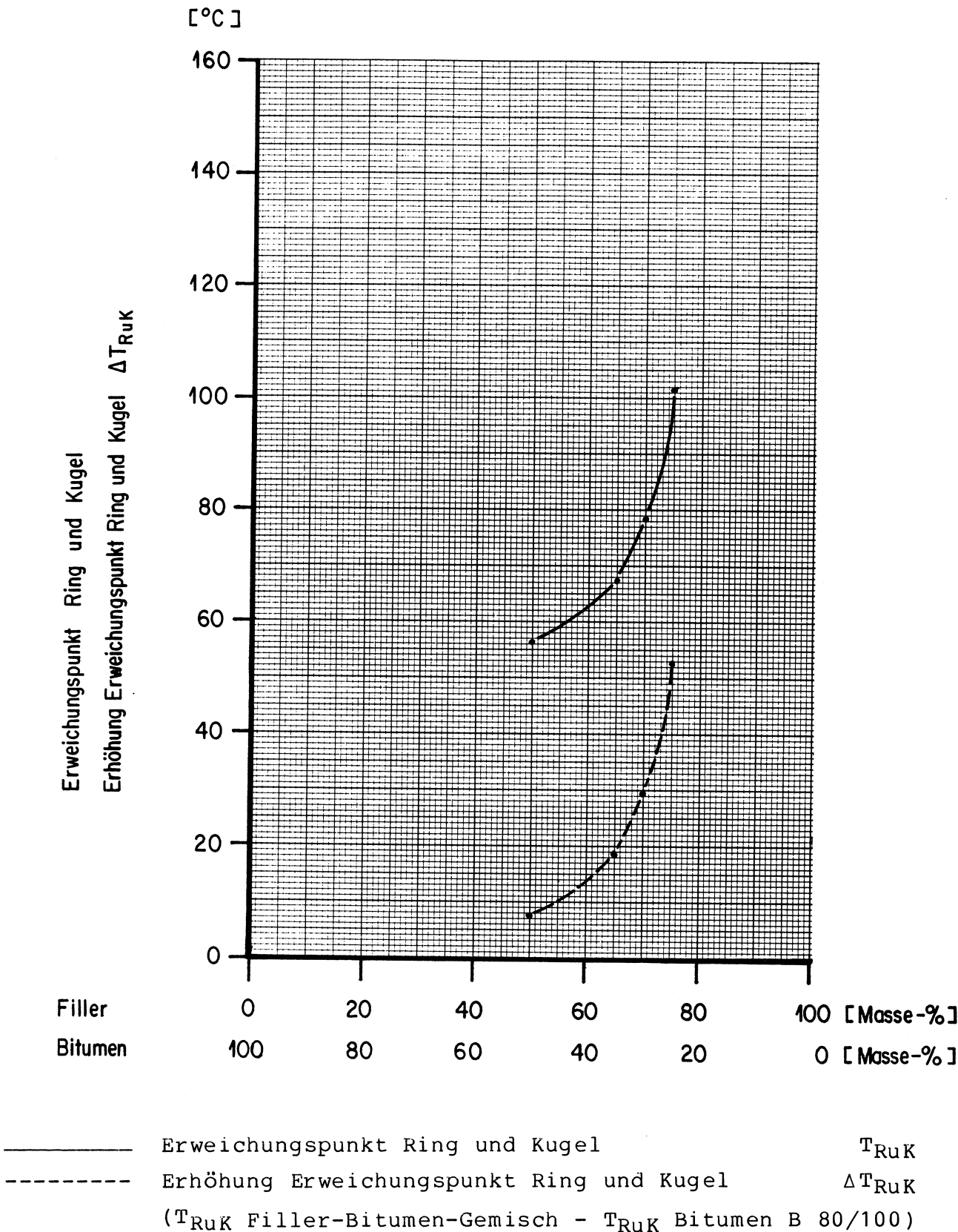
Filler-Bitumen-
Verhältnis

[Masse-%/Masse-%]	A	B*	C	D	E*	F	G*	H	M	N*
50 / 50	7.7	9.3	7.4	6.1	6.9	6.1	7.1	7.6	7.2	8.5
65 / 35	18.7	33.2	20.1	15.5	19.3	16.0	20.5	24.2	18.2	21.3
70 / 30	29.7	55.0	33.7	23.3	32.3	27.3	31.4	43.7	27.8	35.8
75 / 25	52.7	104.7	62.4	41.1	61.9	52.0	58.7	86.4	47.7	77.7

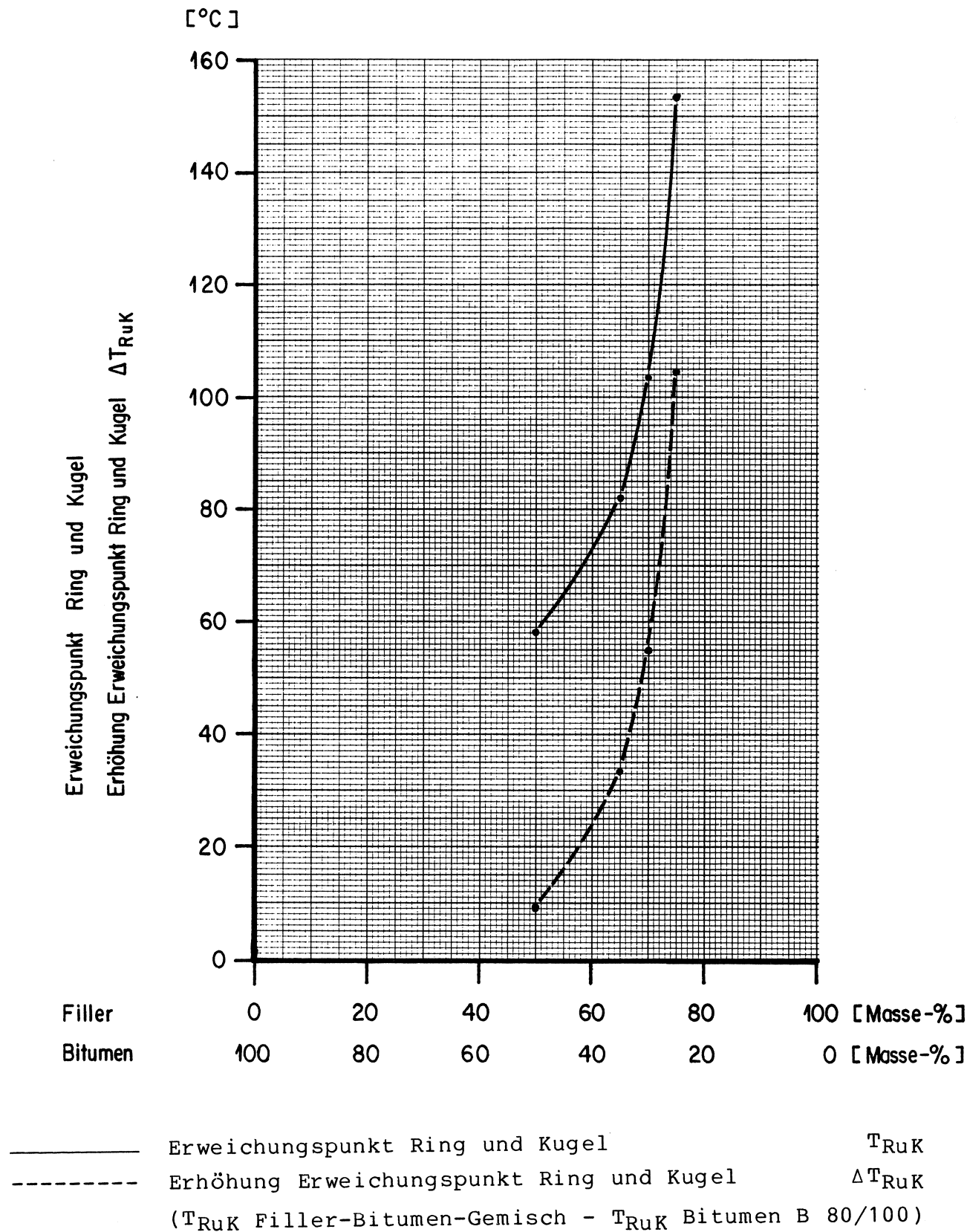
Filler-Bitumen-
Verhältnis

[Masse-%/Masse-%]	O*	K	Q	T
50 / 50	9.9	8.2	7.6	11.5
65 / 35	26.2	18.6	20.9	48.5
70 / 30	51.7	31.2	37.9	97.7
75 / 25	96.2	59.5	67.7	—

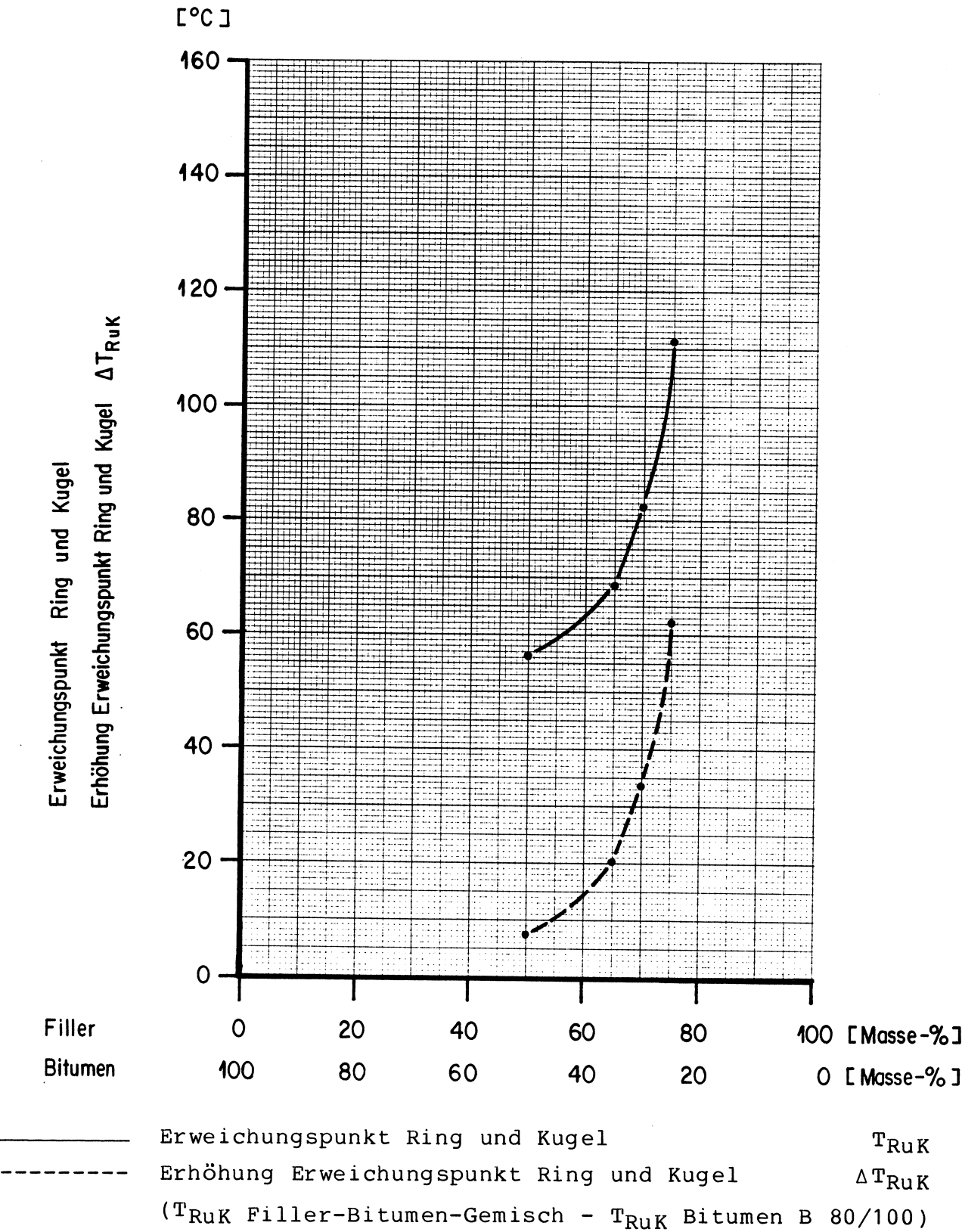
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R A



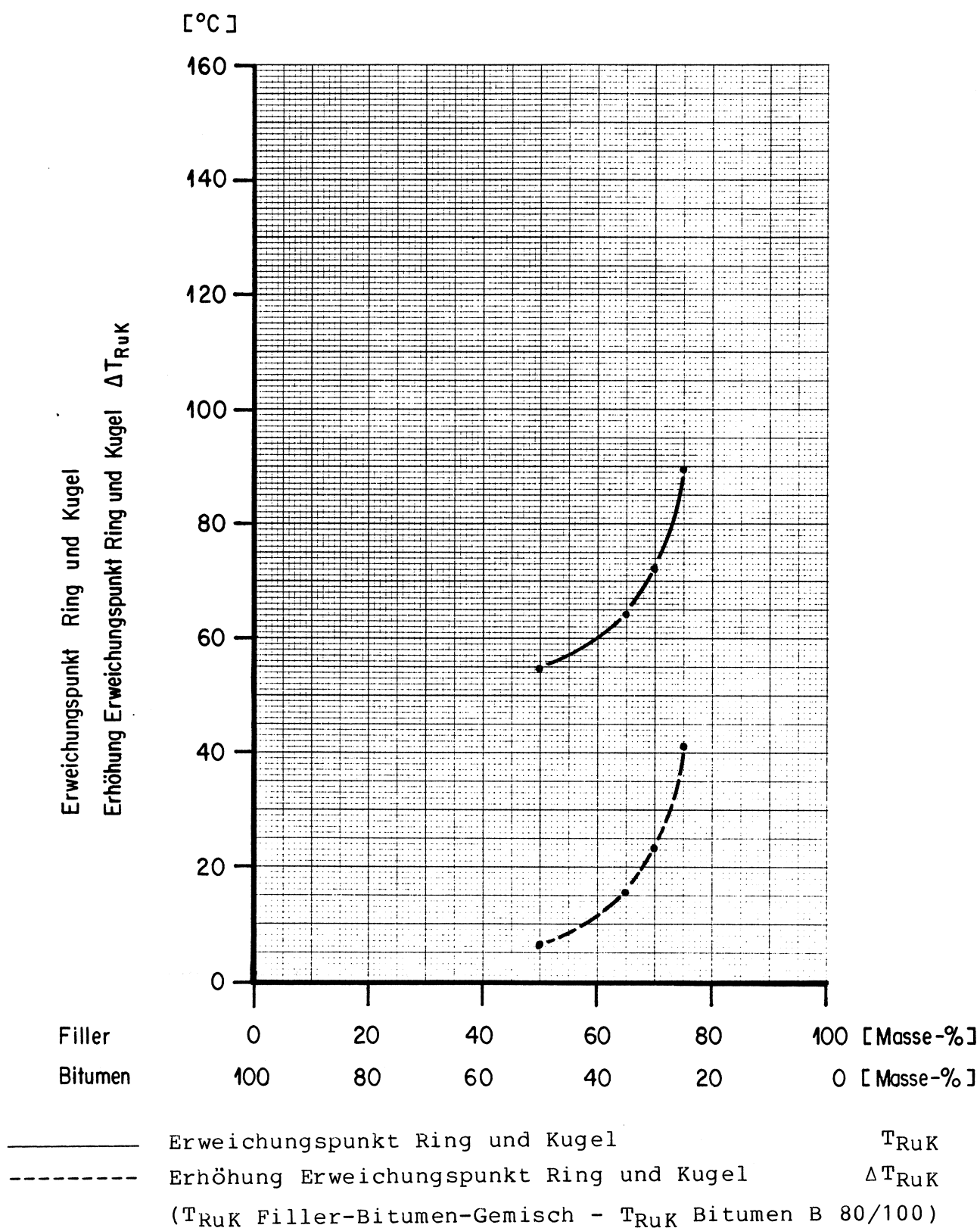
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R B*



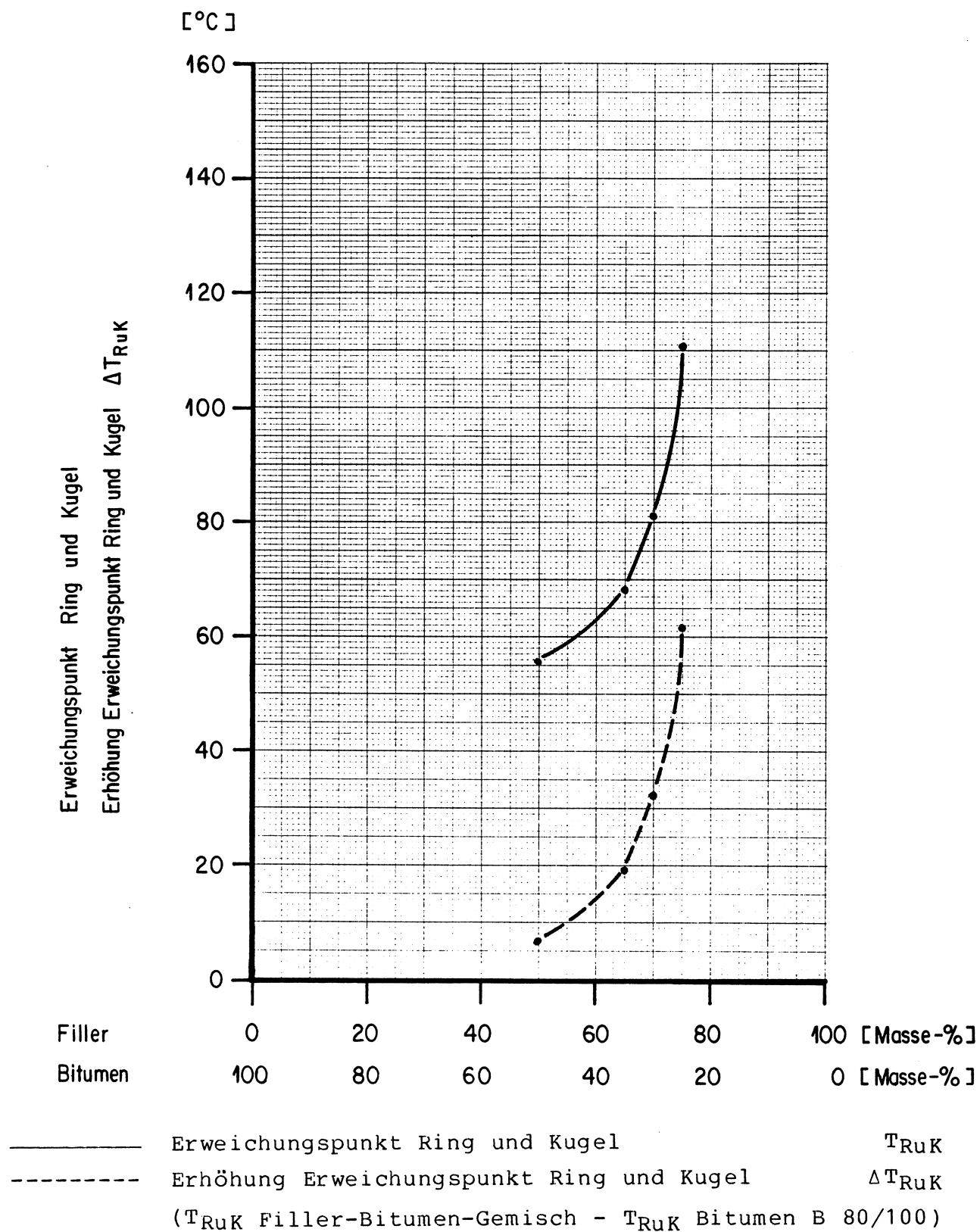
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R C



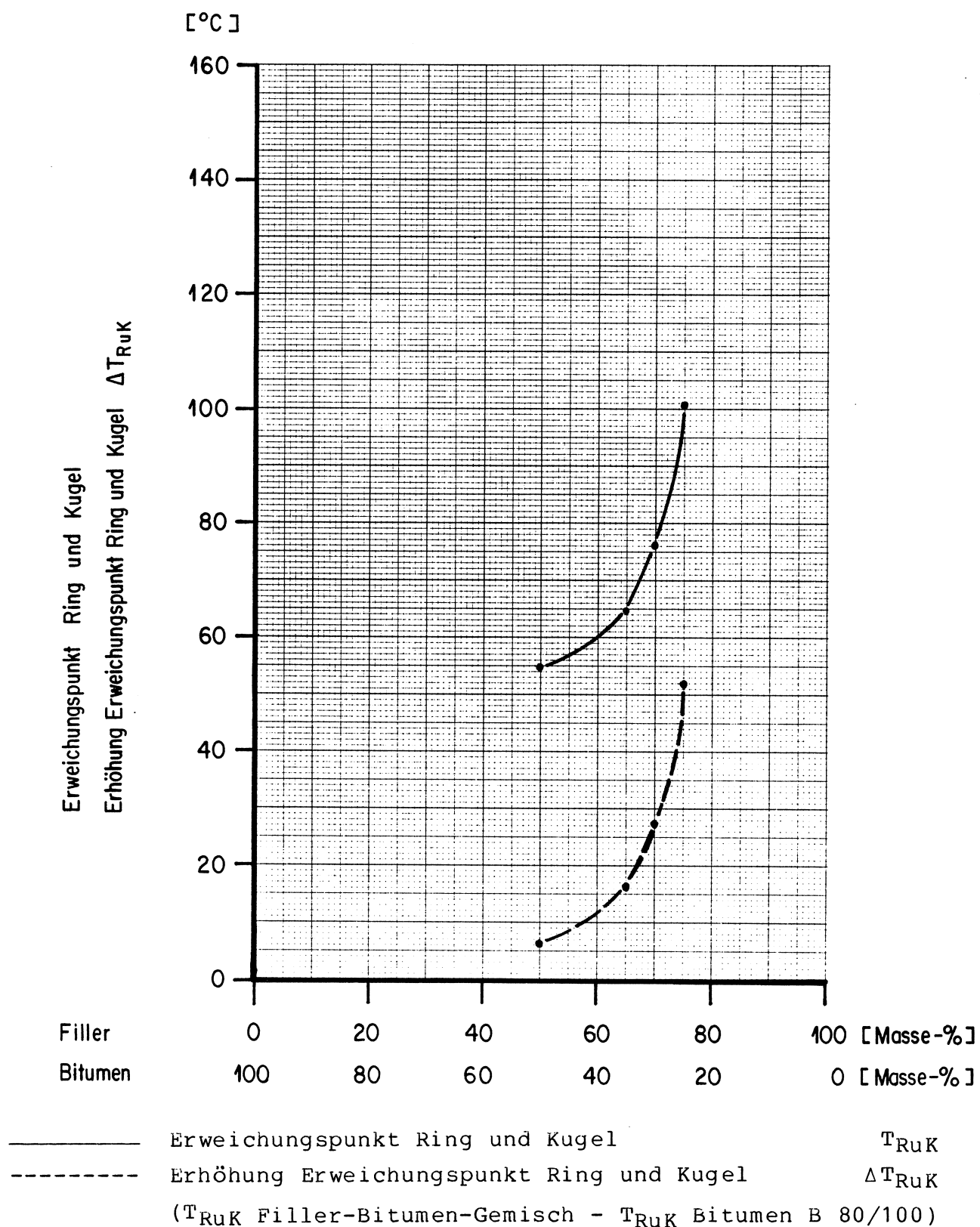
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R D



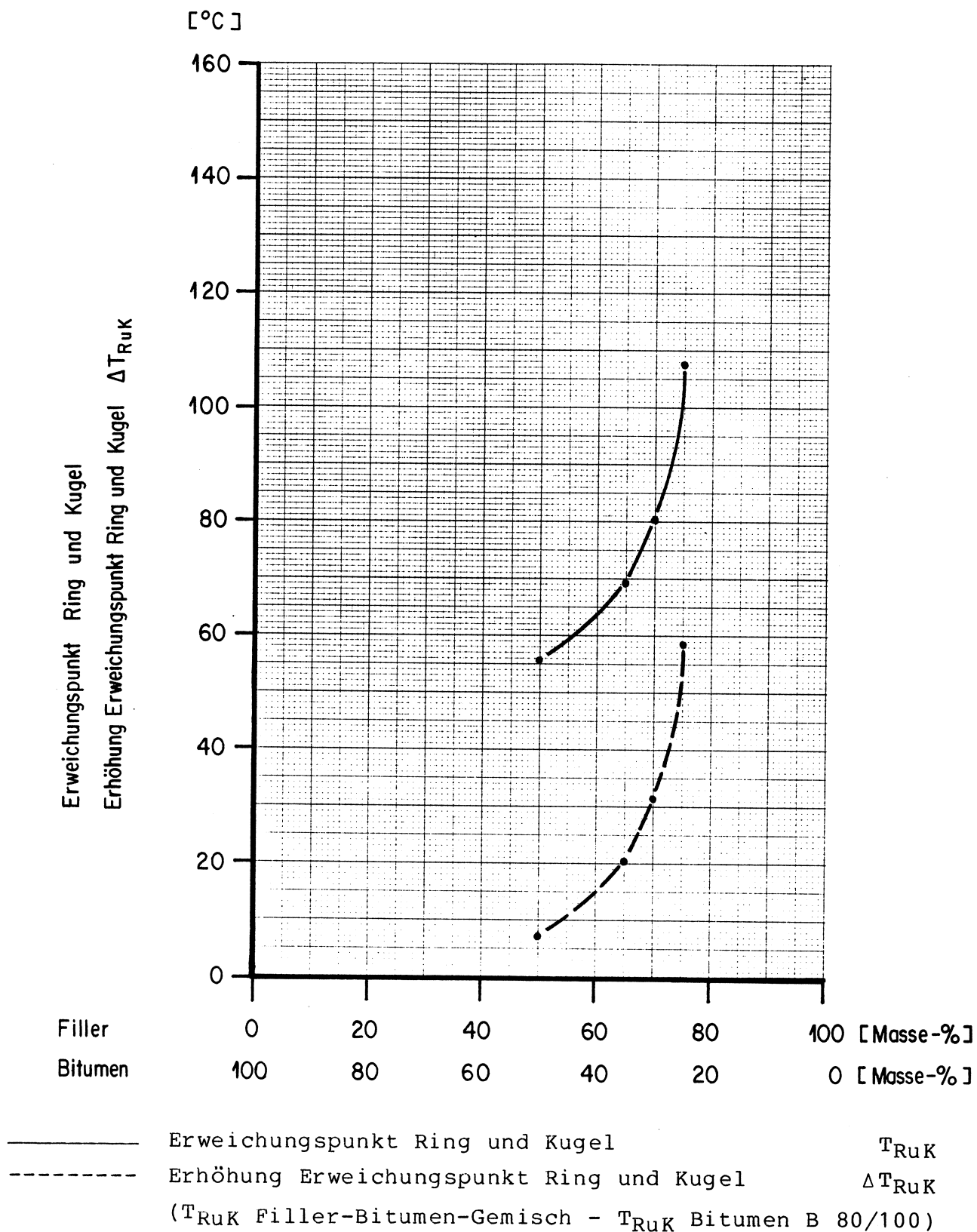
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R E*



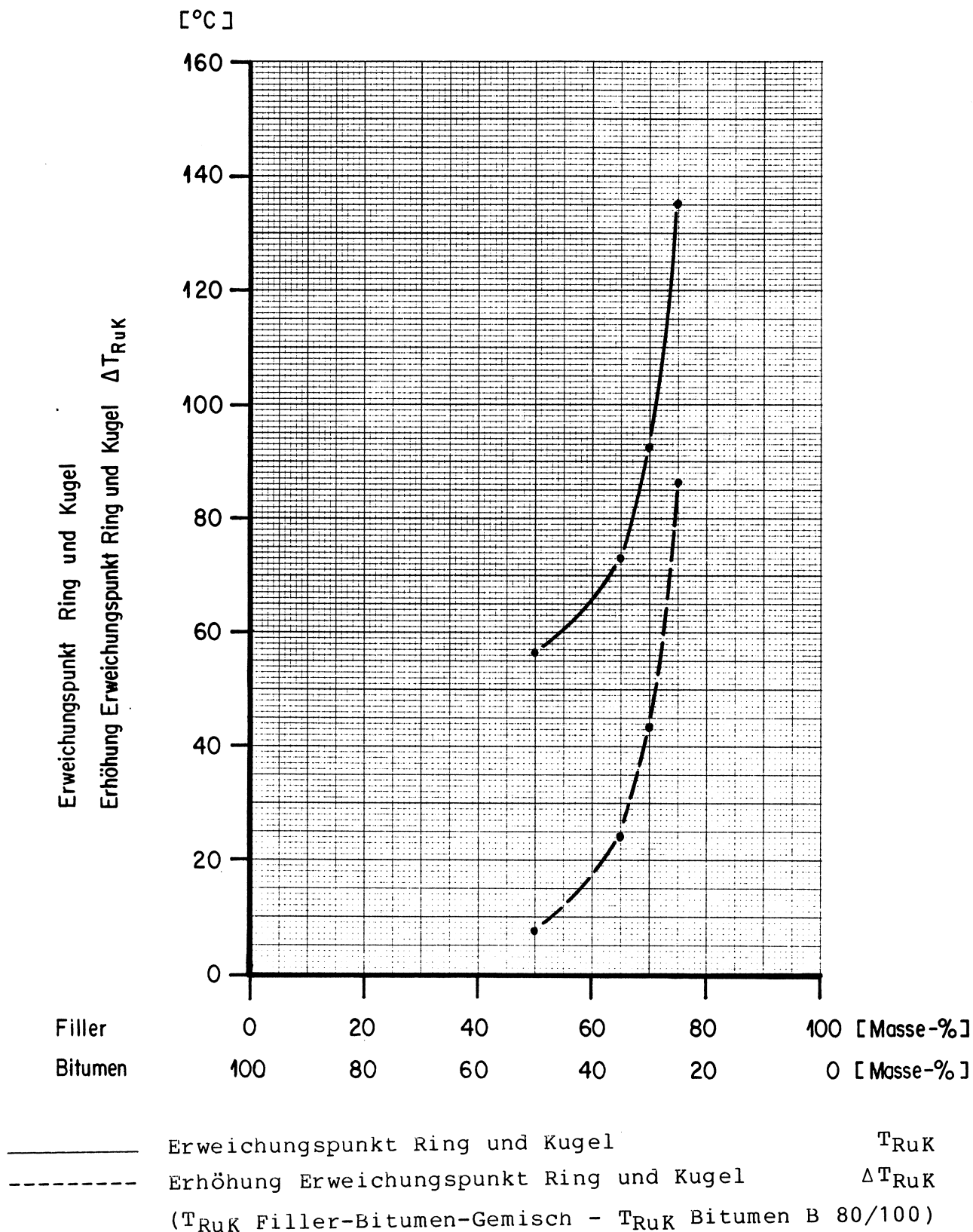
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R F



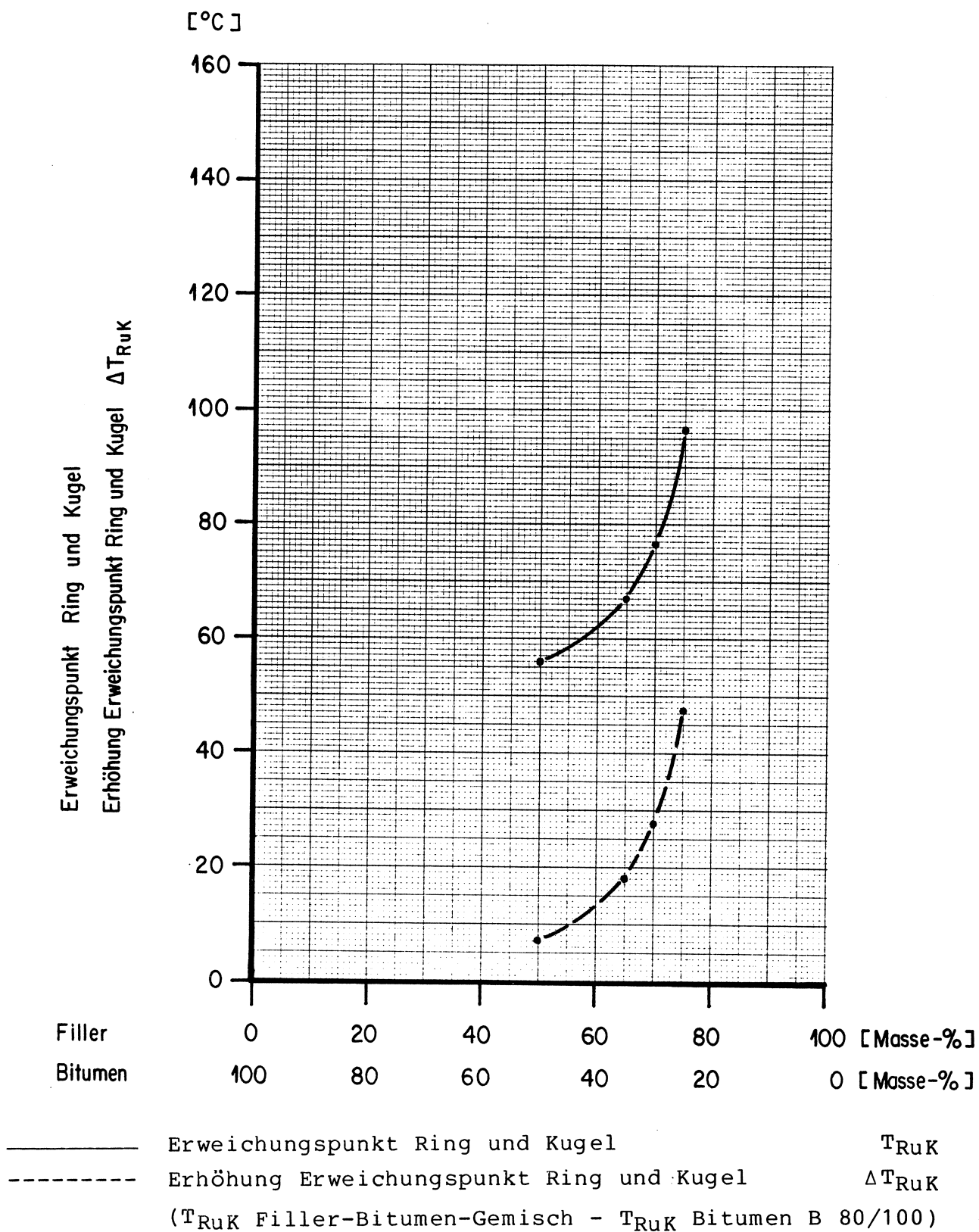
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R G*



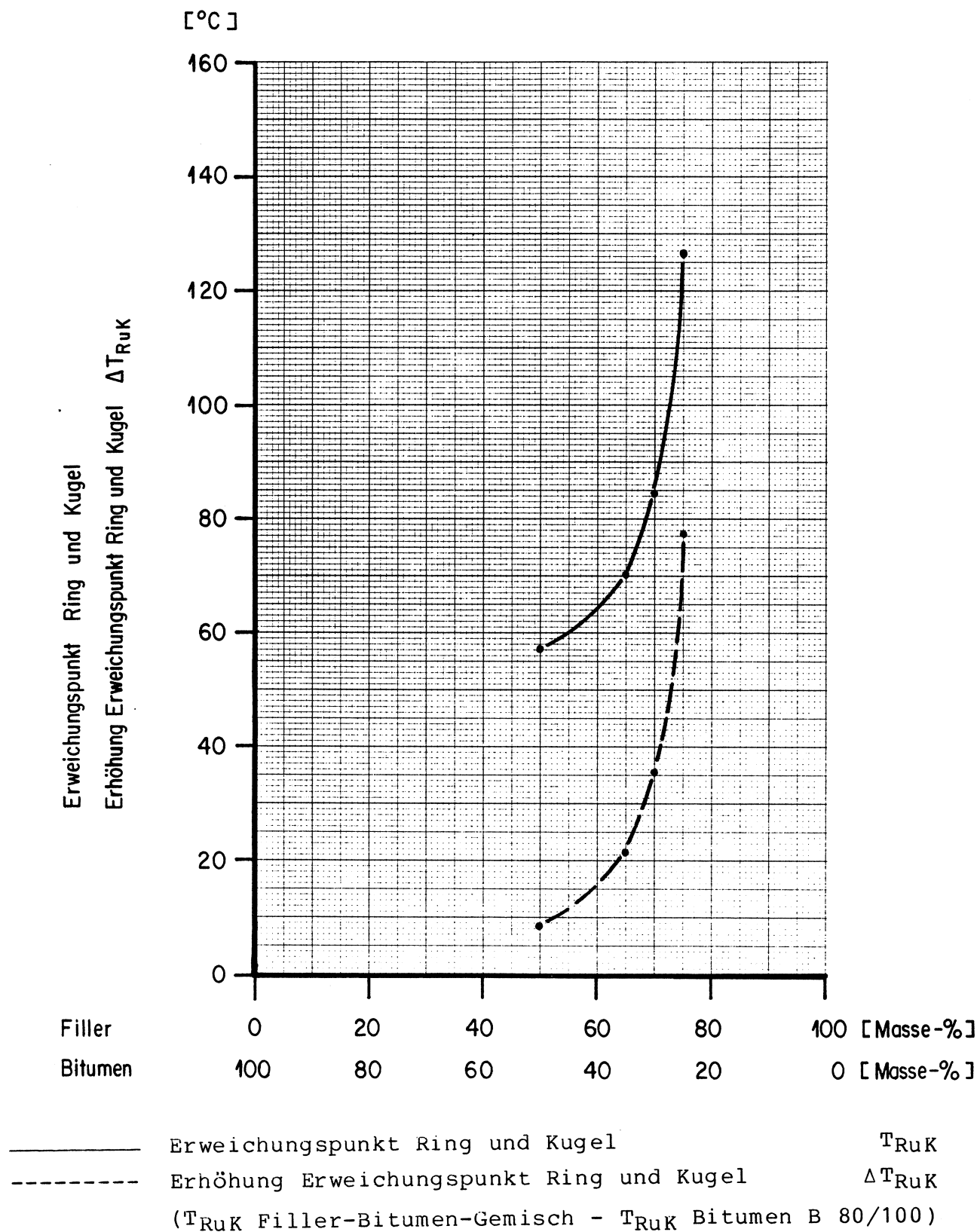
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R H



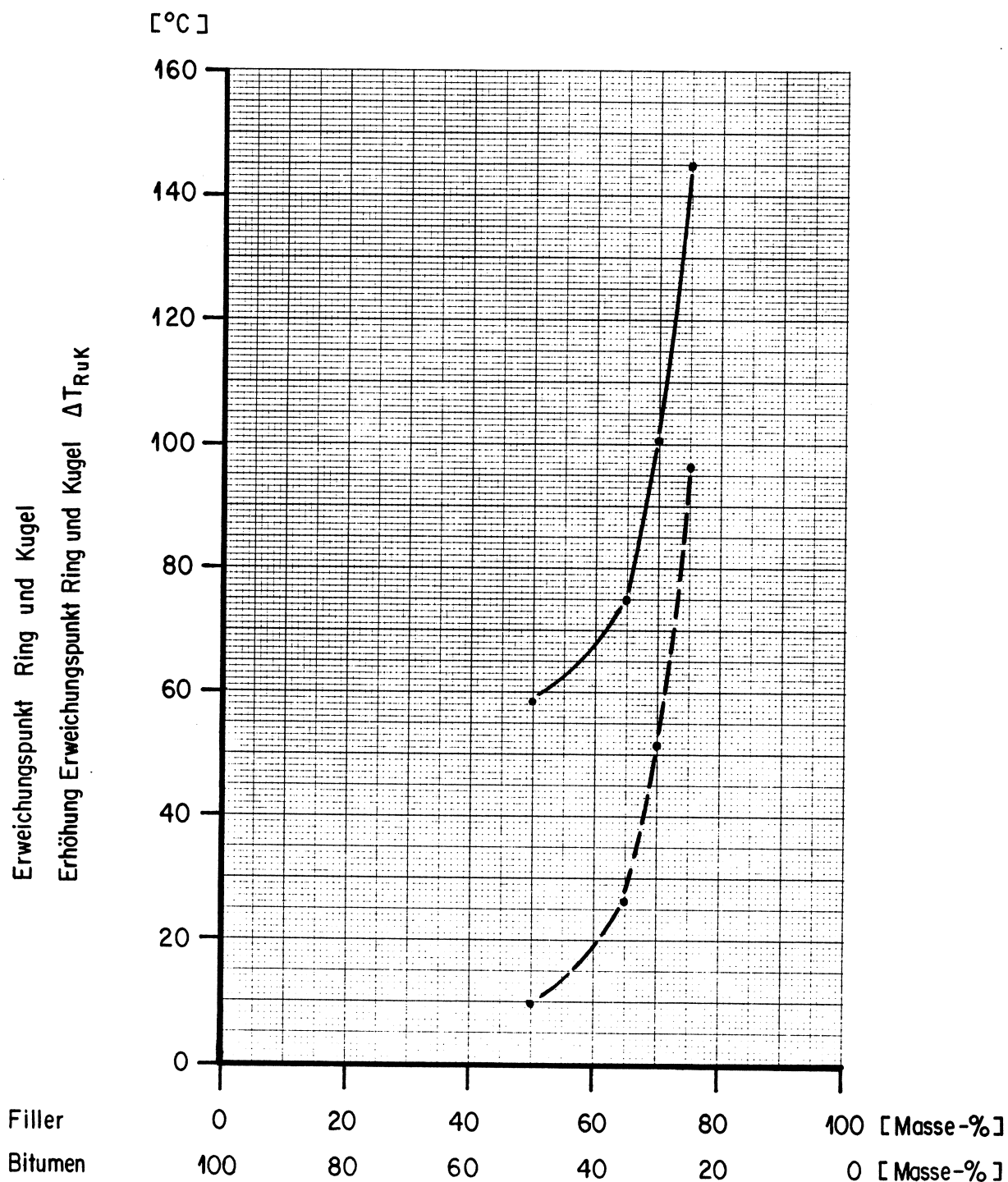
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R M



Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R N*

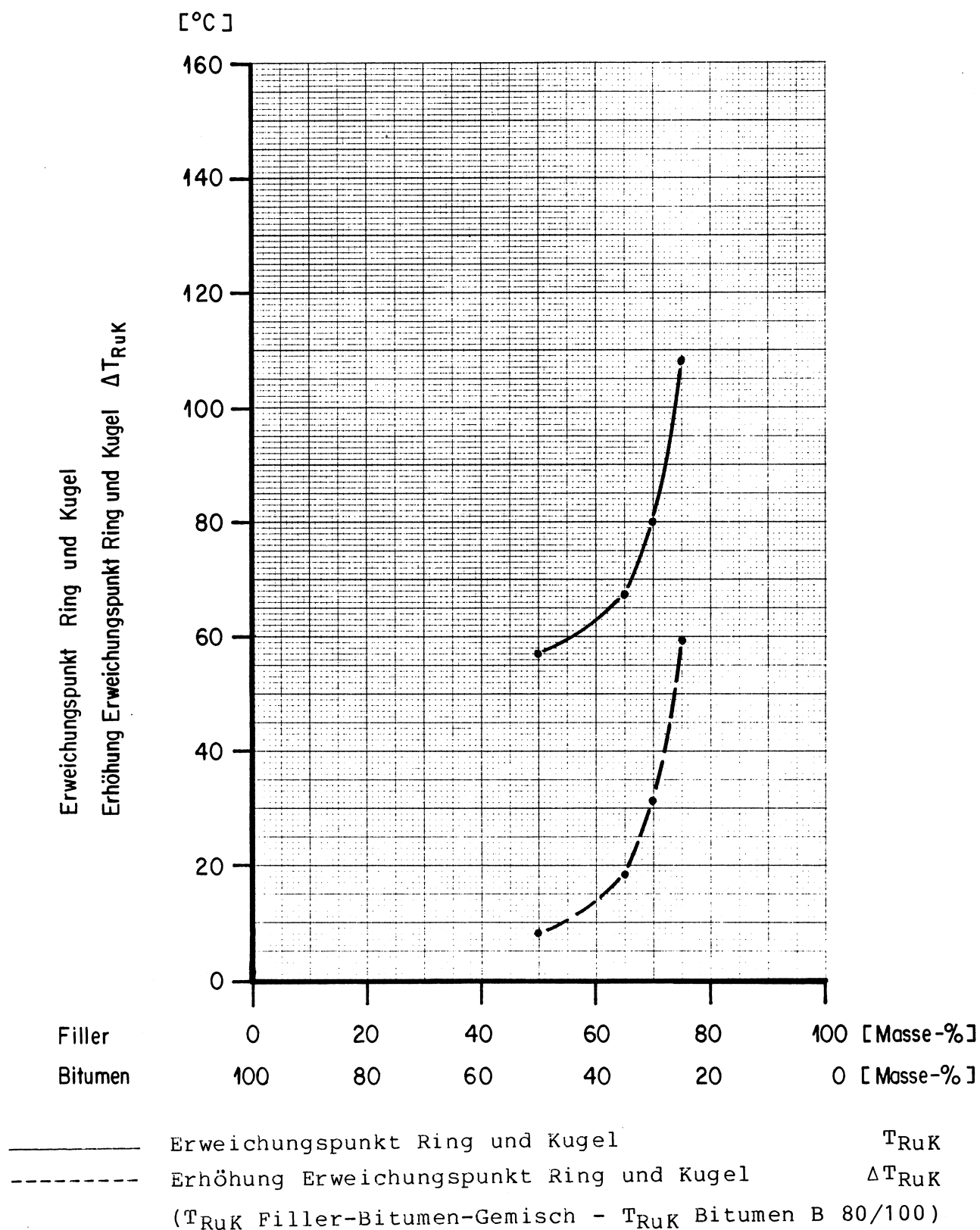


Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R O*

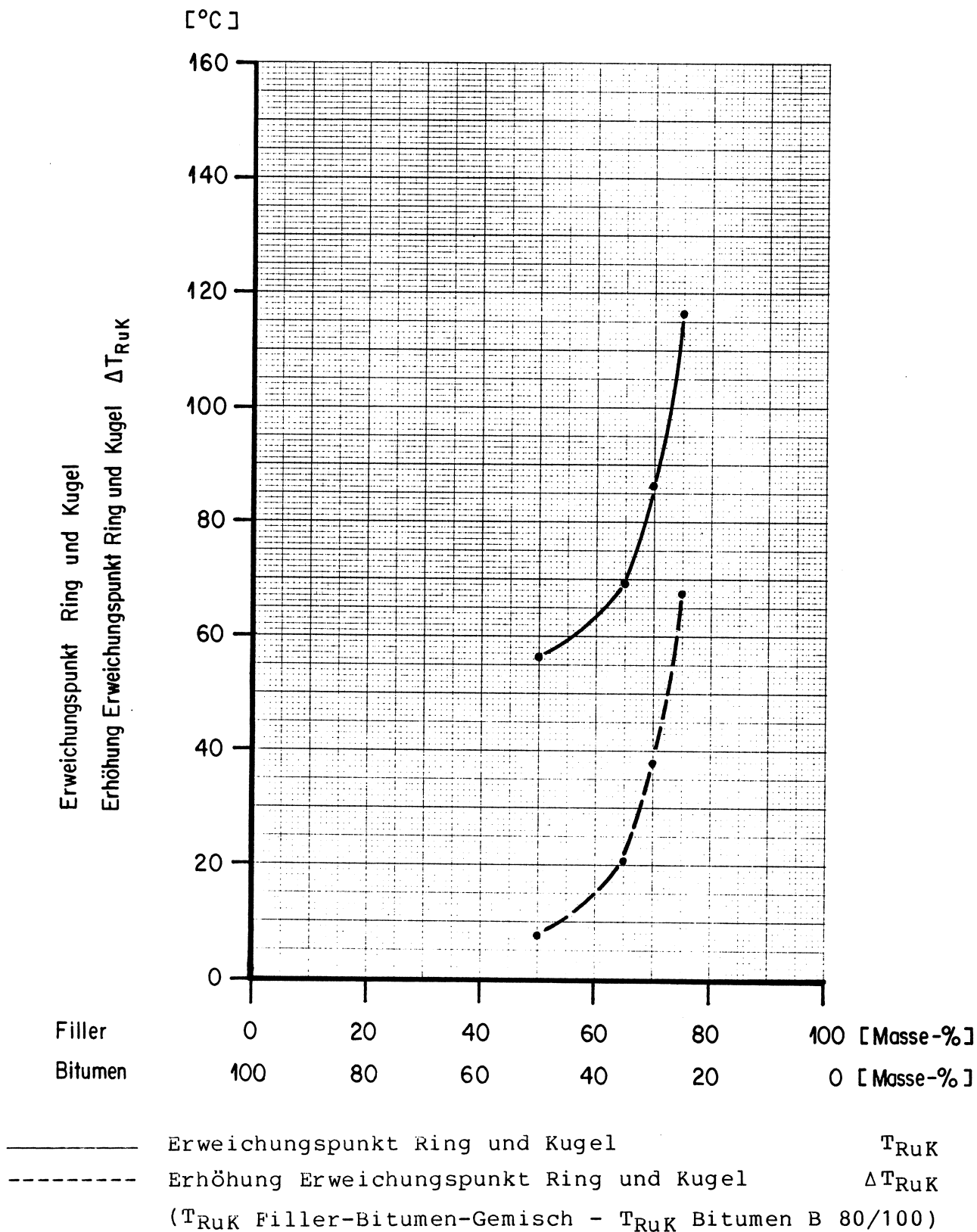


————— Erweichungspunkt Ring und Kugel T_{RuK}
 - - - - - Erhöhung Erweichungspunkt Ring und Kugel ΔT_{RuK}
 (T_{RuK} Filler-Bitumen-Gemisch - T_{RuK} Bitumen B 80/100)

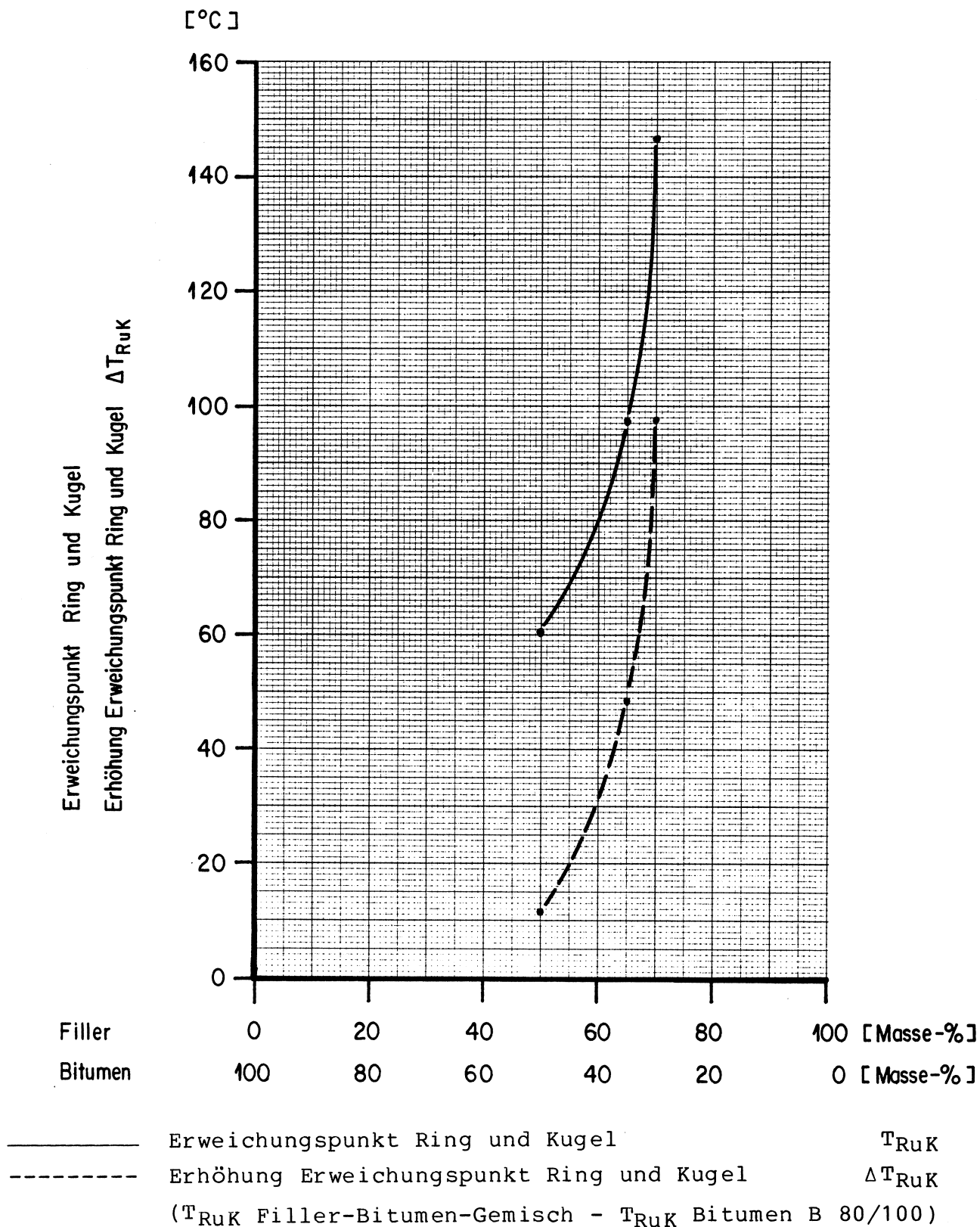
Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R K



Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R Q



Erweichungspunkt Ring und Kugel F I L L E R T



I Viskositätsmessungen mittels Rotationsviskosimeter an Filler-Bitumen-Gemischen

Durchführen der Prüfung

Herstellen der Filler-Bitumen-Gemische

SN 670'760

Viskositätsmessung

Im Rotationsviskosimeter Rheomat 115 wird die dynamische Viskosität der Filler-Bitumen-Gemische bei den folgenden Temperaturen und Schergeschwindigkeiten bestimmt:

Temperatur	60 °C	Schergeschwindigkeit D	0.4 s ⁻¹
Temperatur	80 °C	Schergeschwindigkeit D	4 s ⁻¹
Temperatur	110 °C	Schergeschwindigkeit D	50 s ⁻¹
Temperatur	150 °C	Schergeschwindigkeit D	200 s ⁻¹

Aus dem Schubspannungs-Schergeschwindigkeits-Diagramm der Filler-Bitumen-Gemische werden zusätzlich die folgenden Werte graphisch ermittelt:

- Die Grenzviskosität η_0 , d.h. die Viskosität bei der Schergeschwindigkeit $D \rightarrow 0$.

Dazu wird im linear verlaufenden Anfangsbereich der Schubspannungs-Schergeschwindigkeitskurve bei zunehmender Schergeschwindigkeit eine Tangente angelegt und aus der Steigung der Tangente die Grenzviskosität η_0 bestimmt.

- Verhältnis η_0/η

Mit Hilfe des Verhältnisses Grenzviskosität/Viskosität wird ein Vergleichswert für das Mass der Strukturviskosität - auch Pseudoplastizität genannt - der Filler-Bitumen-Gemische errechnet.

- Thixotropes Verhalten der Filler-Bitumen-Gemische bei 60 °C

Bei der anhand des Kurvenverlaufes im Schubspannungs-Schergeschwindigkeits-Diagramm festgelegten Schergeschwindigkeit D von 0.3 s^{-1} wird die Differenz zwischen Viskosität bei zunehmender und bei abnehmender Schergeschwindigkeit berechnet und in Relation zu der Viskosität bei zunehmender Schergeschwindigkeit gesetzt. Dies ergibt einen Vergleichswert für das Mass des thixotropen Verhaltens der Filler-Bitumen-Gemische bei 60 °C.

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R A

Temperatur [°C]	Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Schergeschwindigkeit D [s ⁻¹]	Dynamische Viskosität η [Pa·s]	Grenz- viskosität η_0 [Pa·s]	Verhältnis η_0/η
60	50 / 50	0.4	1'321	1'417	1.07
	65 / 35		7'394	9'537	1.29
	70 / 30		12'775	18'287	1.43
80	50 / 50	4	111	115	1.04
	65 / 35		708	879	1.24
	70 / 30		1'010	1'431	1.42
110	50 / 50	50	7.1	7.4	1.04
	65 / 35		50.0	54.6	1.09
	70 / 30		56.0	70.3	1.26
150	50 / 50	200	0.79	0.79	1.00
	65 / 35		2.64	2.78	1.05
	70 / 30		5.25	5.95	1.13

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit zunehmend (A) abnehmend (B) [Pa·s] [Pa·s]		Thixotropie $\frac{(A - B)}{A} \cdot 100$ [%]
50 / 50	1'339	1.339	0
65 / 35	7'840	7'641	2.5
70 / 30	13'883	12'883	7.6

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R B*

Temperatur [°C]	Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Schergeschwindigkeit D [s ⁻¹]	Dynamische Viskosität η [Pa·s]	Grenz- viskosität η_0 [Pa·s]	Verhältnis η_0/η
60	50 / 50	0.4	2'607	3'027	1.16
	65 / 35		10'937	17'500	1.60
	70 / 30		12'775	35'262	2.76
80	50 / 50	4	255	294	1.15
	65 / 35		809	1'247	1.54
	70 / 30		—	3'062	—
110	50 / 50	50	19.5	20.0	1.03
	65 / 35		44.8	65.5	1.46
	70 / 30		70.0	155.4	2.22
150	50 / 50	200	0.96	0.96	1.0
	65 / 35		4.30	5.14	1.20
	70 / 30		8.49	11.2	1.32

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit zunehmend (A) abnehmend (B) [Pa·s]		Thixotropie (A - B) $\cdot$ 100 $\frac{A}{B}$ [%]
	[Pa·s]	[Pa·s]	
50 / 50	2'706	2'660	1.7
65 / 35	12'366	11'153	9.8
70 / 30	19'786	8'166	58.7

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R C

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	D [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0 / η
60	50 / 50	0.4	1'925	2'152	1.12
	65 / 35		7'918	10'631	1.34
	70 / 30		11'550	20'912	1.81
80	50 / 50	4	206	218	1.06
	65 / 35		805	1'041	1.29
	70 / 30		805	1'487	1.85
110	50 / 50	50	7.5	7.9	1.05
	65 / 35		30.8	34.3	1.11
	70 / 30		60.6	93.1	1.54
150	50 / 50	200	0.80	0.82	1.03
	65 / 35		2.85	2.97	1.04
	70 / 30		5.88	6.86	1.17

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	$\frac{(A - B)}{A} \cdot 100$
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	1'972	1'972	0
65 / 35	8'458	8'377	1.0
70 / 30	14'933	11'433	23.4

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R D

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\dot{D}$ [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0/η
60	50 / 50	0.4	1'776	1'916	1.08
	65 / 35		5'031	6'300	1.25
	70 / 30		9'581	12'512	1.31
80	50 / 50	4	91	102	1.12
	65 / 35		477	573	1.20
	70 / 30		783	1'067	1.36
110	50 / 50	50	6.6	6.9	1.05
	65 / 35		39.5	43.7	1.11
	70 / 30		41.7	52.1	1.25
150	50 / 50	200	0.72	0.73	1.01
	65 / 35		2.12	2.24	1.06
	70 / 30		4.16	4.95	1.19

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie (A - B) / A · 100
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	1'843	1.827	0.9
65 / 35	5'285	5'180	2.0
70 / 30	10'418	10'127	2.8

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R E*

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\frac{D}{[s^{-1}]}$	$\frac{\eta}{[Pa \cdot s]}$	$\frac{\eta_0}{[Pa \cdot s]}$	$\frac{\eta_0}{\eta}$
60	50 / 50	0.4	1'575	1'723	1.09
	65 / 35		8'268	10'412	1.26
	70 / 30		10'675	15'837	1.48
80	50 / 50	4	160	168	1.05
	65 / 35		809	997	1.23
	70 / 30		988	1'505	1.52
110	50 / 50	50	7.2	7.2	1.0
	65 / 35		29.8	36.5	1.22
	70 / 30		58.1	84.3	1.45
150	50 / 50	200	0.78	0.79	1.0
	65 / 35		2.83	2.98	1.05
	70 / 30		5.67	6.79	1.20

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie $\frac{(A - B)}{A} \cdot 100$
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa · s]	[Pa · s]	[%]
50 / 50	1'610	1'603	0.4
65 / 35	8'867	8'657	2.4
70 / 30	11'607	11'410	2.2

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R F

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\dot{D}$ [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0 / η
60	50 / 50	0.4	1'997	2'196	1.10
	65 / 35		6'387	9'143	1.43
	70 / 30		13'825	24'325	1.76
80	50 / 50	4	183	200	1.09
	65 / 35		538	721	1.34
	70 / 30		936	1'531	1.64
110	50 / 50	50	6.4	6.5	1.02
	65 / 35		21.9	26.3	1.20
	70 / 30		47.6	70.0	1.47
150	50 / 50	200	0.70	0.71	1.01
	65 / 35		2.24	2.36	1.05
	70 / 30		4.90	6.20	1.27

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie (A - B) / A · 100
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	2'077	1'997	3.8
65 / 35	6'790	6'627	2.4
70 / 30	15'237	14'653	3.8

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R G*

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\dot{D}$ [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0 / η
60	50 / 50	0.4	2'170	2'441	1.12
	65 / 35		8'968	12'031	1.34
	70 / 30		15'750	28'087	1.78
80	50 / 50	4	219	238	1.09
	65 / 35		822	1'155	1.41
	70 / 30		1'085	1'627	1.50
110	50 / 50	50	17.0	17.0	1.0
	65 / 35		59.1	65.4	1.11
	70 / 30		64.1	105.3	1.64
150	50 / 50	200	0.86	0.86	1.0
	65 / 35		3.11	3.45	1.11
	70 / 30		6.48	7.88	1.22

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie $\frac{(A - B)}{A} \cdot 100$
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	2'233	2'233	0
65 / 35	9'707	9'380	3.4
70 / 30	17'733	16'707	5.8

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R H

Temperatur [°C]	Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Schergeschwindigkeit $\dot{D}$ [s ⁻¹]	Dynamische Viskosität η [Pa·s]	Grenz- viskosität η_0 [Pa·s]	Verhältnis η_0 / η
60	50 / 50	0.4	1'531	1'767	1.15
	65 / 35		7'962	12'250	1.54
	70 / 30		9'100	25'637	2.82
80	50 / 50	4	141	154	1.09
	65 / 35		735	1'076	1.46
	70 / 30		927	2'345	2.53
110	50 / 50	50	7.5	7.7	1.03
	65 / 35		33.3	43.7	1.31
	70 / 30		61.2	137.9	2.25
150	50 / 50	200	0.81	0.85	1.05
	65 / 35		3.13	3.57	1.14
	70 / 30		6.76	8.89	1.32

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit zunehmend (A) abnehmend (B) [Pa·s] [Pa·s]		Thixotropie (A - B) / A · 100 [%]
	[Pa·s]	[Pa·s]	
50 / 50	1'575	1'575	0
65 / 35	8'482	8'342	1.7
70 / 30	12'833	7'933	38.2

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R M

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	D [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0 / η
60	50 / 50	0.4	1'365	1'461	1.07
	65 / 35		5'862	7'787	1.33
	70 / 30		10'500	16'100	1.53
80	50 / 50	4	124	131	1.06
	65 / 35		546	695	1.27
	70 / 30		822	1'137	1.38
110	50 / 50	50	6.9	7.1	1.03
	65 / 35		23.2	27.7	1.19
	70 / 30		49.0	65.5	1.34
150	50 / 50	200	0.76	0.79	1.04
	65 / 35		2.41	2.52	1.05
	70 / 30		4.97	5.67	1.14

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	$\frac{(A - B)}{A} \cdot 100$
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	1'405	1'405	0
65 / 35	6'125	5'927	3.2
70 / 30	11'270	10'850	3.7

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R N*

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	D [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0 / η
60	50 / 50	0.4	2'082	2'345	1.13
	65 / 35		8'400	12'250	1.46
	70 / 30		—	28'175	—
80	50 / 50	4	222	242	1.09
	65 / 35		700	984	1.41
	70 / 30		—	2'747	—
110	50 / 50	50	8.4	8.7	1.04
	65 / 35		39.2	47.9	1.22
	70 / 30		74.2	146.3	1.97
150	50 / 50	200	0.91	0.91	1.0
	65 / 35		3.76	4.17	1.11
	70 / 30		8.16	11.23	1.38

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie (A - B) / A · 100
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	2'147	2'147	0
65 / 35	9'042	8'902	1.5
70 / 30	13'067	7'000	46.4

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R O*

Temperatur [°C]	Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Schergeschwindigkeit $\dot{D}$ [s ⁻¹]	Dynamische Viskosität η [Pa·s]	Grenz- viskosität η_0 [Pa·s]	Verhältnis η_0/η
60	50 / 50	0.4	2'091	2'353	1.13
	65 / 35		8'925	11'900	1.33
	70 / 30		16'537	23'362	1.41
80	50 / 50	4	206	225	1.09
	65 / 35		778	1'054	1.35
	70 / 30		1'120	1'925	1.72
110	50 / 50	50	8.3	8.7	1.05
	65 / 35		32.9	40.6	1.23
	70 / 30		64.4	96.9	1.50
150	50 / 50	200	0.89	0.93	1.04
	65 / 35		3.22	3.65	1.13
	70 / 30		6.51	7.67	1.18

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit zunehmend (A) abnehmend (B) [Pa·s] [Pa·s]		Thixotropie (A - B) / A · 100 [%]
50 / 50	2'158	2'158	0
65 / 35	9'625	9'310	3.3
70 / 30	18'737	16'847	10.1

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R K

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\dot{D}$ [s ⁻¹]	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0/η
60	50 / 50	0.4	1'942	2'161	1.11
	65 / 35		5'819	7'219	1.24
	70 / 30		11'375	16'275	1.43
80	50 / 50	4	160	175	1.09
	65 / 35		472	596	1.26
	70 / 30		866	1'251	1.44
110	50 / 50	50	6.8	6.9	1.01
	65 / 35		22.4	25.6	1.14
	70 / 30		45.8	58.9	1.29
150	50 / 50	200	0.74	0.74	1.0
	65 / 35		2.40	2.57	1.07
	70 / 30		4.86	5.74	1.18

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie (A - B) / A · 100
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	2'002	1'965	1.9
65 / 35	6'148	5'985	2.7
70 / 30	12'833	12'087	5.8

Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R Q

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\frac{D}{[s^{-1}]}$	$\frac{\eta}{[Pa \cdot s]}$	$\frac{\eta_0}{[Pa \cdot s]}$	$\frac{\eta_0}{\eta}$
60	50 / 50	0.4	1'654	1'750	1.06
	65 / 35		6'475	8'837	1.36
	70 / 30		10'500	18'200	1.73
80	50 / 50	4	175	189	1.08
	65 / 35		726	1'063	1.46
	70 / 30		857	1'916	2.24
110	50 / 50	50	—	12.2	—
	65 / 35		49.7	57.7	1.16
	70 / 30		57.4	109.2	1.90
150	50 / 50	200	0.75	0.75	1.0
	65 / 35		2.83	3.11	1.10
	70 / 30		5.74	7.70	1.34

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie (A - B) $\cdot$ 100
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	
[Masse-%/Masse-%]	[Pa · s]	[Pa · s]	$\frac{A}{[\%]}$
50 / 50	1'685	1'685	0
65 / 35	6'918	6'802	1.7
70 / 30	12'600	10'407	17.4

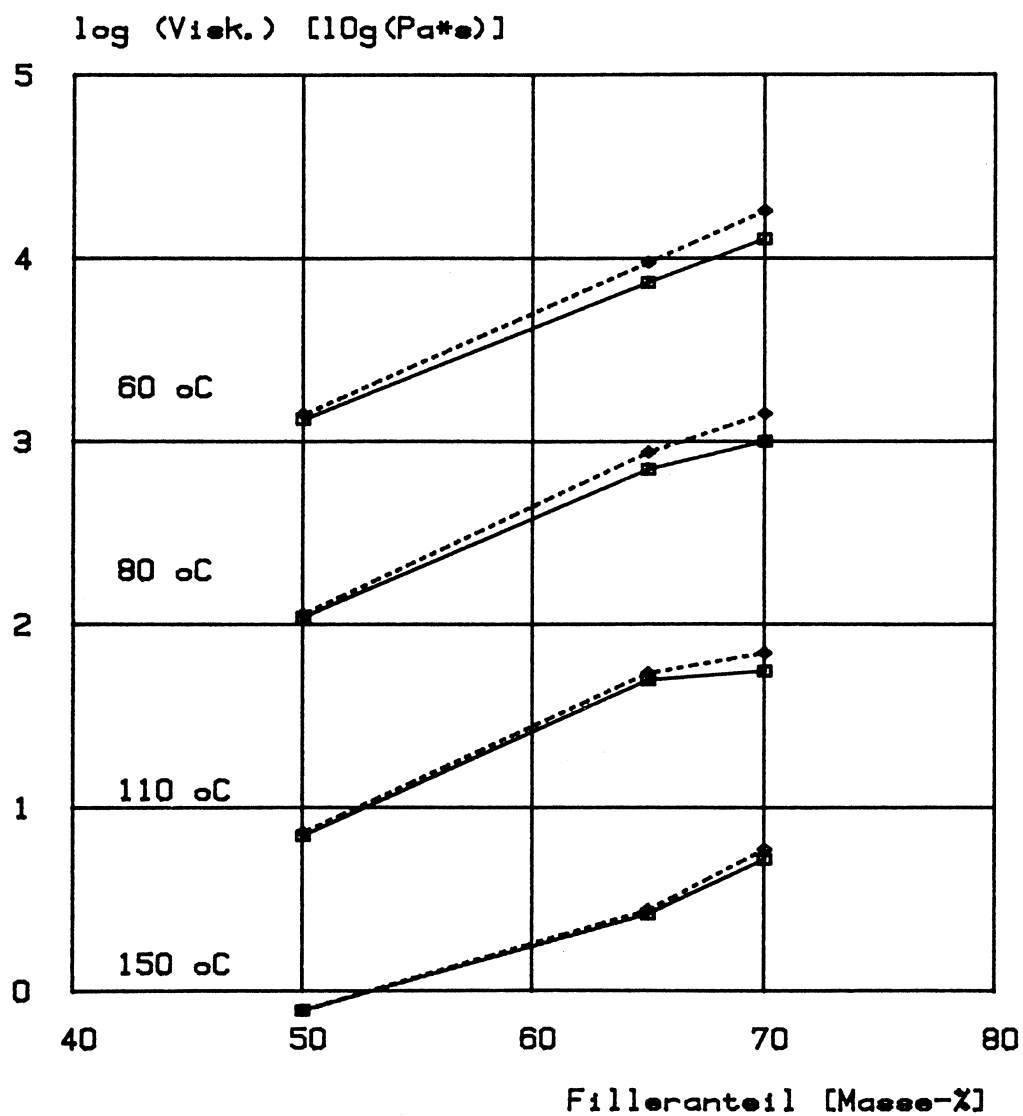
Dynamische Viskosität und rheologische Kennwerte F I L L E R T

Temperatur	Filler-Bitumen-Verhältnis	Schergeschwindigkeit	Dynamische Viskosität	Grenzviskosität	Verhältnis
[°C]	[Masse-%/Masse-%]	$\frac{D}{[s^{-1}]}$	η [Pa·s]	η_0 [Pa·s]	η_0 / η
60	50 / 50	0.4	2'852	3'237	1.13
	65 / 35		14'700	33'600	2.29
	70 / 30		—	—	—
80	50 / 50	4	302	355	1.18
	65 / 35		1'137	2'459	2.16
	70 / 30		—	—	—
110	50 / 50	50	22.7	23.1	1.02
	65 / 35		70.0	132.3	1.89
	70 / 30		—	—	—
150	50 / 50	200	1.10	1.16	1.05
	65 / 35		6.72	10.05	1.50
	70 / 30		—	—	—

Thixotropie der Filler-Bitumen-GemischeTemperatur 60 °C, Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹

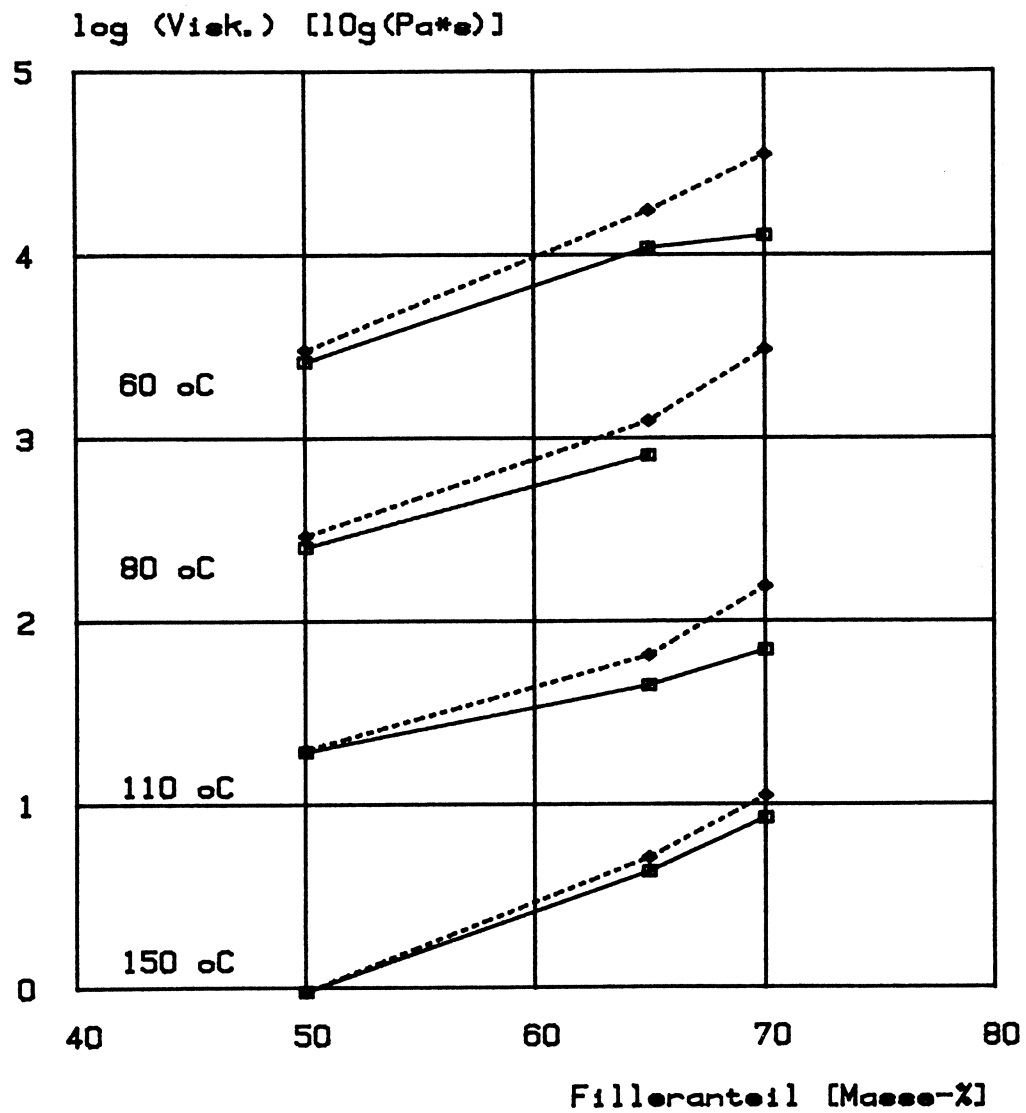
Filler-Bitumen-Verhältnis	Dynamische Viskosität bei Schergeschwindigkeit		Thixotropie
	zunehmend (A)	abnehmend (B)	$\frac{(A - B)}{A} \cdot 100$
[Masse-%/Masse-%]	[Pa·s]	[Pa·s]	[%]
50 / 50	2'949	2'949	0
65 / 35	17'453	15'773	9.6
70 / 30	--	--	--

FILLER A

Viskositätsdiagramm

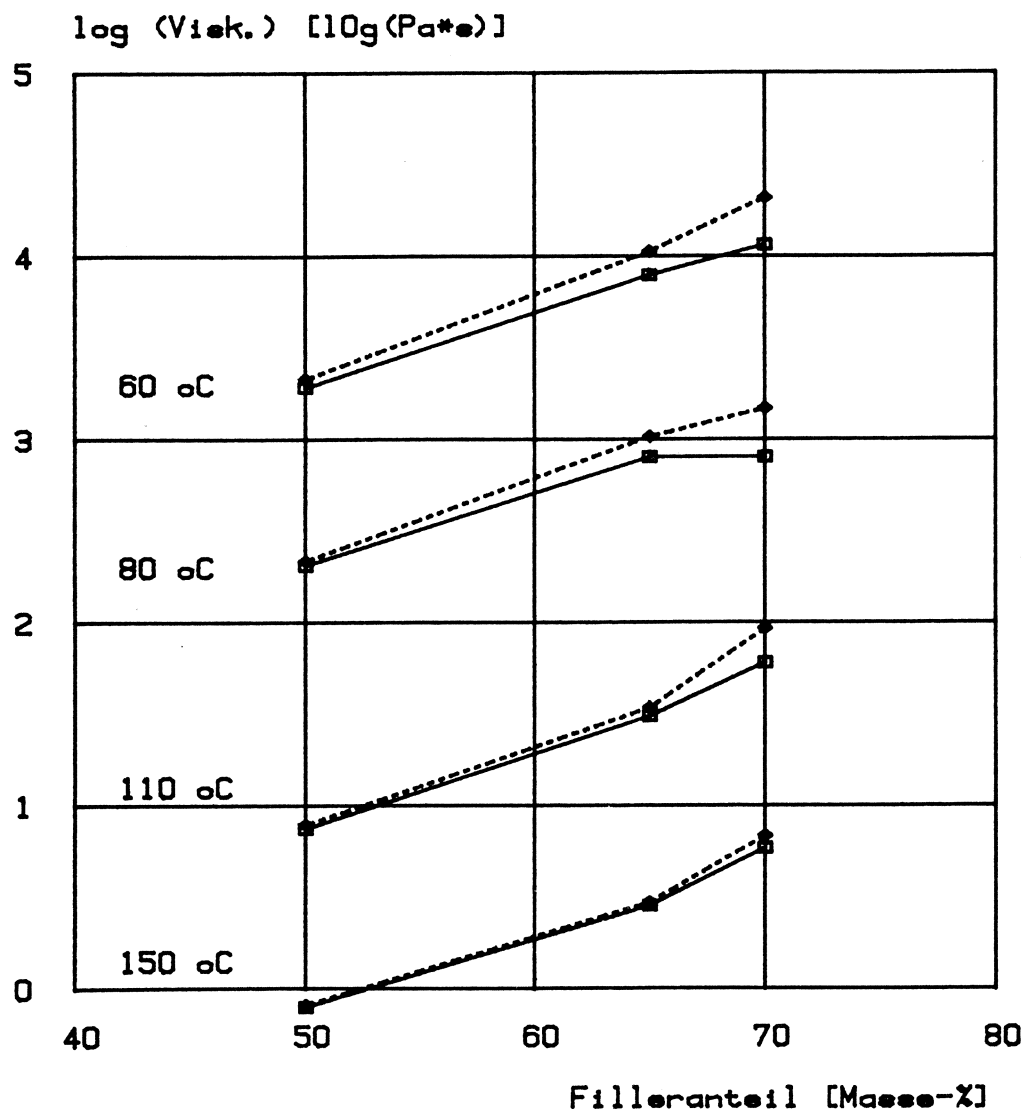
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER B

Viskositätsdiagramm

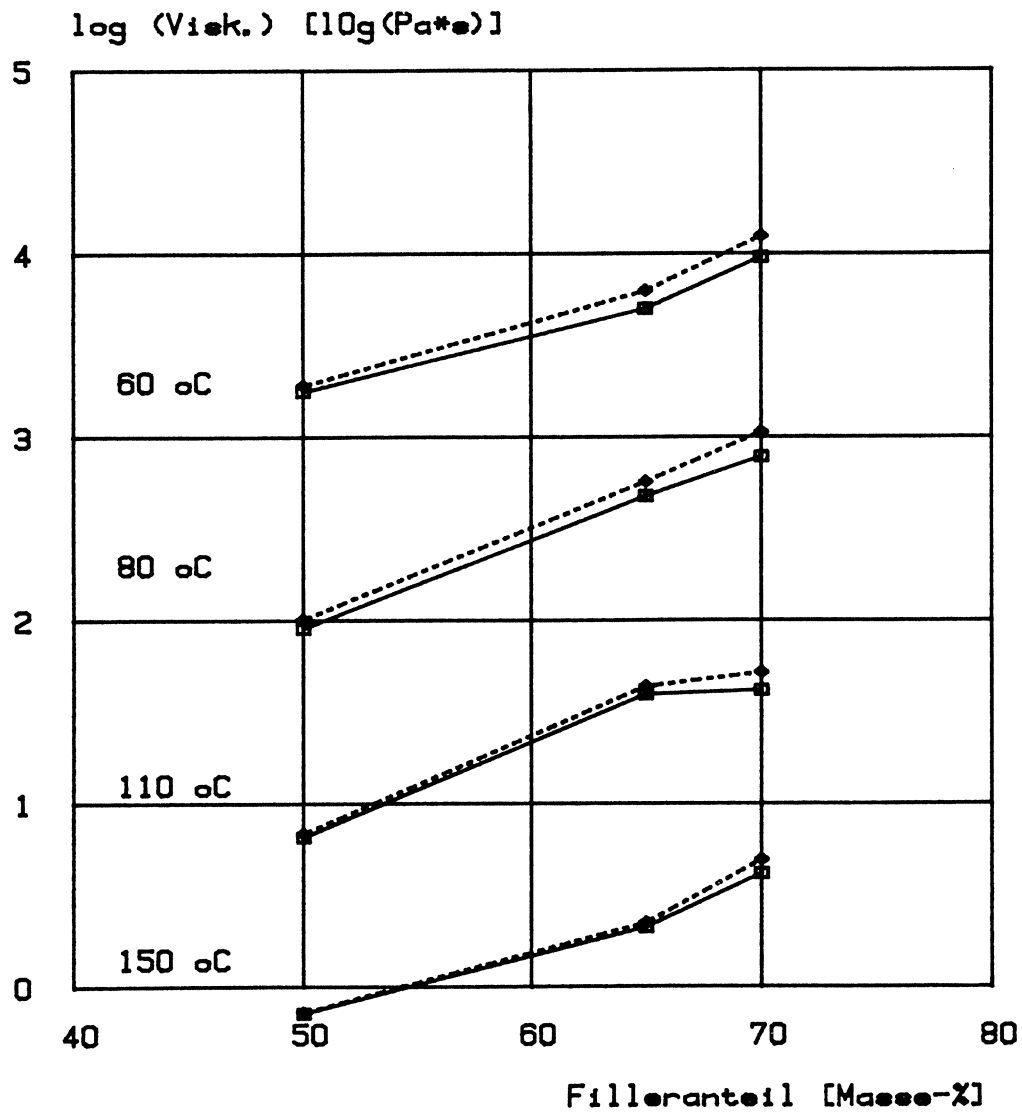
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER C

Viskositätsdiagramm

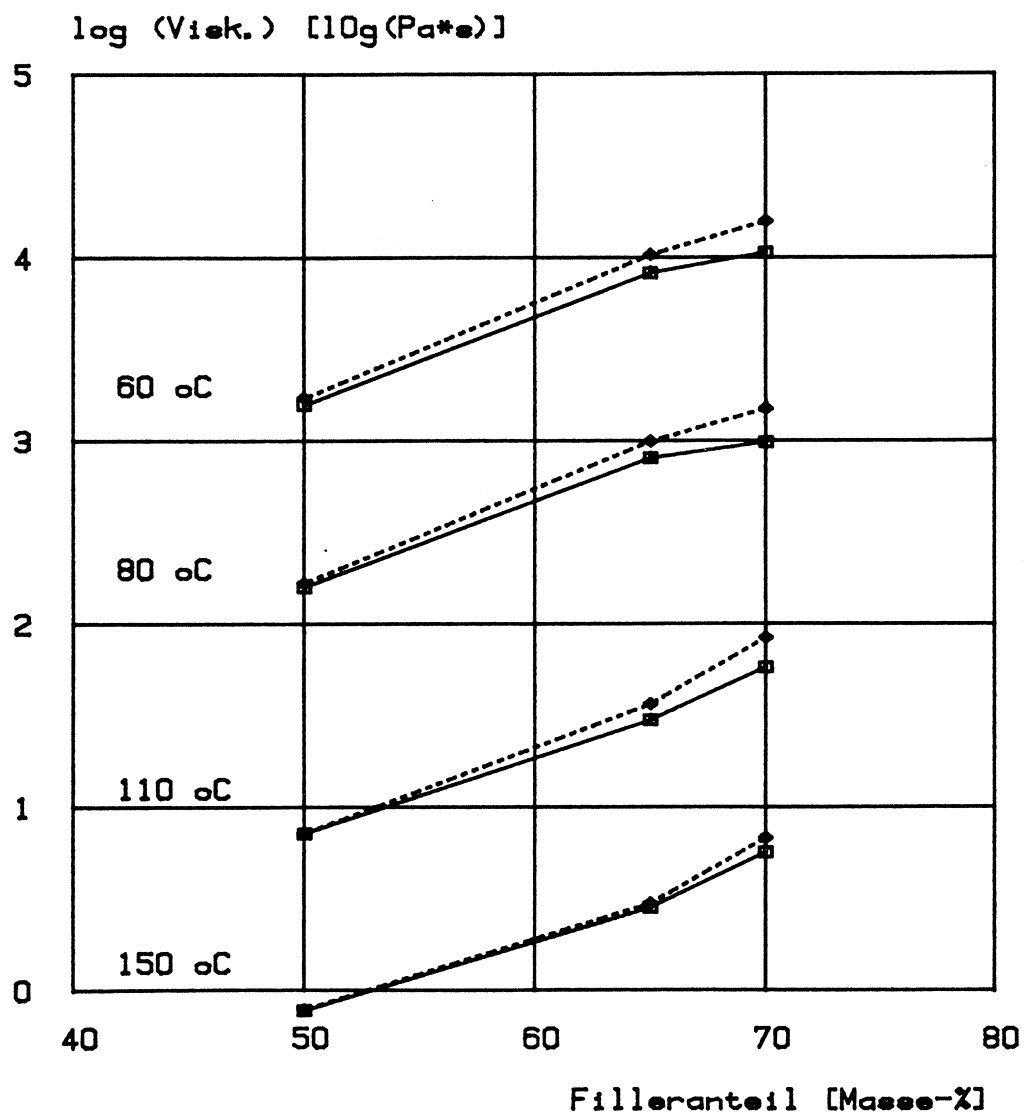
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER D

Viskositätsdiagramm

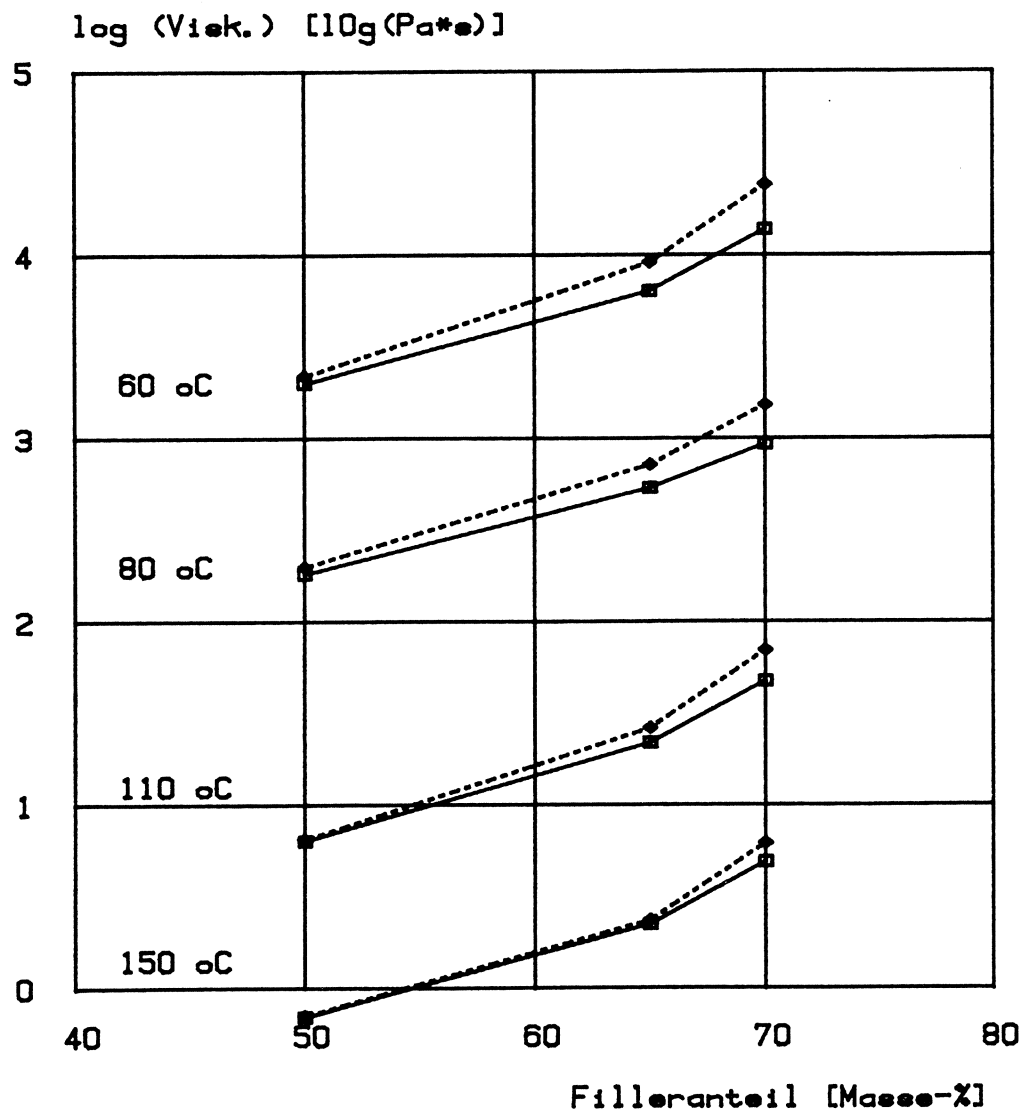
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER E

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

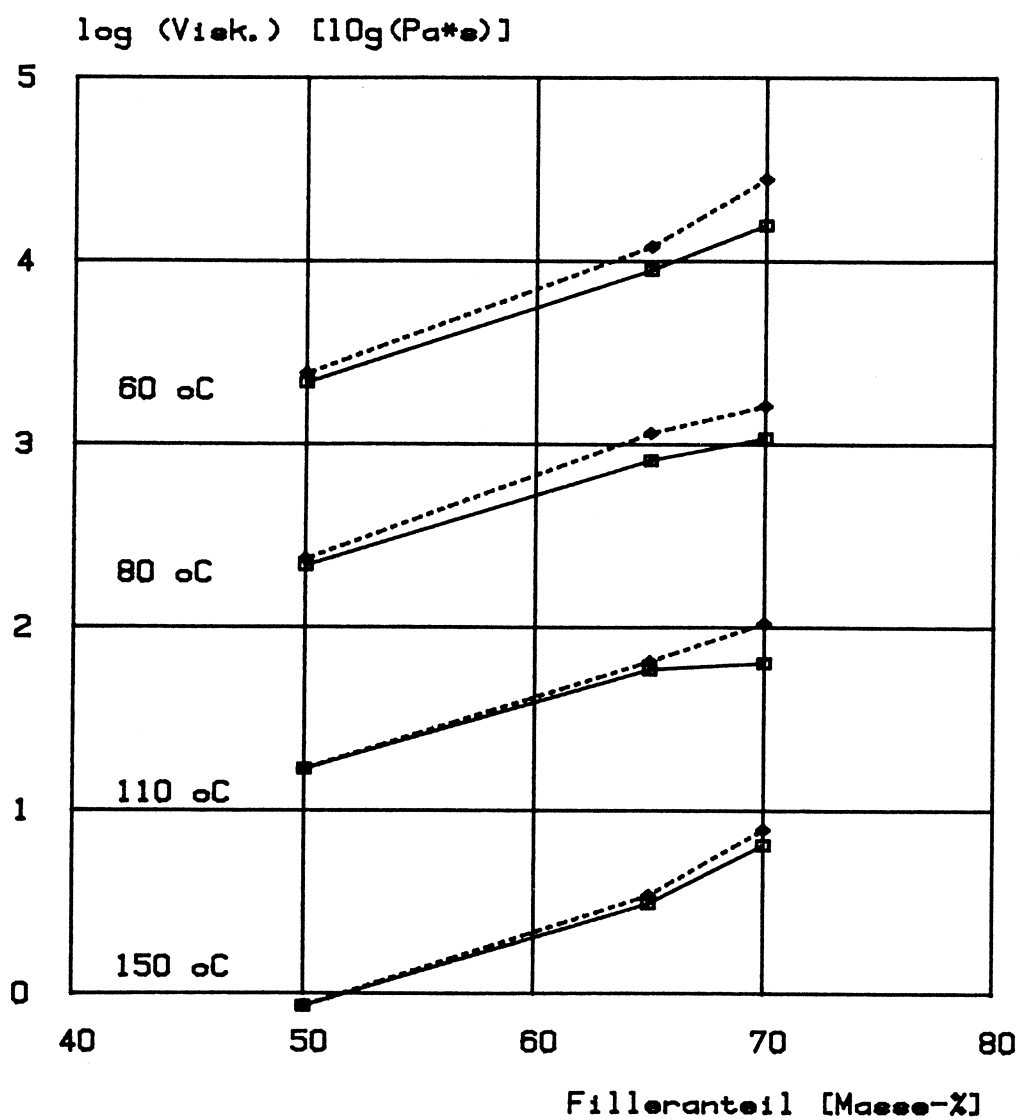
FILLER F

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität

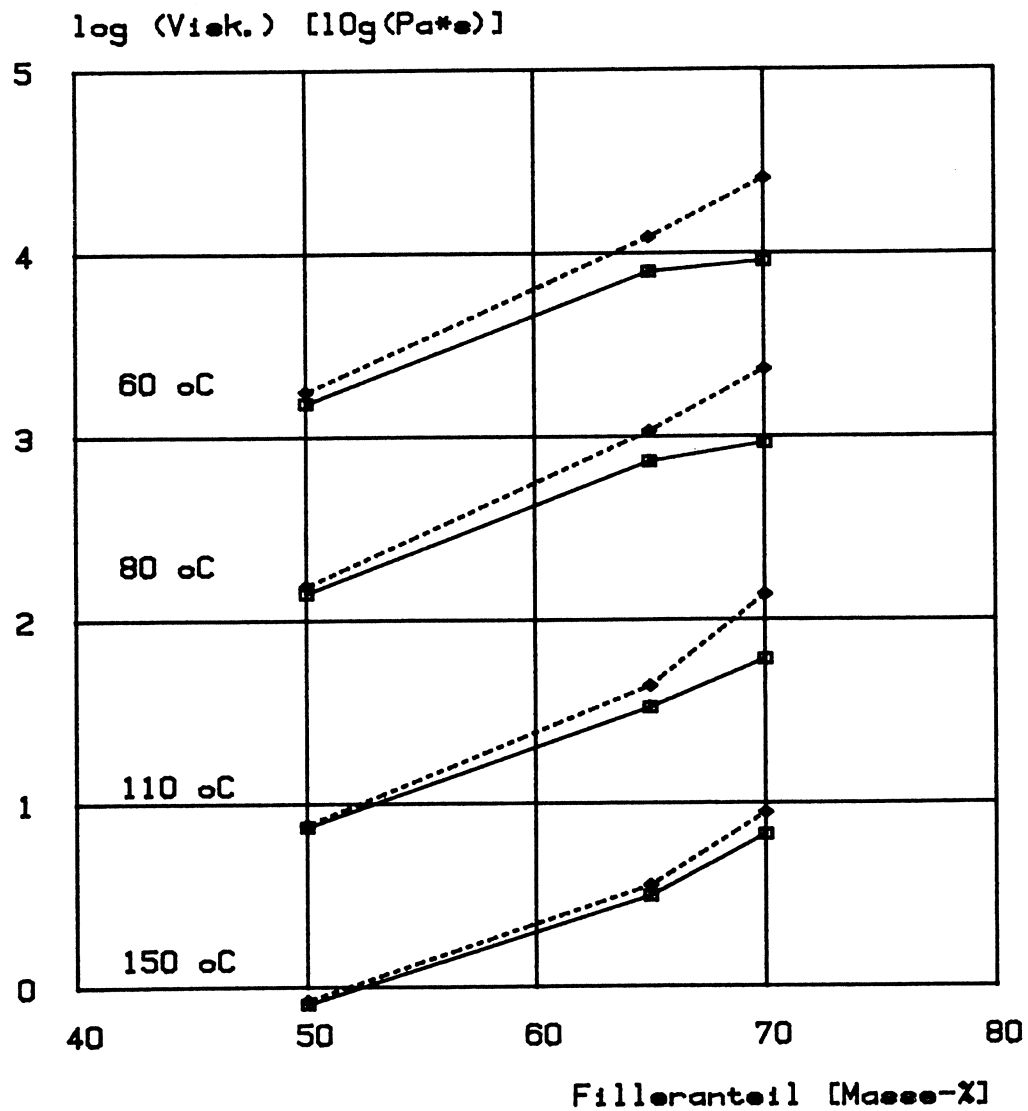
----- Grenzviskosität

FILLER G

Viskositätsdiagramm

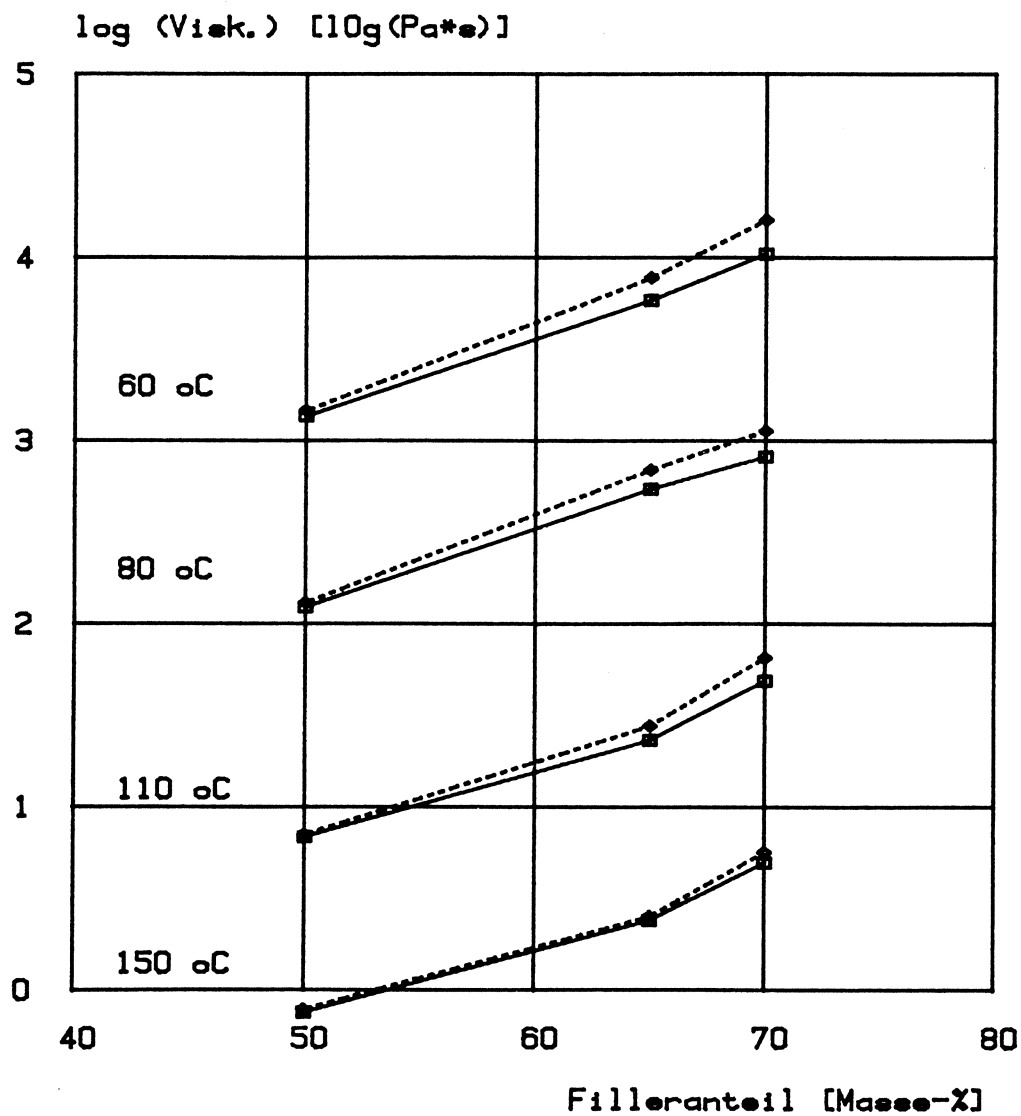
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER H

Viskositätsdiagramm

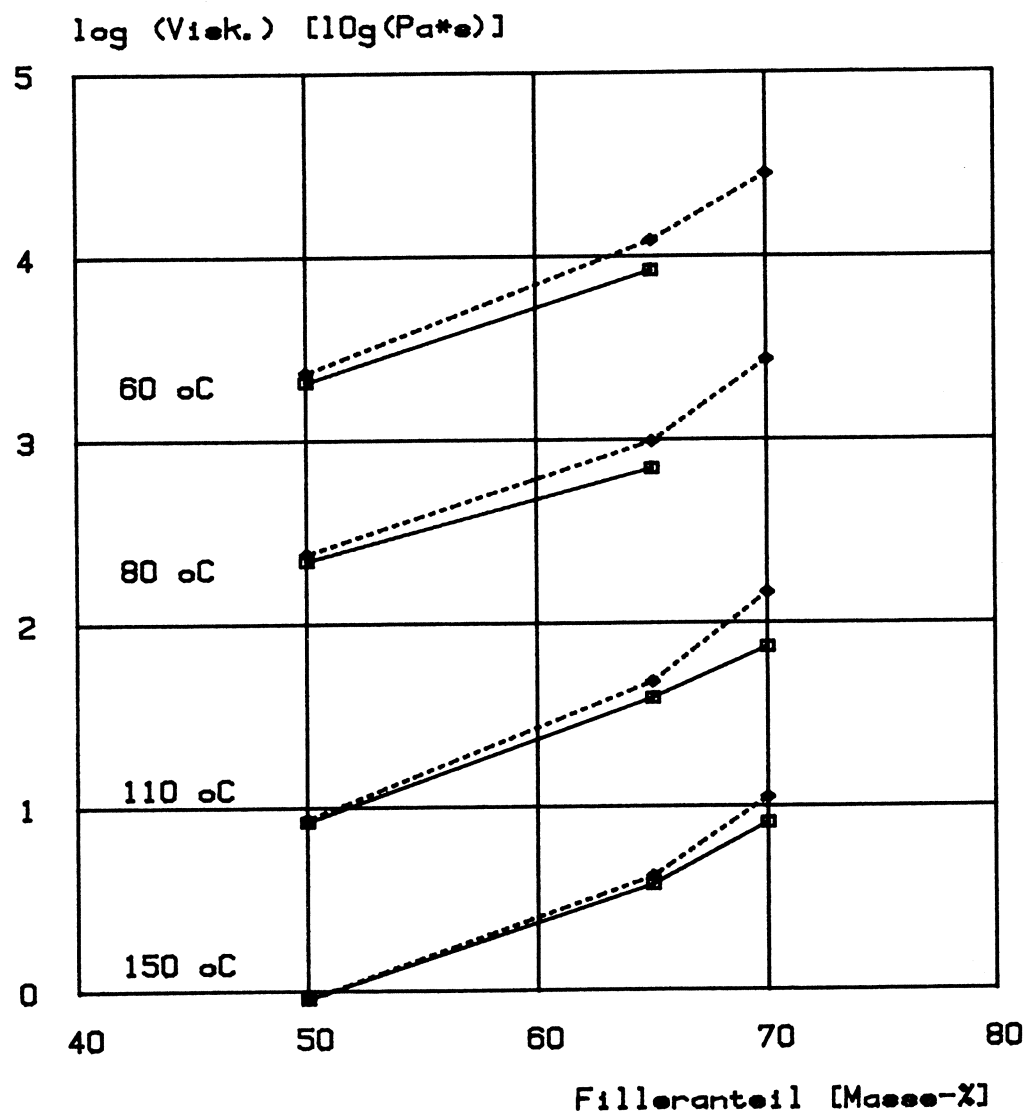
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER M

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

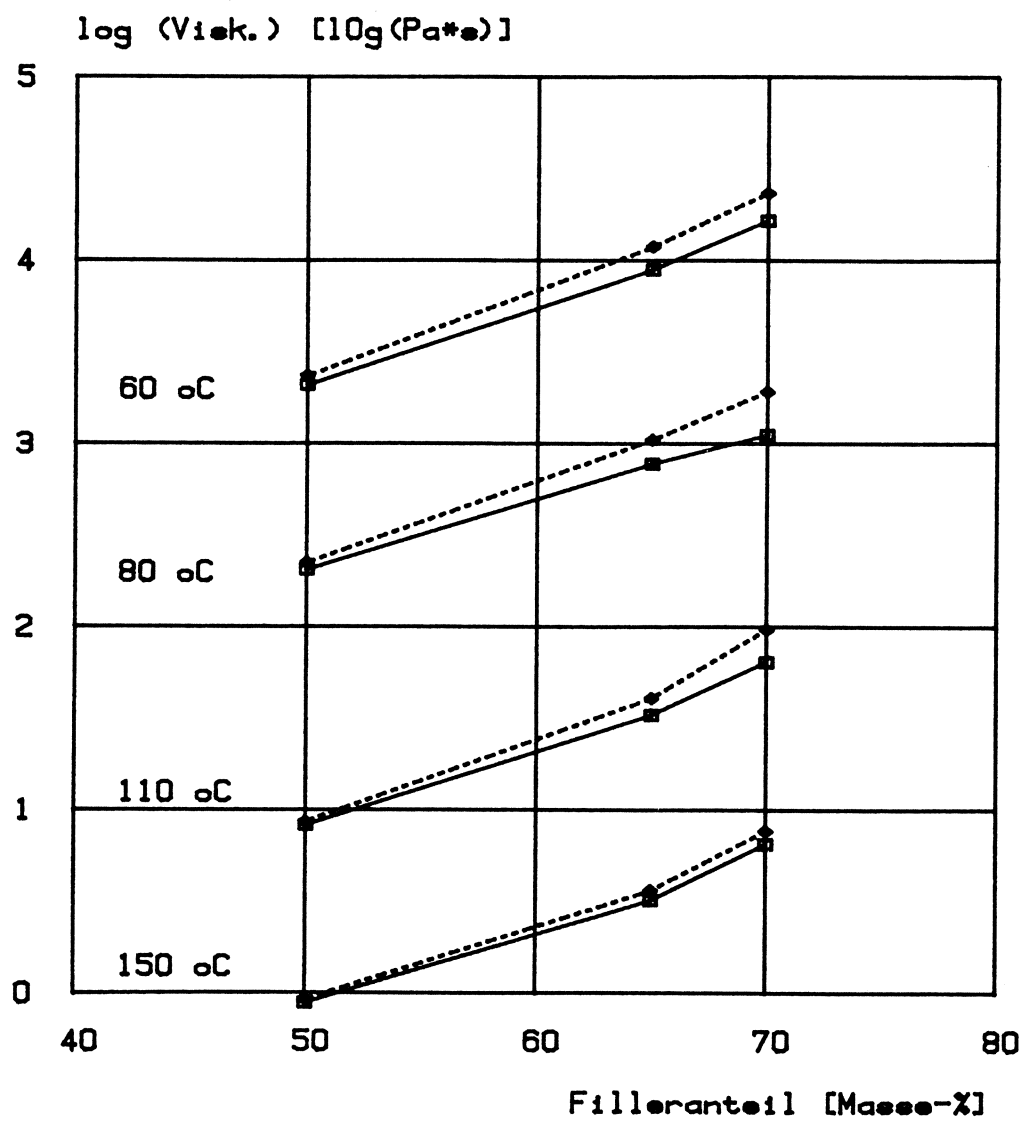
FILLER N

Viskositätsdiagramm

—— Viskosität

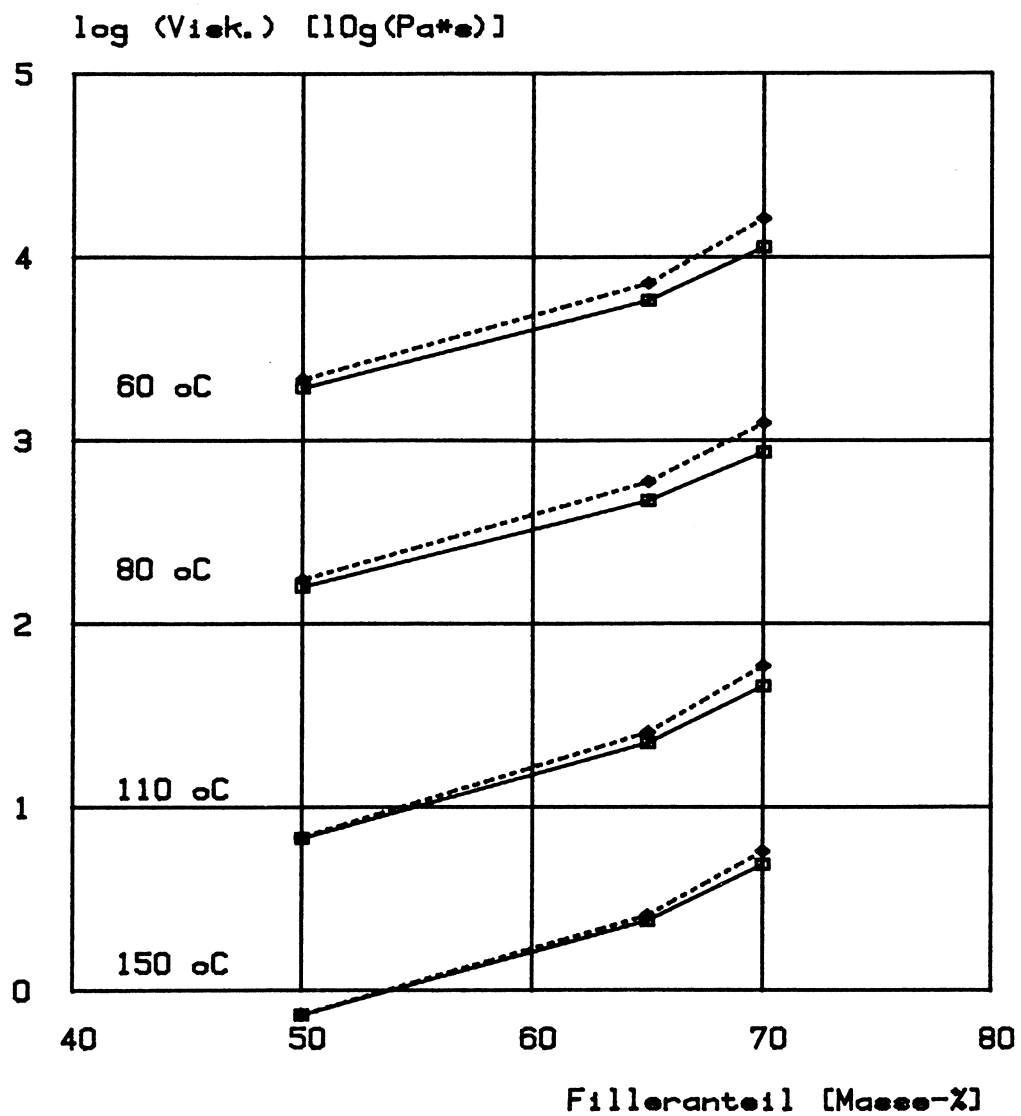
----- Grenzviskosität

FILLER 0

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

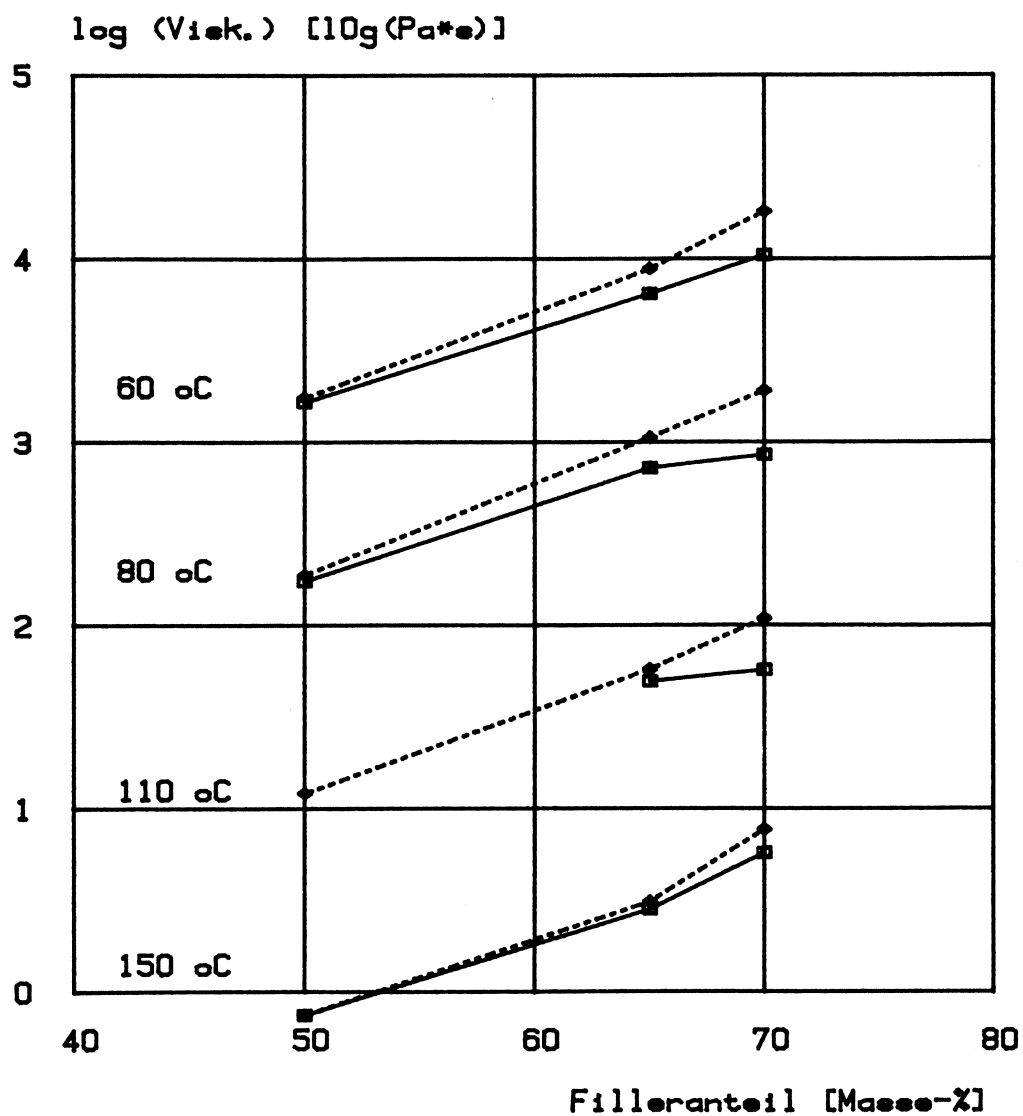
FILLER K

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität

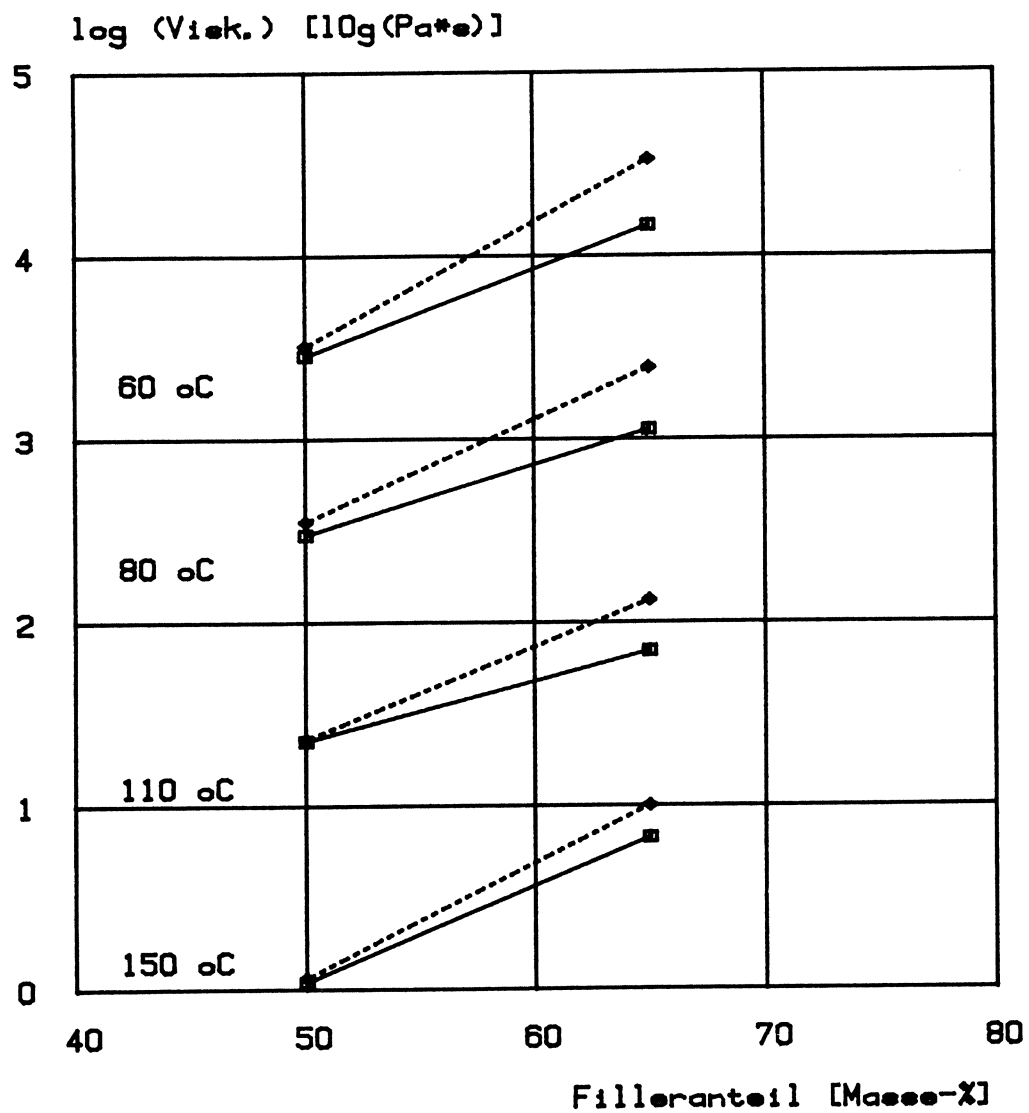
----- Grenzviskosität

FILLER Q

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

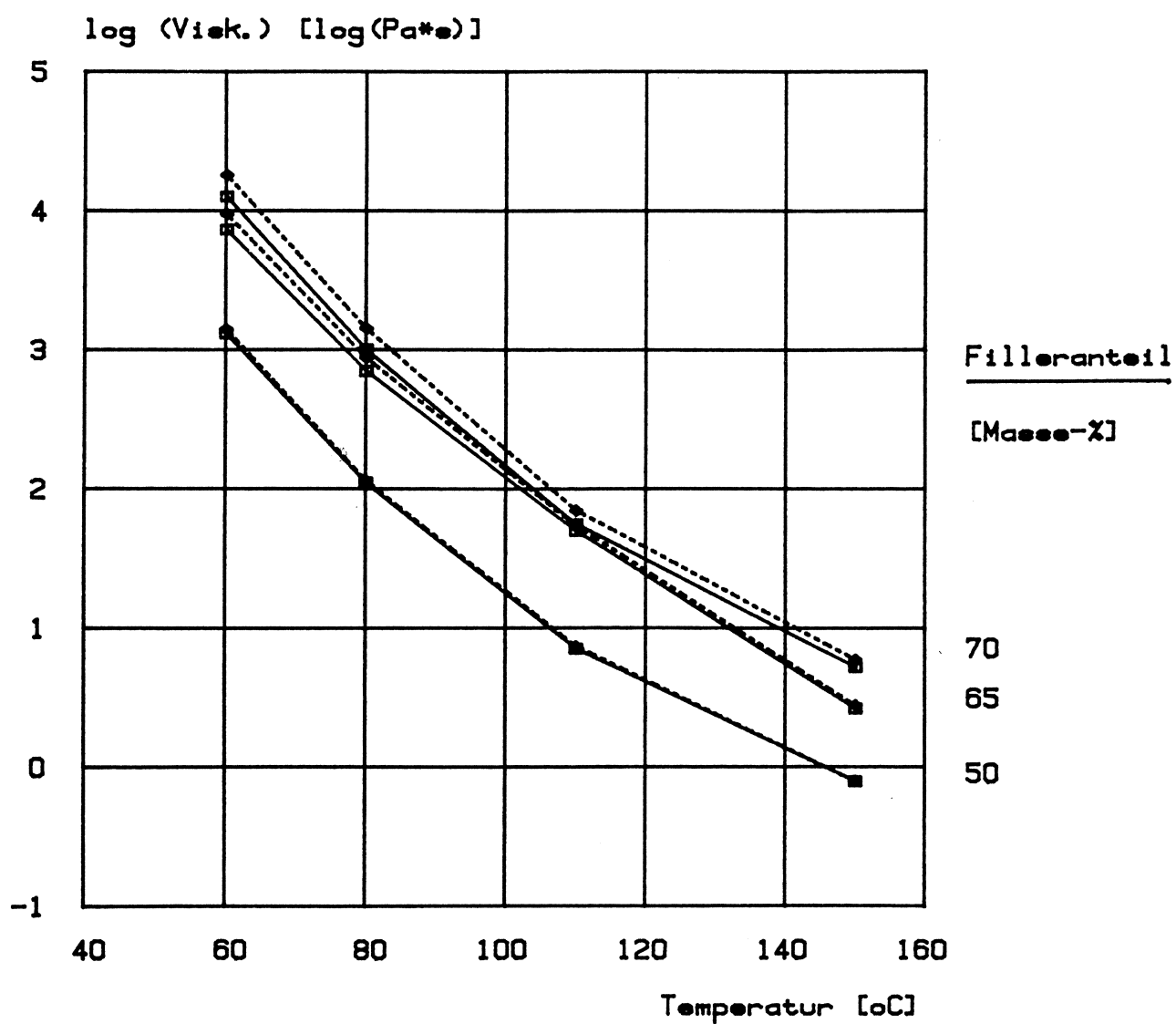
FILLER T

Viskositätsdiagramm

———— Viskosität

----- Grenzviskosität

FILLER A

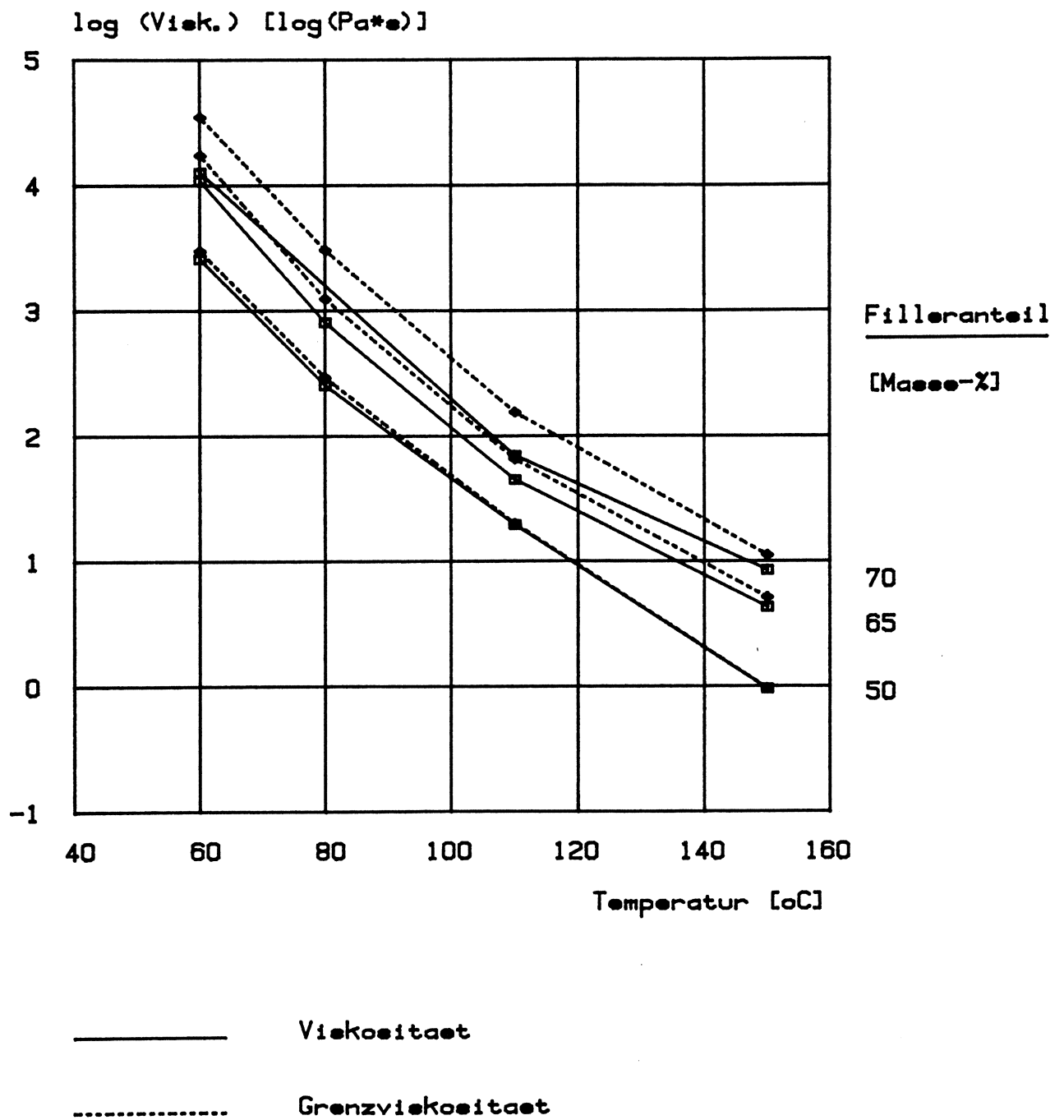
Viskositäts-Temperatur-Diagramm

—————

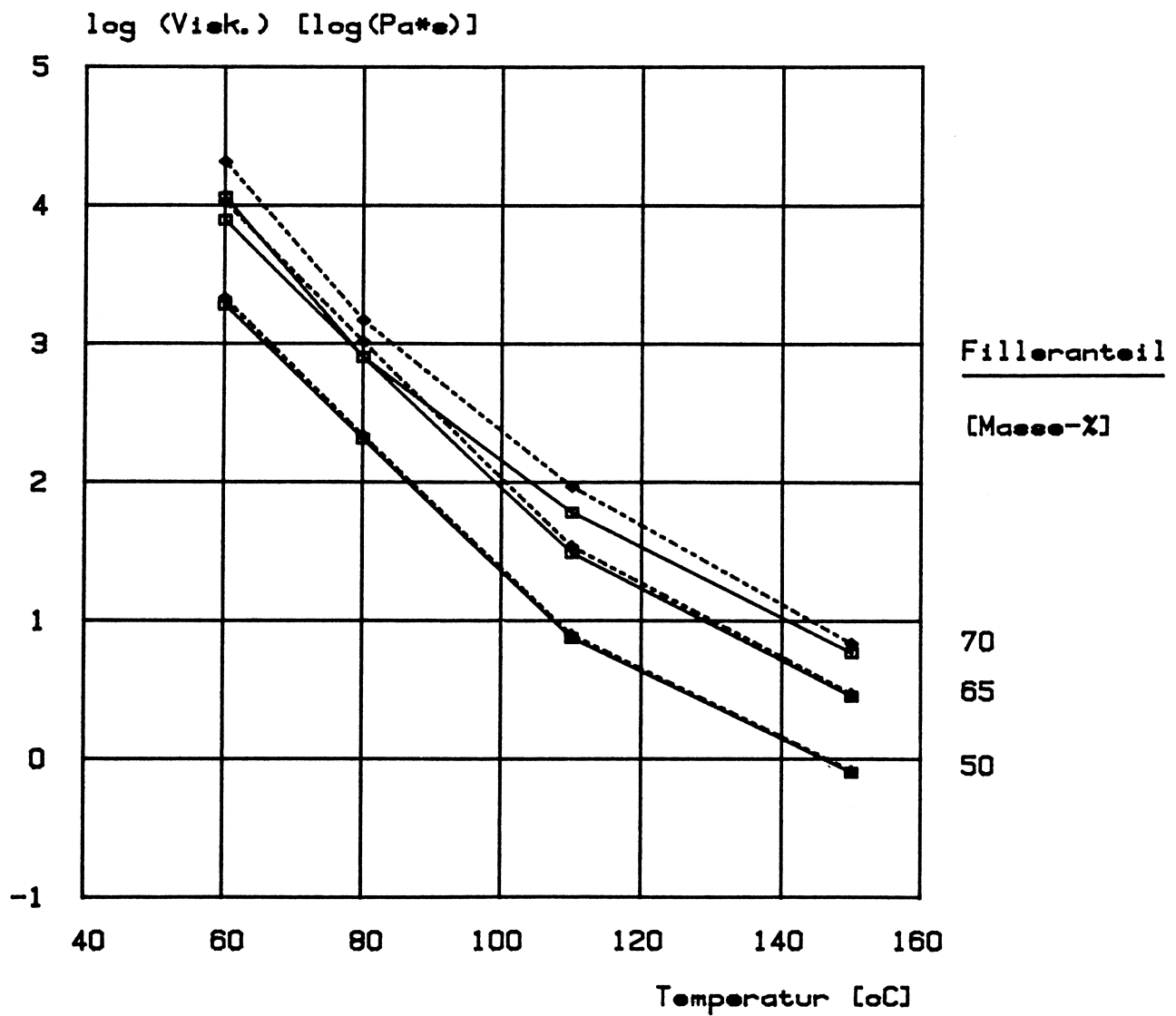
Viskosität

Grenzviskosität

FILLER B

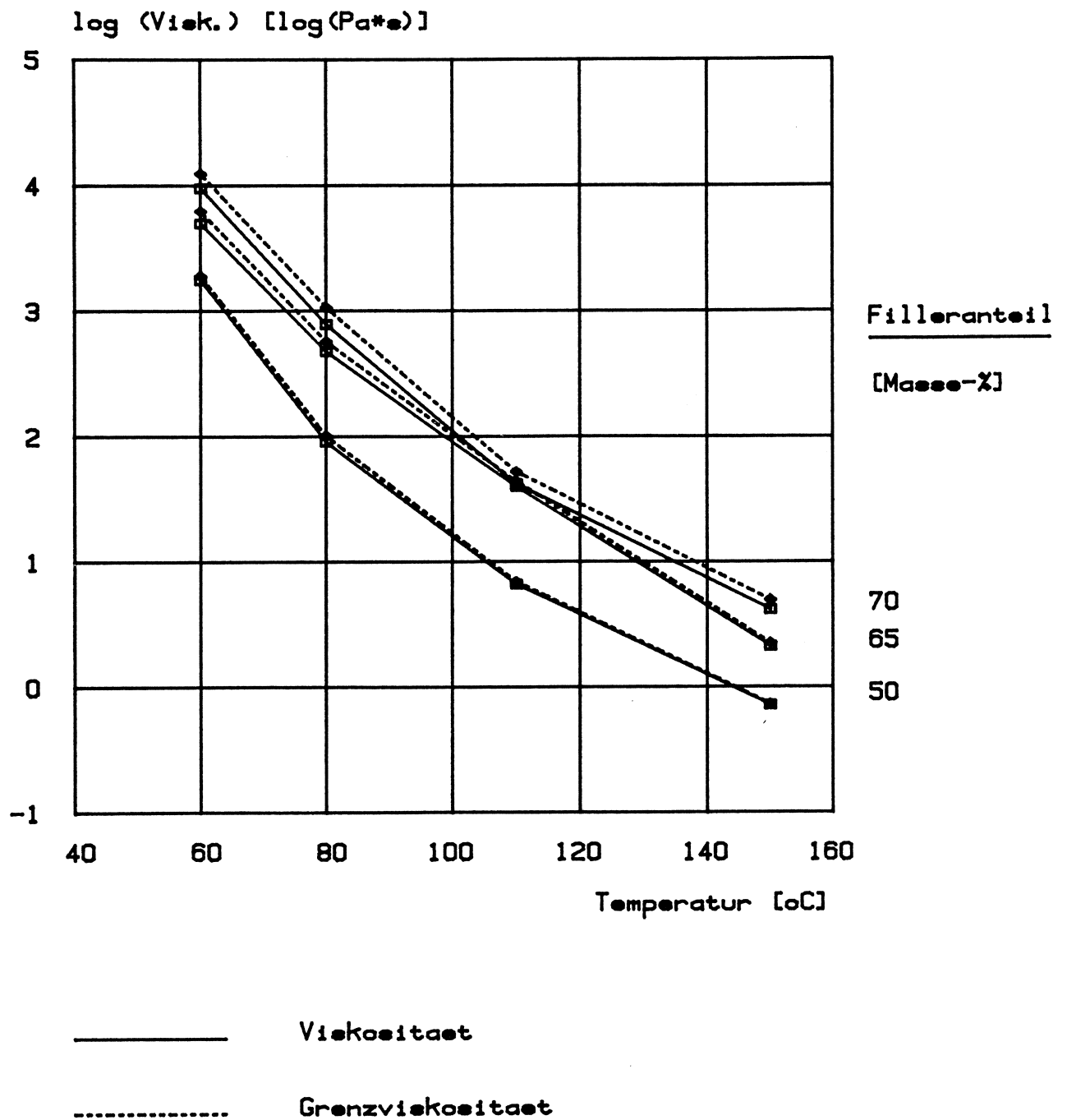
Viskositäts-Temperatur-Diagramm

FILLER C

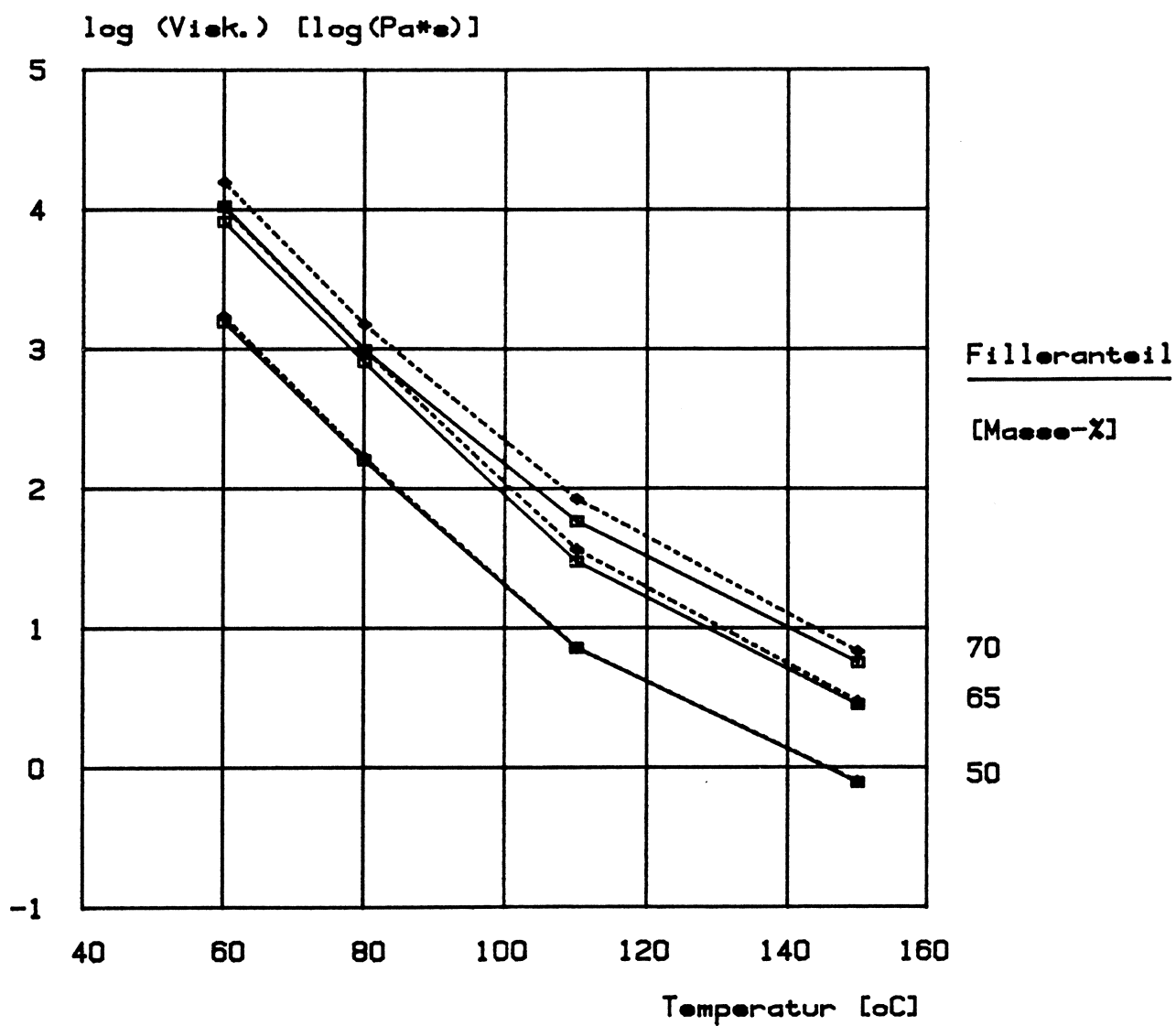
Viskositäts-Temperatur-Diagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER D

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

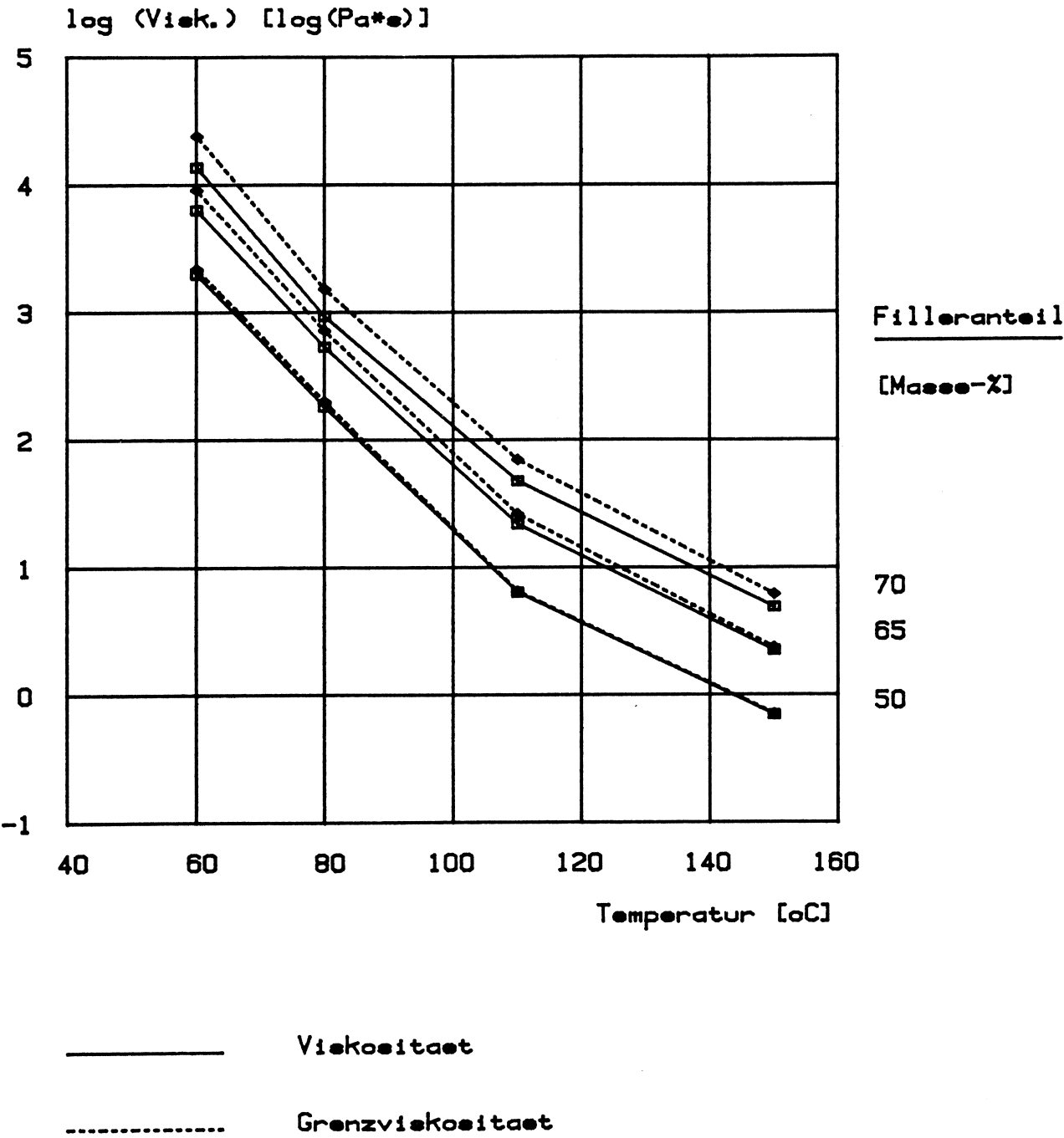
FILLER E

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

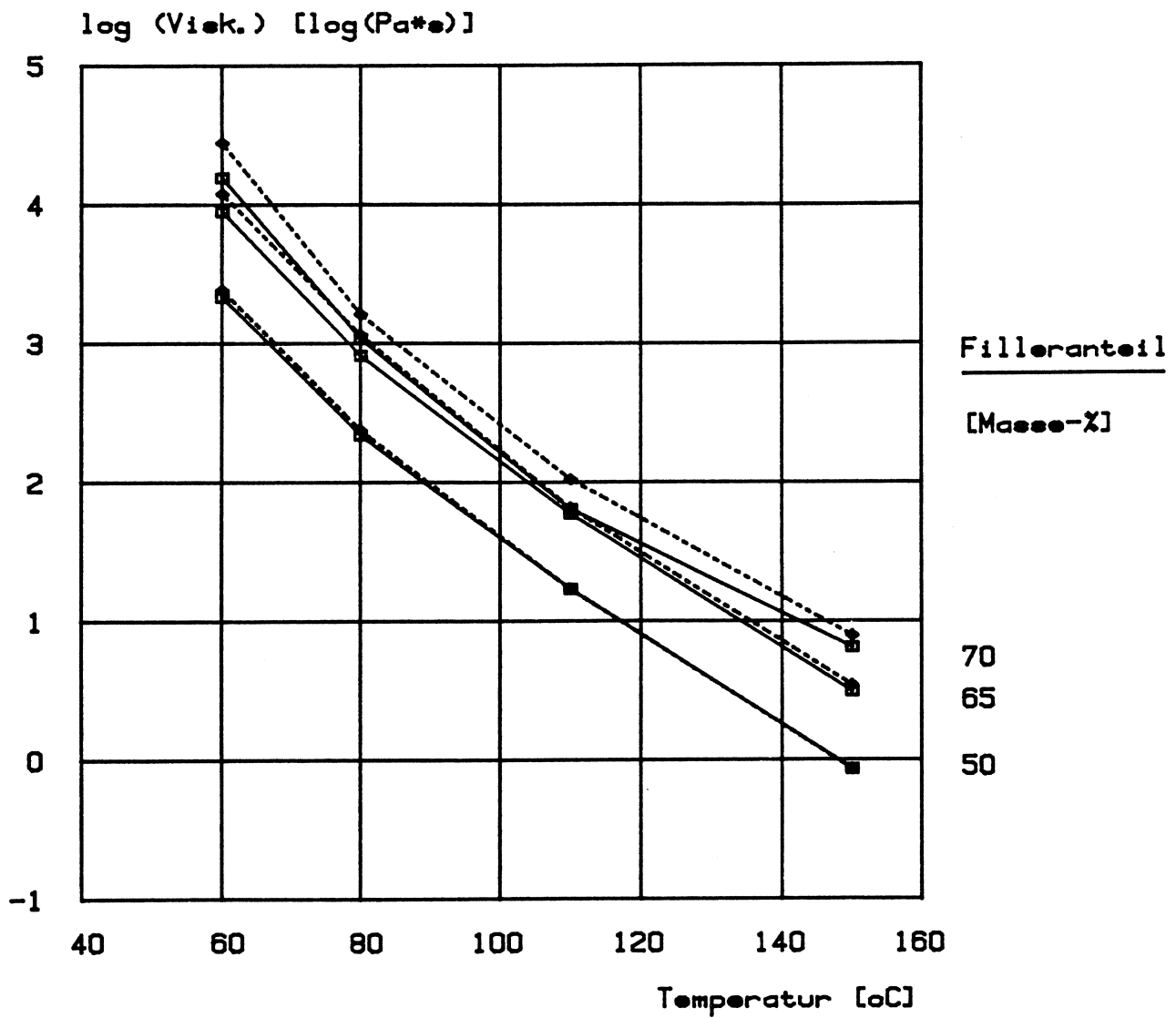
———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER F

Viskositäet-Temperatur-Diagramm

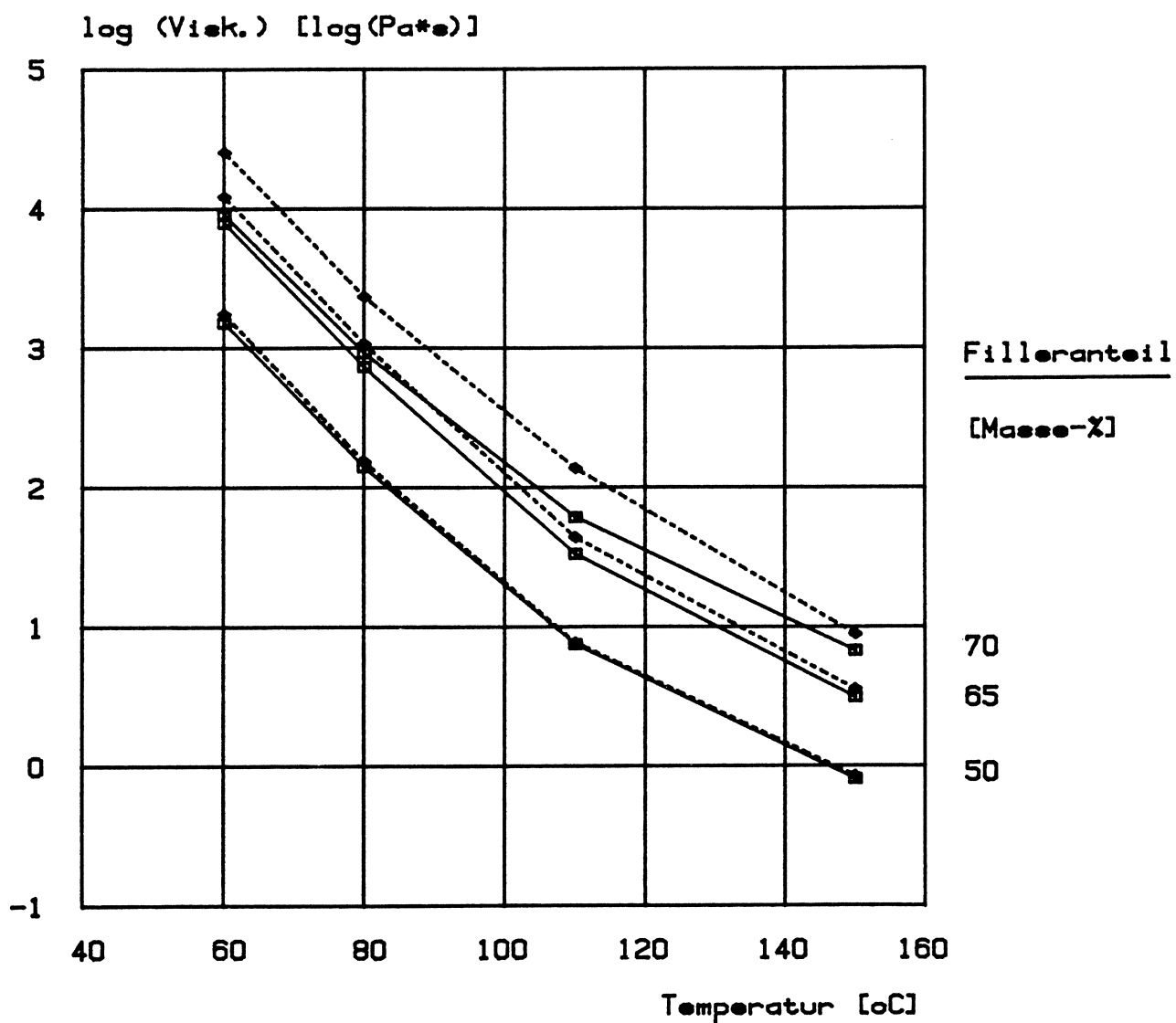


FILLER G

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER H

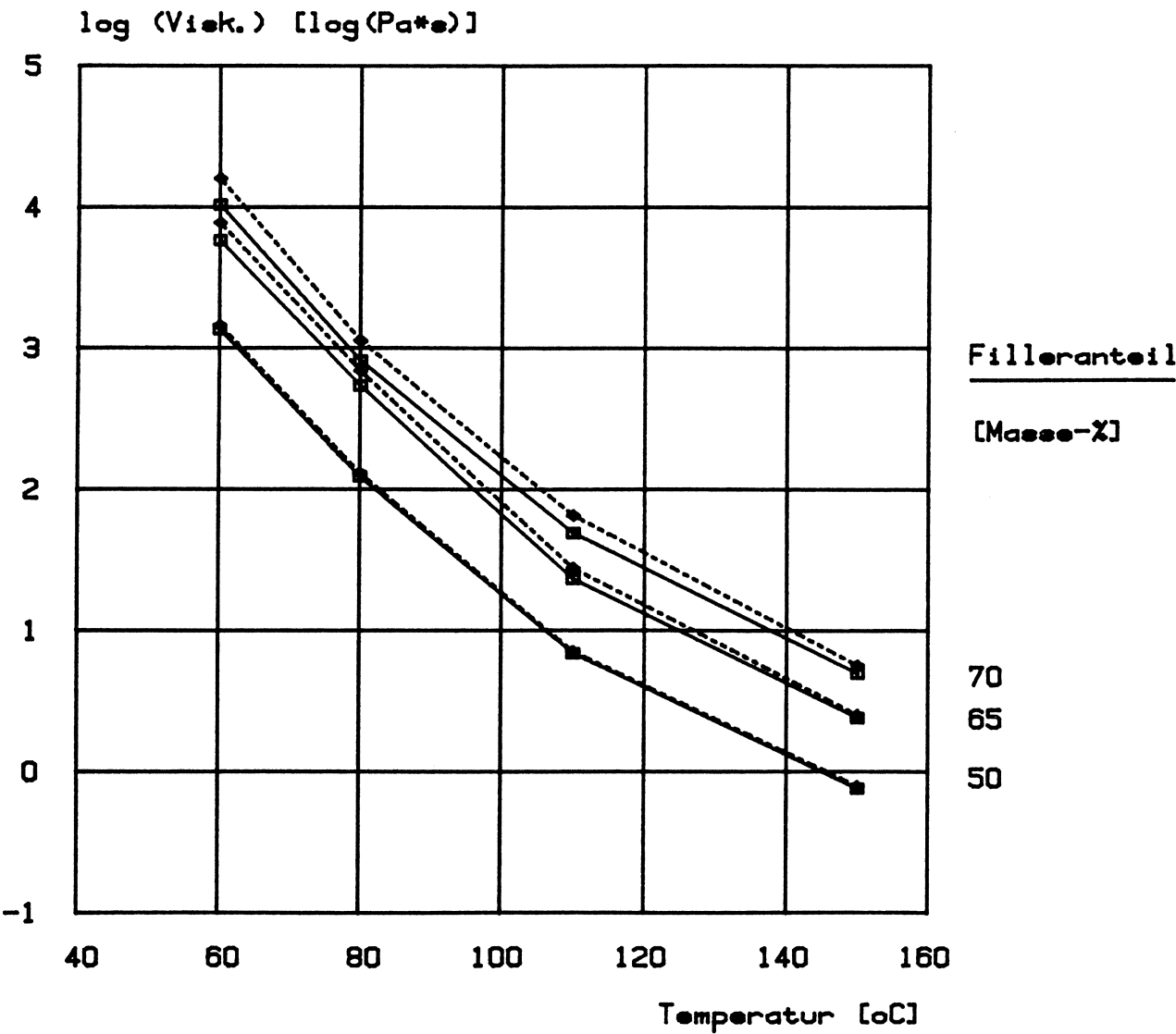
Viskositäts-Temperatur-Diagramm

———— Viskosität

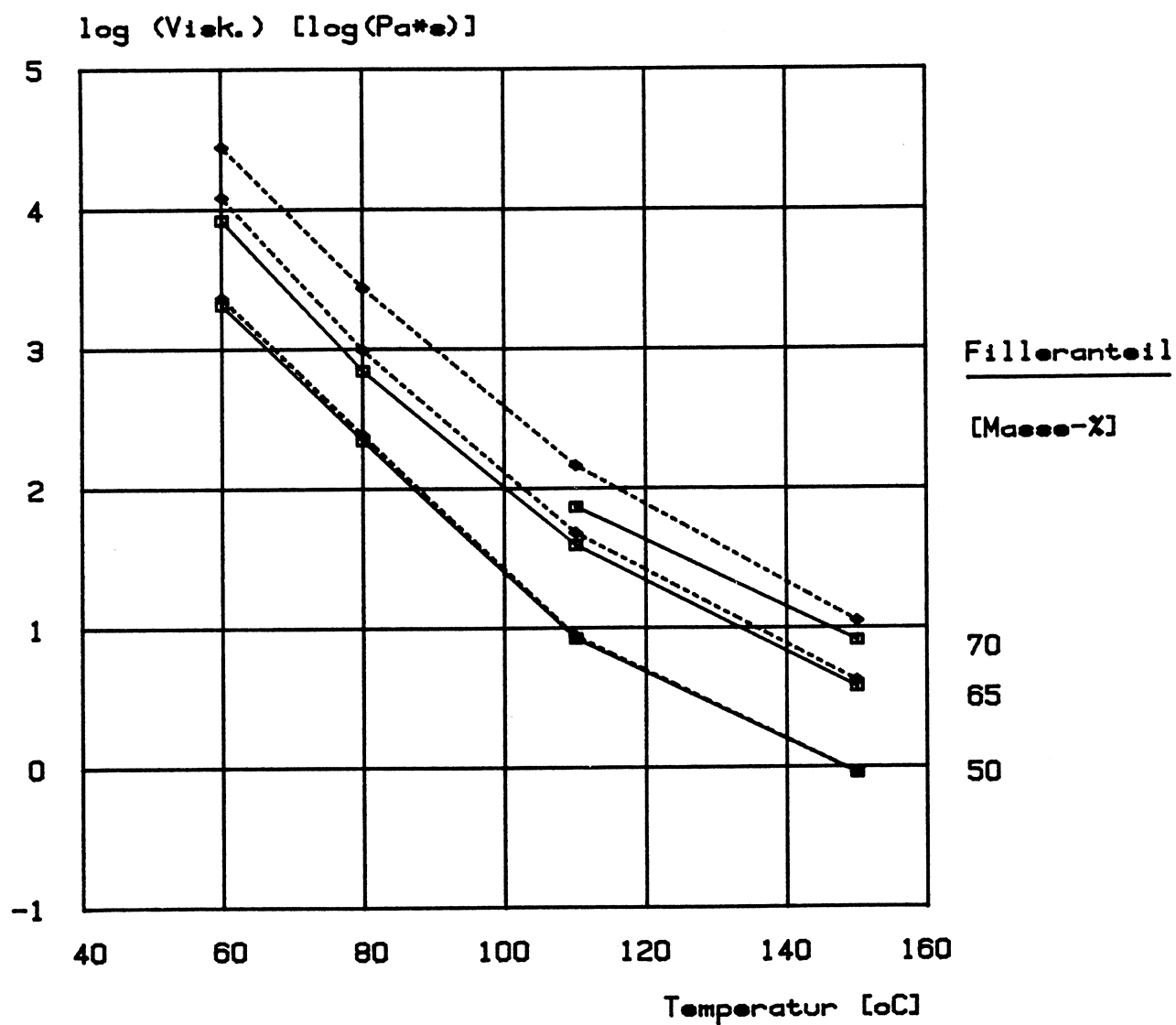
----- Grenzviskosität

FILLER M

Viskositäet-Temperatur-Diagramm



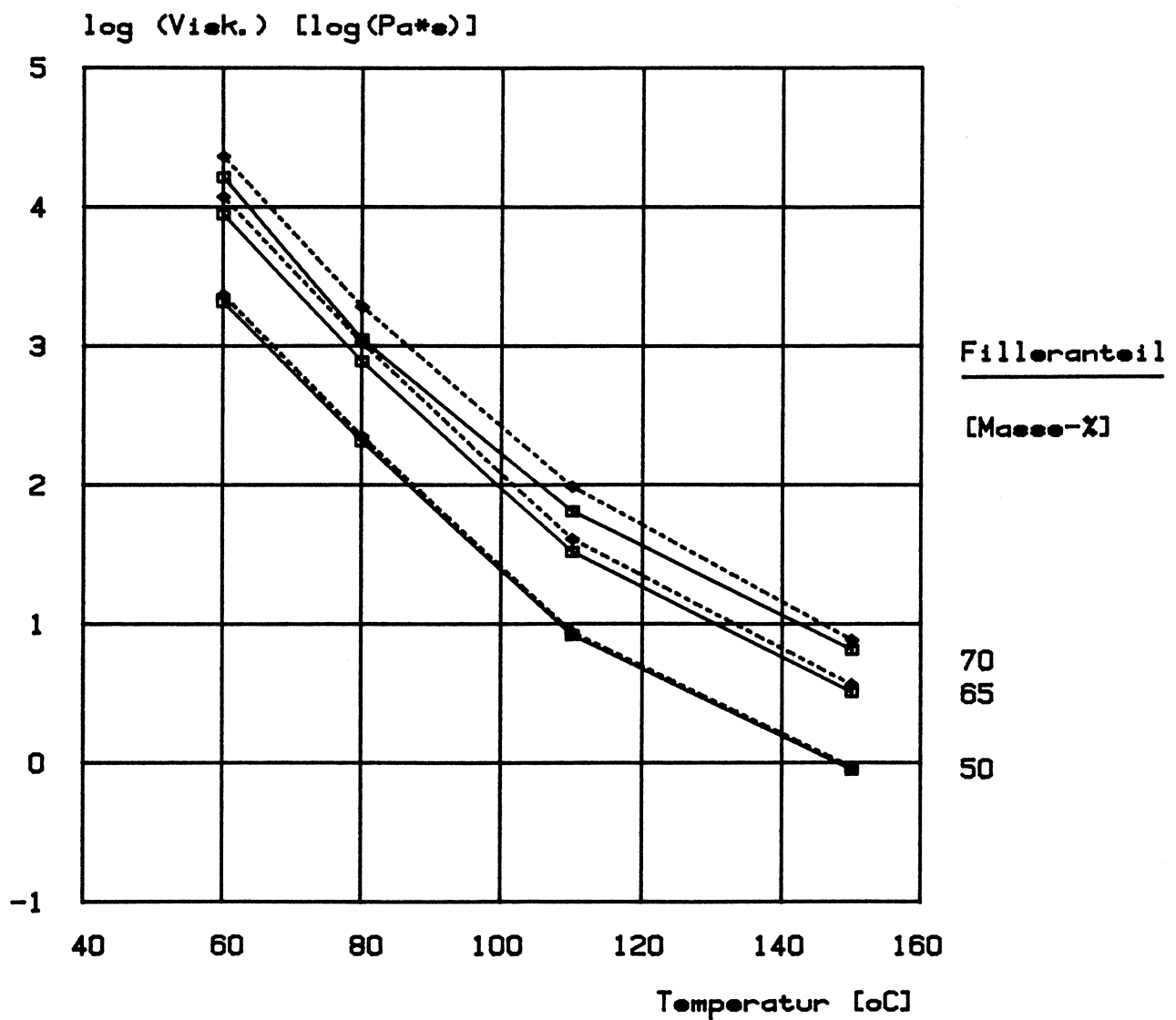
FILLER N

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

———— Viskosität

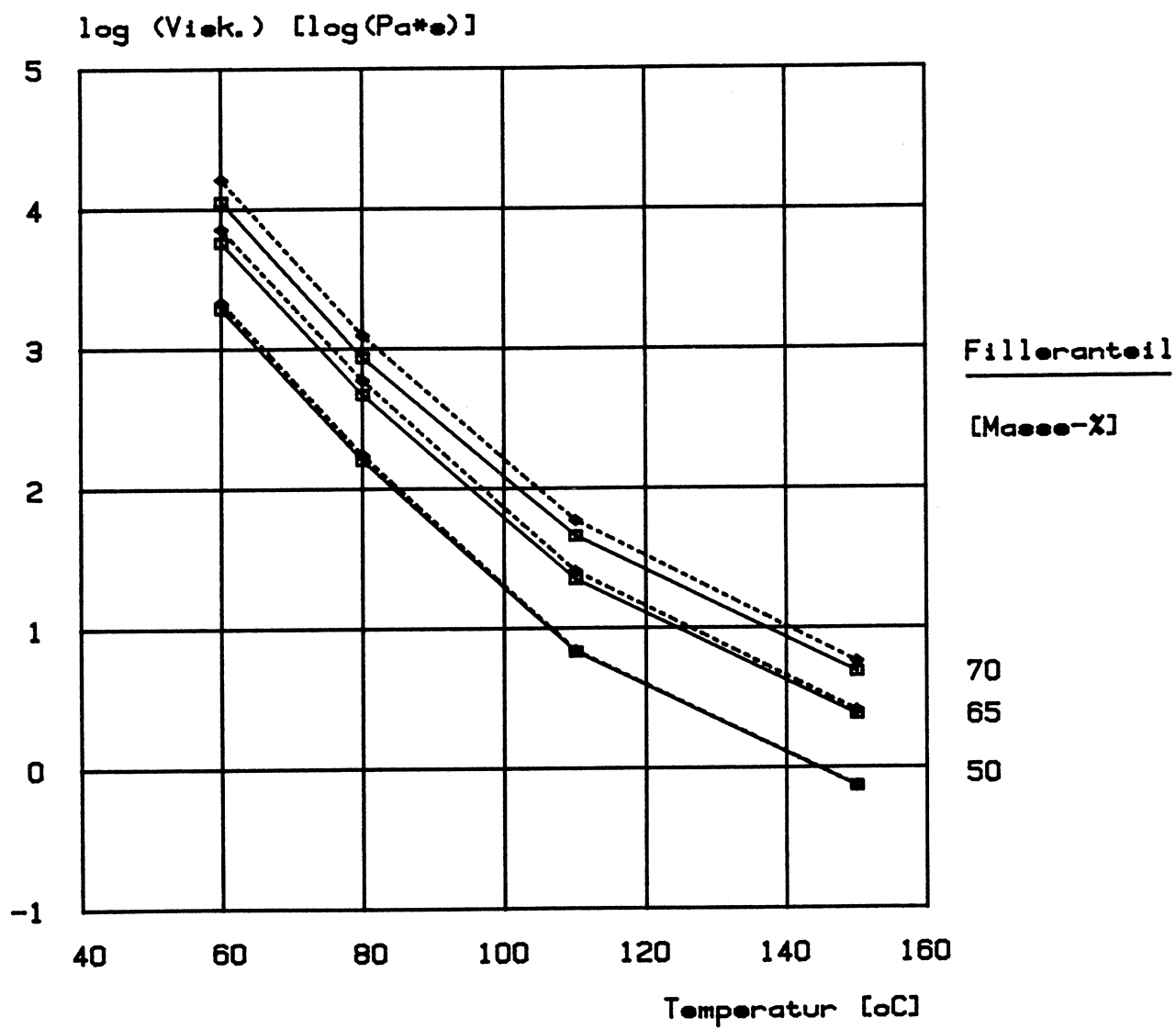
----- Grenzviskosität

FILLER 0

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER K

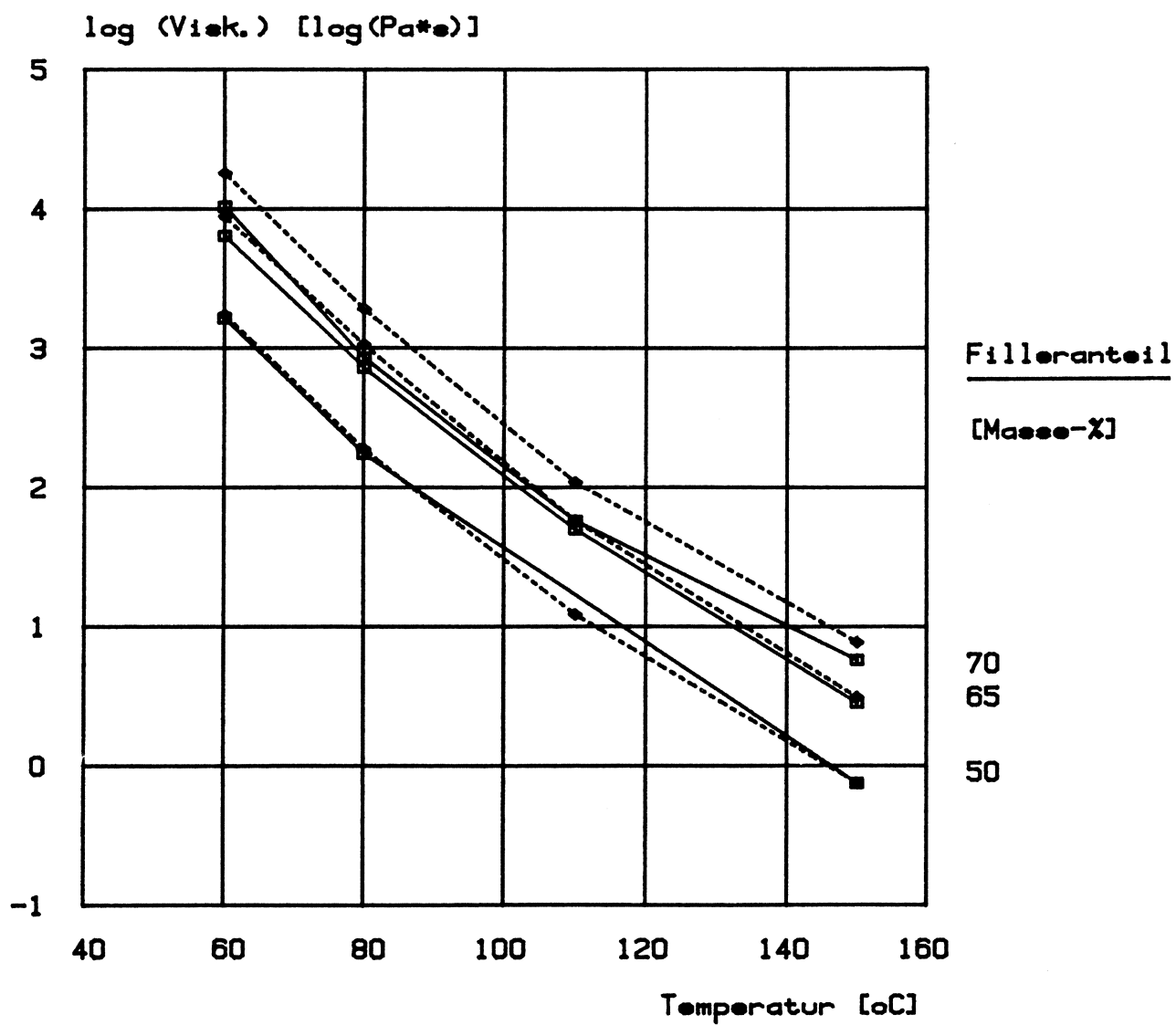
Viskositäts-Temperatur-Diagramm

—————

Viskosität

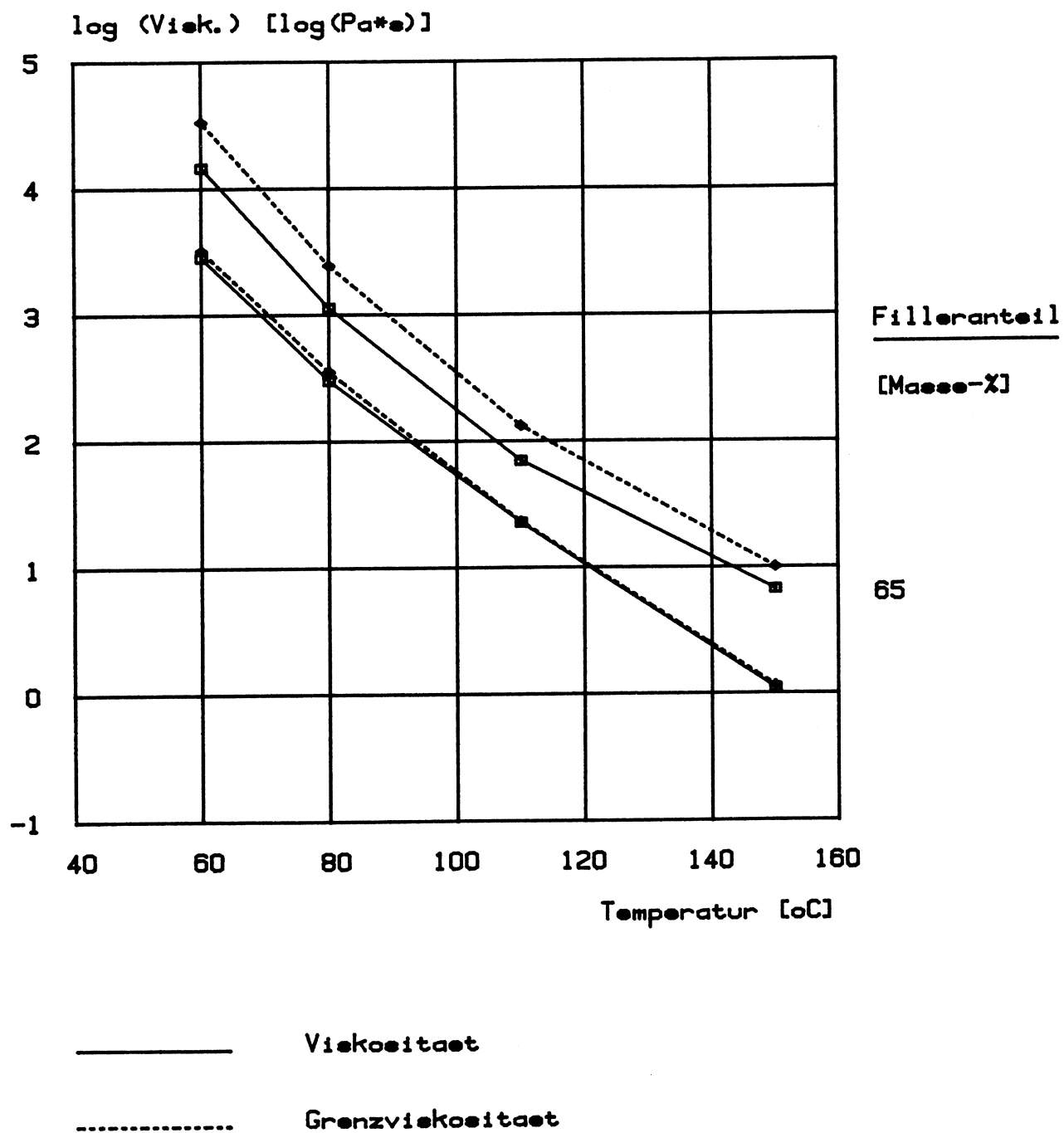
Grenzviskosität

FILLER Q

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

———— Viskosität
----- Grenzviskosität

FILLER T

Viskositäts-Temperatur-Diagramm

VIII Mechanische Untersuchungen an Gemischen von Fillern mit Bitumen mittels Schwingbelastung

J Zielsetzung

Mit ausgewählten Fillern wurden Mischungen mit einem Bitumen B 80/100 aus EMPA-Bestand hergestellt und an ihnen ausgedehnte mechanische Untersuchungen durchgeführt. Als Zielsetzung wurde das Erfassen mechanischer Eigenschaften über einen möglichst weitgehenden Bereich von Temperatur und Belastungsfrequenz ins Auge gefasst. Es sollten dabei Prüfprogramme entwickelt und dann die entsprechenden Messungen durchgeführt werden.

Beim Entwickeln dieser Prüfprogramme zeigten allerdings verschiedene Mischungen ein ausgesprochen nichtlineares Verhalten. Die gemessenen Moduln waren jeweils abhängig von Versuchsbedingungen und von der Vorgeschichte der Probe. Das wies auf eine starke Belastungsempfindlichkeit der Mischungen hin. Daneben konnte an einem beträchtlichen Teil der Mischungen ein überraschendes Temperaturverhalten, eine Abnahme der Festigkeit mit abnehmender Temperatur, festgestellt werden.

Diese Abweichungen vom erwarteten Verhalten sind nicht nur von theoretischem Interesse, sondern auch von praktischer Bedeutung. Die hohe Belastungsempfindlichkeit deutet auf Veränderungen im Gerüst der Fillerkörner hin, welche für Probleme der Standfestigkeit von Interesse sind. Das anomale Temperaturverhalten steht dagegen in Zusammenhang mit der Neigung zur Rissbildung.

Das komplexe Verhalten der Mischungen ist für das Durchführen von mechanischen Prüfungen von Bedeutung. Bei der Auswertung der Messwerte wird immer auf ein mechanisches Modell abgestützt, welches solche Unregelmässigkeiten im allgemeinen nicht berücksichtigt. Bekannte Schwierigkeiten beim Erfassen der mechanischen Eigenschaften bituminöser Baustoffe haben nicht zuletzt ihren Grund in der Diskrepanz zwischen dem komplexen mechanischen Verhalten und

den vereinfachenden Modellen. Vergleichbare Werte werden nur dann erhalten, wenn die Prüfbedingungen sehr genau vorgeschrieben werden.

Das Ziel, mechanische Kennwerte von Mischungen aus Fillern und Bitumen zu ermitteln, wurde deshalb eingeschränkt zugunsten des Entwickelns von Prüfprogrammen mit dem Ziel, die erwähnten praxisrelevanten Eigenschaften genauer zu erfassen und das Verständnis der ihnen zugrundeliegenden Mechanismen zu fördern.

K Beschreibung der Prüfung

Die Anlage als Ganzes ist in der Dissertation von J.P. Junker, EMPA-Bericht Nr. 215, ausführlich beschrieben. Hier wird nur auf jene Teile eingegangen, welche für das Verständnis der ausgeführten Prüfungen nötig sind.

1. Prüfeinbau

Die wesentlichen Teile des Einbaus für das Prüfen von Bitumen sowie von Mischungen aus Fillern und Bitumen bestehen, wie aus **Abbildung 1** ersichtlich ist, aus einem Hüllrohr und einem zentralen Kern. Beim Einfüllen sind diese beiden Teile so befestigt, dass der zentrale Kern konzentrisch im Hüllrohr steht. Das Hüllrohr kann aus zwei Teilen der Höhe 100 mm aufgebaut werden, was ein kontrolliertes Einfüllen auf zwei Höhen erlaubt. Mit wenigen Ausnahmen wurde bei allen Prüfungen die ganze Höhe ausgenutzt, weil die so entstehende doppelte Kraft genauer gemessen werden konnte. Damit ergeben sich die folgenden einheitlichen Abmessungen:

- innerer Radius 50 mm
- äusserer Radius, d.h.
innerer Radius des Hüllrohres 60 mm
- Füllhöhe ca. 200 mm

2. Messeinrichtungen

Um das mechanische Verhalten einer Probe erfassen zu können, müssen Kraft und Verformung gemessen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Weggeber für die Verformungsmessung kraftlos an der Prüfeinrichtung montiert werden, weil sonst die Verformung des Kraftrahmens mitgemessen wird. Im geprüften Material selber ist eine Temperaturmessung durchzuführen, weil bituminöse Baustoffe eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit aufweisen. Der Temperaturfühler wurde ungefähr auf halber Füllhöhe eingegossen. **Abbildung 1** zeigt schematisiert die Prüfeinrichtung mit montierten Gebern.

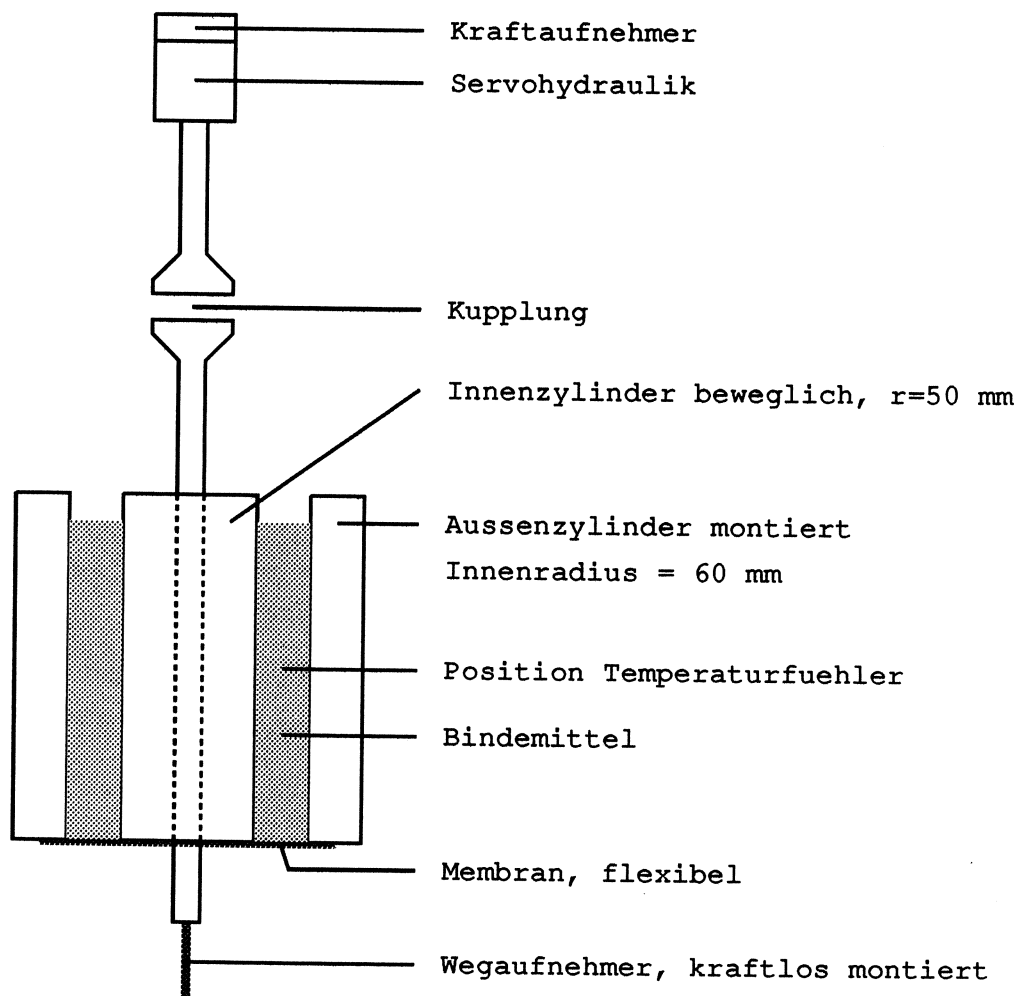


Abbildung 1: Prinzip der Prüfvorrichtung

3. Versuchsanordnung und Messprinzip

Für das Durchführen von Prüfungen wird mittels einer Servohydraulik von oben her eine Kraft auf die Probe aufgebracht. Dabei kann die Kraft gemäss einem sinusförmigen Sollsignal geregelt werden, es wird damit eine sich mit vorgegebener Frequenz und Amplitude ändernde sinusförmige Kraft aufgebracht und gemessen, während unten am zentralen Kern der sich ergebende Weg erfasst wird. Alternativ dazu kann auch der Weg geregelt werden. Die Anlage ist technisch so ausgelegt, dass die mittels der Servohydraulik erzeugte Kraft gesteuert wird. Das Steuersignal für die Servohydraulik ist so vorgegeben, dass der erreichte Weg- oder Kraftwert möglichst genau dem Sollsignal entspricht.

In beiden Versuchsanordnungen werden also wohl Weg und Kraft gemessen, eines der Signale aber je nach Regelart durch den Regelkreis verarbeitet. Auswertung und weitere Verarbeitung werden durch diesen Unterschied in der Regelung kaum berührt, die Diskussion kann also für die beiden Versuchsanordnungen gemeinsam erfolgen.

Der mögliche Kraftbereich der Anlage beträgt ± 10 kN, der Wegbereich ist abhängig vom eingebauten Geber und kann ± 10 mm nicht überschreiten. Für alle Prüfungen wurde ein Geber mit einem Bereich von ± 1 mm verwendet. Der Sollwert für die Regelung kann aus drei Anteilen zusammengesetzt werden:

- Einem statischen Anteil (Signal A), welcher von Hand eingestellt und durch den Computer zu- oder abgeschaltet werden kann. Da die Prüfungen mit symmetrischer Belastung durchgeführt wurden, diente dieser Wert nur zum groben Abgleich des Gewichtes des zentralen Metallkerns im Prüfeinbau.
- Einem dynamisch wechselnden Anteil (Signal B), wobei die Amplitude von Hand einstellbar ist, während die Frequenz der sinusförmigen Kurve vom Funktionsgenerator geliefert wurde. Der Funktionsgenerator wurde dabei vom Computer angesteuert, so dass automatisch zwischen verschiedenen Frequenzen umgeschaltet werden kann.

- Einem weiteren statischen Anteil (Signal C), der vom Computer aus definiert werden kann.

Mit diesen Einstellungen kann die Mischung von Filler mit Bitumen einer Schwingbelastung von gewählter Frequenz bei einer bestimmten Temperatur unterworfen werden. Während der Schwingbelastung wird sechsmal das viskoelastische Verhalten der Masse bestimmt. Dieser Vorgang, Belastung, Messung und Auswertung zusammen, wird im weiteren Kennwertbestimmung genannt, da Kennwerte für diese Temperatur und Frequenz das letztliche Resultat darstellen.

4. Prüfverfahren

Das gezielte Zusammenstellen von Kennwertbestimmungen bei definierter Temperatur und Frequenz und die Wahl von passenden Prüfbedingungen resultiert in Prüfplänen. Prüfpläne sind angelegt, um bestimmte Materialeigenschaften optimal zu erfassen. Die verwendeten Prüfpläne sollen hier umrissen und erläutert werden.

a) Prüfpläne zum Bestimmen mechanischer Kennwerte

Uebergeordnetes Ziel ist das Bestimmen der Kennwerte an möglichst ungestörtem Material. Dem untergeordnet ist das Suchen nach Prüfbedingungen, welche genaue Messungen mit geringer Streuung erlauben. Es nützt schliesslich wenig, genaue Messungen an so stark gestörtem Material durchzuführen, dass die Ergebnisse nicht mehr interpretiert werden können. In später folgenden Besprechungen der Resultate der Untersuchungen wird näher auf diese Problematik eingegangen.

Mittlere Temperatur

Die Prüfung wird kraftgeregelt mit kleinen Amplituden durchgeführt. Serien von Kennwertbestimmungen bei Frequenzen von 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 und 8 Hertz werden bei Temperaturen von 20, 15 und 10 °C durchgeführt. Die gewählten Kraftamplituden sind das Er-

gebnis eines Kompromisses zwischen der Anforderung an schonende Behandlung des Prüfkörpers und ausreichender Amplitude für genaues Messen. Hinweise für die geeignete Wahl ergeben sich entweder aus einer Bestimmung der Linearität oder aus der Erfahrung. Die Werte wurden im allgemeinen zwischen 200 und 500 N gewählt. Eine beobachtbare Abnahme der Modulwerte bei 20 °C und tiefen Frequenzen zeigt Belastungsempfindlichkeit an.

Tiefe Temperatur

Die Prüfung wird kraftgeregelt mit mittleren Werten für die Amplitude durchgeführt. Die Grösse der Amplitude wird entweder gemäss Erfahrung festgelegt oder kann aus der Prüfung bei mittlerer Temperatur berechnet werden. Sie wurde jeweils so gewählt, dass sie für die Temperatur von 10 °C etwa die gleiche Wegamplitude ergeben sollte, wie sie zuvor bei der Prüfung bei 20 °C auftrat. Meist musste zu diesem Zweck die Kraftamplitude um einen Faktor von ungefähr vier vergrössert werden und lag dann bei 1'000 bis 2'000 N. Die Modulwerte für hohe Frequenzen bei den Temperaturen von 0 bis -5 °C können im Vergleich zu den Werten der höheren Temperaturen fallen. Das ist ein deutlicher Hinweis für die Rissbildung.

Für die Filler D, F, G, H, M, N, O und T wurden diese beiden Prüfpläne zu einem zusammengefasst, wobei die Temperaturen von 15 bis -10 °C in Schritten von 5 °C variiert wurden.

Hohe Temperatur

Die Prüfung wird weggeregelt mit kleinen Wegamplituden durchgeführt. Die Frequenzen variieren dabei von 0.25 bis 16 Hertz, die Temperaturen von 20 bis 40 °C in Schritten von 5 °C. Die Wegamplitude ergibt sich aus der Prüfung bei mittlerer Temperatur. Die dort gemessene Wegamplitude bei der Frequenz von 0.25 Hertz und der Temperatur von 20 °C ergibt einen guten Richtwert.

**b) Prüfpläne für das Erfassen spezieller Eigenschaften,
Belastungsempfindlichkeit bei 20 °C**

Diese Belastungsempfindlichkeit kann mit kraftgeregelter Prüfung bei 20 °C bestimmt werden. Die Prüfung umfasst 9 Modulbestimmungen mit unterschiedlichen Kraftamplituden. Bei grossen Kraftamplituden kann dabei die Abnahme der Module als Kennwert für die Empfindlichkeit verwendet werden, die Erholung der Module bei kleinen Kraftamplituden kann ebenfalls beobachtet werden.

Belastungsempfindlichkeit bei 40 °C

Die Bestimmung dieses Kennwertes erfolgt mit weggeregelter Prüfung bei 40 °C und 1 Hertz. Der Prüfplan unterscheidet sich nicht von der Prüfung bei 20 °C, es werden einfach die Weg- und nicht die Kraftamplituden variiert.

Modulmaximum bei tiefen Temperaturen

Infolge Rissbildung können Module bei tiefen Temperaturen abnehmen. Zur Untersuchung dieses Effektes dient ein spezieller Prüfplan. Es werden eine Starttemperatur, ein Temperaturschritt und die Anzahl zu prüfender Temperaturen bestimmt. Die Prüffrequenz wird immer auf 16 Hertz festgelegt. Diese hohe Frequenz garantiert, dass die Veränderung im Modul in erster Linie durch Rissbildung verursacht wird, die Modulzunahme durch Abkühlung ist in dieser Prüfung gering. Die Temperatur des maximalen Modulwertes ist dabei gerade die Temperatur deutlich einsetzender Rissbildung. Die Prüfung kann mit fallender und steigender Temperaturfolge durchgeführt werden. Damit kann das Heilungsvermögen der Rissbildung untersucht werden.

5. Auswerteverfahren

Der Einsatz von EDV-Mitteln erlaubt eine automatische Auswertung. Beispiele dafür sind in den auszugsweise dargestellten Tabellen auf den folgenden Seiten zu sehen.

Die auf den Seiten 103, 104 gezeigte Tabelle betrifft eine Prüfung an einer Mischung mit 65% Filler C bei mittleren und tiefen Temperaturen. Die kraftgeregelt durchgeführte Prüfung ist durch einen grossen Sollwert für die Amplitude der Kraft von 1'500 resp. 3'000 N gekennzeichnet. Bei der Temperatur von 20 °C zeigt sich ein deutlicher Einfluss des Prüfvorganges auf den ermittelten Modul, der bei einer Frequenz von 0.124 s⁻¹ von 0.784 auf 0.695 N/mm² abnimmt.

Die Tabelle auf Seite 105 zeigt Resultate der Prüfung an der Mischung mit 70% Filler C. Die Vorgabe für die Kraftamplitude ist nun mit 400 N erheblich kleiner, die Abnahme des Modulwertes von 2.13 auf 2.06 N/mm² viel geringer. Auffallend ist die Zunahme des Moduls um den Faktor 2.7 im Vergleich zur Mischung mit 65% des gleichen Fillers.

Als drittes Beispiel wird auf Seite 106 eine weggeregelte Prüfung gezeigt. Wegregelung ist bei höheren Temperaturen erforderlich, weil die Mittellage des zentralen Metallkerns nicht mehr eingehalten werden kann. Die Wegamplitude wurde im Beispiel auf 0.2 mm geregelt, die Zunahme der Kraftamplitude mit steigender Frequenz ist schön ersichtlich.

Das letzte Beispiel zeigt in den Tabellen auf den Seiten 107 bis 109 die Abhängigkeit des Moduls von der Temperatur im tiefen Temperaturbereich. Gezeigt wird das Verhalten einer Mischung mit 70% Filler E.

28. April 1987 11:45:34

AUSWERTUNG VON: B65CT

VERSUCHSNUMMER:

DOSSIERNUMMER: 48500.0

PRUEFKOERPERNUMMER: 1

MESSBEREICHE:

F= 10.000 X= 1.000

BINDEMittel: BDM/FI

ANGABEN: 65% C

INNERER RADIUS 50.0

AEUSSERER RADIUS 60.0

HOEHE 107

KRAFTREGELUNG

TEMPERATUREINSTELLUNG: 20 GRAD

FREQUENZZEINSTELLUNG: 0.124 S-1

FREQUENZMESSUNG: 0.124 S-1

KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2] SPEICHER VERLUST	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
648.	0.147E+04	0.507	60.6	0.784	0.384 0.683	0.173E+07	1.78	2.35	1.07 2.57	1.09 2.51	20.43
659.	0.147E+04	0.517	65.2	0.769	0.323 0.698	0.170E+07	2.16	2.31	1.03 1.00	1.02 1.02	20.50
670.	0.146E+04	0.533	64.5	0.743	0.320 0.671	0.164E+07	2.10	2.23	1.00 0.98	0.96 1.01	20.50
681.	0.146E+04	0.555	64.9	0.715	0.304 0.648	0.158E+07	2.13	2.15	1.00 0.98	1.04 1.00	20.65
694.	0.146E+04	0.563	65.6	0.705	0.292 0.641	0.155E+07	2.20	2.11	1.04 1.00	0.96 1.03	20.65
704.	0.147E+04	0.572	65.1	0.695	0.293 0.630	0.153E+07	2.15	2.08	1.05 0.96	1.01 1.00	20.50
648.	0.146E+04	0.507	62.6	0.784	0.360 0.696	0.173E+07	4.75	2.35	0.12 0.15	5.20 1.83	20.47

FREQUENZZEINSTELLUNG: 0.252 S-1

FREQUENZMESSUNG: 0.249 S-1

KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2] SPEICHER VERLUST	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
810.	0.146E+04	0.346	63.5	1.14	0.510 1.02	0.126E+07	2.01	3.43	0.80 0.96	0.87 0.94	20.50
817.	0.145E+04	0.338	62.9	1.17	0.531 1.04	0.129E+07	1.96	3.50	0.83 0.97	0.98 1.01	20.43
823.	0.146E+04	0.355	63.7	1.12	0.493 1.00	0.123E+07	2.03	3.35	0.89 1.01	0.84 1.01	20.50
829.	0.146E+04	0.355	63.7	1.12	0.494 1.00	0.123E+07	2.03	3.35	0.93 0.93	0.98 1.00	20.50
835.	0.146E+04	0.364	63.7	1.09	0.481 0.974	0.120E+07	2.03	3.26	0.89 0.97	1.06 1.01	20.50
843.	0.146E+04	0.368	64.2	1.08	0.470 0.970	0.119E+07	2.07	3.23	1.10 1.17	0.97 1.19	20.50
810.	0.146E+04	0.341	63.2	1.16	0.522 1.04	0.128E+07	2.88	3.48	0.25 0.23	3.33 0.41	20.47

TEMPERATUREINSTELLUNG: 5 GRAD
 FREQUENZEINSTELLUNG: 0.124 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 0.124 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN		PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2]		VERLUST	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]		SYMMETRIE		REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
	KRAFT [N]	WEG [mm]			SPEICHER	VERLUST				KRAFT	WEG	KRAFT	WEG		
11790.	0.294E+04	0.598E-01	39.7	13.5	10.4	8.60	0.297E+08	0.830	40.4	0.96	2.33	1.00	2.05	5.35	
11801.	0.294E+04	0.572E-01	41.6	14.1	10.5	9.35	0.310E+08	0.889	42.2	1.02	1.05	1.05	0.96	5.43	
11812.	0.294E+04	0.579E-01	41.2	13.9	10.4	9.15	0.306E+08	0.875	41.7	0.99	1.05	0.97	0.95	5.50	
11823.	0.295E+04	0.586E-01	41.6	13.8	10.3	9.14	0.303E+08	0.888	41.3	1.02	1.10	1.03	0.98	5.35	
11836.	0.294E+04	0.586E-01	41.7	13.7	10.3	9.13	0.303E+08	0.890	41.2	1.01	1.05	1.00	0.94	5.43	
11846.	0.295E+04	0.591E-01	41.8	13.7	10.2	9.11	0.302E+08	0.893	41.0	0.96	1.10	0.93	0.97	5.35	
11790.	0.294E+04	0.584E-01	40.5	13.8	10.5	8.94	0.304E+08	1.34	41.3	0.12	0.21	1.56	0.80	5.41	

FREQUENZEINSTELLUNG: 0.252 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 0.249 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN		PHASE	KOMPLEXER	MODULE [N/mm ²]		VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm ²]	SYMMETRIE		REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]	
	KRAFT [N]	WEG [mm]	[GB]		SPEICHER	VERLUST				KRAFT	WEG			
11952.	0.293E+04	0.436E-01	38.4	18.4	14.4	11.4	0.203E+08	0.791	55.1	0.88	1.00	0.93	0.92	5.35
11959.	0.294E+04	0.422E-01	36.7	19.1	15.3	11.4	0.210E+08	0.744	57.2	0.99	1.00	0.99	1.01	5.43
11965.	0.294E+04	0.429E-01	37.3	18.7	14.9	11.4	0.207E+08	0.762	56.2	1.00	1.07	1.02	0.93	5.43
11971.	0.294E+04	0.428E-01	37.2	18.8	15.0	11.4	0.207E+08	0.760	56.4	1.03	1.07	0.97	0.88	5.35
11977.	0.294E+04	0.431E-01	37.4	18.7	14.8	11.4	0.206E+08	0.766	56.0	1.02	1.06	0.96	0.99	5.35
11965.	0.293E+04	0.431E-01	37.5	18.6	14.8	11.3	0.205E+08	0.768	55.8	1.12	1.07	1.02	0.93	5.43
11952.	0.293E+04	0.429E-01	37.6	18.7	14.8	11.4	0.206E+08	1.10	56.1	0.25	0.19	1.04	0.55	5.38

FREQUENZEINSTELLUNG: 0.506 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 0.500 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN		PHASE [GC]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2]		VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE		REL. AMPL.		TEMP [GC]
	KRAFT [N]	WEG [mm]			SPEICHER	VERLUST				KRAFT	WEG	KRAFT	WEG	
12075.	0.295E+04	0.316E-01	32.8	25.5	21.5	13.8	0.140E+08	0.644	76.6	0.88	1.09	0.94	0.95	5.28
12079.	0.294E+04	0.326E-01	31.9	24.7	21.0	13.1	0.136E+08	0.623	74.2	1.17	1.20	1.12	0.92	5.35
12082.	0.295E+04	0.322E-01	32.1	25.0	21.2	13.3	0.137E+08	0.628	75.0	0.93	1.20	0.98	0.93	5.43
12086.	0.295E+04	0.324E-01	32.6	24.9	21.0	13.4	0.136E+08	0.640	74.7	0.90	1.00	0.95	0.85	5.50
12091.	0.295E+04	0.325E-01	32.0	24.8	21.0	13.1	0.136E+08	0.625	74.4	0.92	0.92	0.92	0.84	5.28
12094.	0.295E+04	0.325E-01	32.4	24.8	20.9	13.3	0.136E+08	0.635	74.4	0.93	1.00	0.98	0.85	5.35
12075.	0.295E+04	0.320E-01	32.4	25.2	21.3	13.5	0.138E+08	1.12	75.7	0.50	0.07	1.18	0.35	5.35

28. April 1987 12:35:25

AUSWERTUNG VON: B70CT

VERSUCHSNUMMER:

DOSSIERNUMMER: 48500.0

PRUEFKORPERNUMMER: 1

MESSBEREICHE:

F= 1.000 X= 0.100

BINDEMITTEL: B80/100+F

ANGABEN: 70% C

INNERER RADIUS 50.0

AEUSSERER RADIUS 60.0

HOEHE 201

KRAFTREGELUNG

TEMPERATUREINSTELLUNG: 20 GRAD

FREQUENZEINSTELLUNG: 0.124 S-1

FREQUENZMESSUNG: 0.124 S-1

KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	KRAFT [N]	AMPLITUDEN WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2]	VERLUST	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
348.	392.	0.266E-01	52.9	2.13	1.28	1.70	0.469E+07	1.32	6.38	0.95	1.74	1.77
359.	389.	0.262E-01	54.7	2.14	1.24	1.75	0.472E+07	1.41	6.42	1.57	1.05	1.07
370.	389.	0.269E-01	55.2	2.09	1.19	1.72	0.461E+07	1.44	6.27	1.27	1.01	0.94
381.	387.	0.268E-01	55.9	2.08	1.17	1.73	0.459E+07	1.48	6.25	0.92	0.93	20.13
394.	384.	0.272E-01	56.1	2.04	1.14	1.69	0.450E+07	1.49	6.12	0.99	0.96	20.05
404.	389.	0.272E-01	55.9	2.06	1.16	1.71	0.455E+07	1.47	6.19	0.95	1.06	0.91
348.	391.	0.264E-01	53.7	2.14	1.26	1.72	0.471E+07	1.67	6.41	0.12	0.62	1.19

FREQUENZEINSTELLUNG: 0.252 S-1

FREQUENZMESSUNG: 0.249 S-1

KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	KRAFT [N]	AMPLITUDEN WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2]	VERLUST	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
466.	387.	0.181E-01	54.4	3.09	1.80	2.51	0.340E+07	1.40	9.27	1.15	0.99	0.91
473.	387.	0.177E-01	54.1	3.16	1.85	2.56	0.348E+07	1.38	9.47	1.16	1.05	0.96
479.	386.	0.177E-01	54.0	3.15	1.85	2.55	0.348E+07	1.38	9.46	1.94	1.06	0.99
485.	389.	0.180E-01	54.3	3.12	1.82	2.53	0.344E+07	1.39	9.37	1.50	0.89	0.89
491.	386.	0.178E-01	54.2	3.13	1.83	2.54	0.345E+07	1.39	9.39	1.72	1.04	1.03
499.	389.	0.178E-01	54.2	3.15	1.84	2.55	0.347E+07	1.39	9.44	0.99	1.09	1.02
466.	387.	0.179E-01	54.2	3.12	1.82	2.53	0.344E+07	0.739	9.36	0.25	0.37	0.91

FREQUENZ-EINSTELLUNG: 1.999 S-1
 FREQUENZ-MESSUNG: 1.959 S-1
 PRUEFKOEPPERNUMMER: 1

VERSUCHSNUMMER:
 DOSSIERNUMMER: 48500.0
 KORREKTUR REIBUNG: 26.0
 BINDEMittel: BDM/FI
 ANGABEN: 50% C
 INNERER RADIUS 50.0
 AUSSERER RADIUS 60.0
 HOEHE 101

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER	VERLUST [N/mm ²]	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm ²]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
3364.	0.104E+04	0.199	-58.6	1.49	0.776	1.27	0.208E+06	1.64	4.46	0.98	1.18	0.96
3367.	0.101E+04	0.199	-58.7	1.46	0.760	1.25	0.205E+06	1.64	4.39	1.10	1.06	1.01
3369.	0.100E+04	0.199	-58.7	1.44	0.750	1.23	0.202E+06	1.65	4.33	1.30	1.30	1.00
3371.	995.	0.199	-59.3	1.44	0.732	1.23	0.201E+06	1.69	4.31	1.26	1.21	0.94
3373.	992.	0.199	-59.1	1.43	0.734	1.23	0.200E+06	1.67	4.28	0.78	1.16	1.01
3375.	982.	0.199	-59.1	1.41	0.725	1.21	0.198E+06	1.67	4.24	0.79	1.25	1.03
3364.	0.103E+04	0.199	-58.6	1.48	0.774	1.27	0.208E+06	1.64	4.45	1.96		

FREQUENZ-EINSTELLUNG: 3.997 S-1
 FREQUENZ-MESSUNG: 3.941 S-1
 PRUEFKOEPPERNUMMER: 1

VERSUCHSNUMMER:
 DOSSIERNUMMER: 48500.0
 KORREKTUR REIBUNG: 26.0
 BINDEMittel: BDM/FI
 ANGABEN: 50% C
 INNERER RADIUS 50.0
 AUSSERER RADIUS 60.0
 HOEHE 101

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER	VERLUST [N/mm ²]	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm ²]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
3442.	0.163E+04	0.205	-57.5	2.27	1.22	1.92	0.158E+06	1.57	6.82	1.03	0.97	0.96
3444.	0.160E+04	0.205	-57.6	2.24	1.20	1.89	0.156E+06	1.58	6.72	1.08	1.23	0.93
3445.	0.158E+04	0.204	-57.8	2.22	1.18	1.88	0.154E+06	1.59	6.66	1.00	1.15	0.95
3446.	0.157E+04	0.205	-58.0	2.20	1.16	1.87	0.153E+06	1.60	6.60	1.32	1.26	0.97
3447.	0.156E+04	0.205	-58.1	2.18	1.15	1.85	0.151E+06	1.61	6.53	1.09	1.14	1.00
3449.	0.154E+04	0.205	-58.2	2.15	1.13	1.83	0.150E+06	1.61	6.45	0.94	1.04	0.93
3442.	0.162E+04	0.205	-57.5	2.27	1.22	1.92	0.158E+06	1.57	6.82	3.94		

28. April 1987 12:26:40

AUSWERTUNG VON: MOMAX

VERSUCHSNUMMER:
 DOSSIERNUMMER: 48500.0
 PRUEFKOERPERNUMMER: 0
 MESSBEREICHE:
 F= 10.000 X= 0.100
 BINDEMittel: B80/100+F
 ANGABEN: 70%E
 INNERER RADIUS 50.0
 AUSSERER RADIUS 60.0
 HOEHE 197
 KRAFTREGELUNG
 TEMPERATUREINSTELLUNG: 6 GRAD
 FREQUENZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.732 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN		PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE [N/mm2]		VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE		REL. AMPL.		TEMP [GC]
	KRAFT [N]	WEG [mm]			SPEICHER	VERLUST				KRAFT	WEG	KRAFT	WEG	
2020.	0.184E+04	0.656E-02	5.75	41.7	41.5	4.18	0.727E+06	0.101	125.	0.99	0.96	1.00	0.99	6.25
2022.	0.184E+04	0.659E-02	5.53	41.5	41.3	4.00	0.723E+06	0.968E-01	124.	0.93	0.85	0.95	0.87	6.40
2023.	0.183E+04	0.659E-02	5.42	41.2	41.0	3.89	0.718E+06	0.948E-01	124.	1.10	0.96	1.05	0.99	6.48
2024.	0.182E+04	0.653E-02	5.90	41.3	41.1	4.24	0.720E+06	0.103	124.	1.01	0.92	0.99	0.92	6.55
2025.	0.183E+04	0.655E-02	6.20	41.6	41.3	4.49	0.725E+06	0.109	125.	0.85	0.86	0.91	0.95	6.55
2027.	0.183E+04	0.657E-02	5.45	41.4	41.2	3.93	0.721E+06	0.953E-01	124.	0.91	1.00	0.94	1.03	6.63
2020.	0.184E+04	0.658E-02	5.69	41.5	41.3	4.11	0.724E+06	0.397	125.	15.73	0.52	0.40	0.30	6.29

TEMPERATUREINSTELLUNG: 4 GRAD
 FREQUENZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.729 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN		PHASE [GB]	MODULE [N/mm2]		VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE		REL. AMPL.		TEMP [GC]
	KRAFT [N]	WEG [mm]		SPEICHER	VERLUST				KRAFT	WEG	KRAFT	WEG	
3265.	0.184E+04	0.641E-02	4.93	42.8	3.67	0.745E+06	0.863E-01	128.	1.06	1.00	0.99	0.94	4.53
3267.	0.184E+04	0.636E-02	4.44	42.9	3.32	0.749E+06	0.776E-01	129.	0.94	0.92	0.98	0.94	4.45
3268.	0.183E+04	0.642E-02	4.27	42.5	3.16	0.741E+06	0.746E-01	127.	0.96	0.92	1.01	0.90	4.38
3269.	0.182E+04	0.642E-02	4.65	42.0	3.42	0.735E+06	0.813E-01	126.	0.97	0.96	0.98	0.94	4.30
3270.	0.184E+04	0.645E-02	5.09	42.4	3.76	0.739E+06	0.890E-01	127.	0.96	1.00	0.97	1.01	4.45
3272.	0.184E+04	0.640E-02	4.33	42.6	3.22	0.744E+06	0.757E-01	128.	0.97	1.08	0.98	1.06	4.60
3265.	0.184E+04	0.640E-02	4.73	42.7	3.52	0.745E+06	0.589	128.	15.73	0.44	0.48	0.33	4.42

TEMPERATUREINSTELLUNG: 2 GRAD
 FREQUENZZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.728 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER VERLUST [N/mm2]	VISKOSITAET [Pa*s]	TAN PHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
4510.	0.183E+04	0.633E-02	3.14	43.1	43.0	2.36	0.751E+06	129.	1.04	1.02	1.07
4512.	0.183E+04	0.630E-02	3.92	43.1	43.0	2.95	0.752E+06	129.	0.91	1.00	1.03
4513.	0.183E+04	0.627E-02	4.07	43.5	43.4	3.09	0.758E+06	131.	0.95	1.04	1.04
4514.	0.183E+04	0.623E-02	3.45	43.6	43.6	2.62	0.761E+06	131.	0.96	0.99	1.04
4515.	0.184E+04	0.630E-02	3.26	43.5	43.4	2.47	0.758E+06	130.	0.96	1.04	0.99
4517.	0.183E+04	0.630E-02	4.01	43.2	43.1	3.02	0.753E+06	129.	1.09	0.88	1.04
4510.	0.183E+04	0.631E-02	3.43	43.2	43.1	2.59	0.754E+06	130.	15.73	0.30	0.41

TEMPERATUREINSTELLUNG: 0 GRAD
 FREQUENZZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.732 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER VERLUST [N/mm2]	VISKOSITAET [Pa*s]	TAN PHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
5755.	0.183E+04	0.617E-02	3.22	44.3	44.2	2.49	0.772E+06	133.	1.09	0.81	1.01
5757.	0.183E+04	0.613E-02	2.62	44.4	44.4	2.03	0.774E+06	133.	0.99	0.96	1.00
5758.	0.184E+04	0.624E-02	2.31	44.1	44.0	1.78	0.768E+06	132.	0.91	1.04	0.98
5759.	0.182E+04	0.622E-02	2.94	43.6	43.5	2.23	0.760E+06	131.	0.90	0.92	0.96
5760.	0.183E+04	0.621E-02	3.31	43.9	43.9	2.53	0.766E+06	132.	0.95	1.13	1.01
5762.	0.182E+04	0.615E-02	2.44	44.1	44.1	1.88	0.770E+06	132.	0.95	1.08	1.00
5755.	0.184E+04	0.618E-02	2.97	44.2	44.2	2.29	0.771E+06	133.	15.73	0.47	0.66

TEMPERATUREINSTELLUNG: -2 GRAD
 FREQUENZZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.732 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER VERLUST [N/mm2]	VISKOSITAET [Pa*s]	TAN PHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
7000.	0.183E+04	0.616E-02	1.90	44.4	44.4	1.48	0.774E+06	133.	1.01	1.00	0.93
7002.	0.184E+04	0.621E-02	2.25	44.2	44.2	1.74	0.771E+06	133.	0.97	0.92	0.89
7003.	0.183E+04	0.615E-02	2.59	44.4	44.3	2.00	0.774E+06	133.	0.91	1.00	0.93
7004.	0.183E+04	0.609E-02	2.44	44.8	44.8	1.91	0.782E+06	135.	0.97	0.96	1.01
7005.	0.183E+04	0.614E-02	1.86	44.6	44.5	1.45	0.777E+06	134.	1.03	0.89	1.02
7007.	0.183E+04	0.616E-02	2.76	44.3	44.3	2.13	0.773E+06	133.	0.93	0.87	0.85
7000.	0.183E+04	0.617E-02	2.02	44.4	44.4	1.57	0.774E+06	133.	15.73	0.22	0.58

TEMPERATUREINSTELLUNG: -4 GRAD
 FREQUENZZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.732 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER [N/mm2]	VERLUST [Pa*s]	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
8245.	0.183E+04	0.616E-02	1.88	44.4	44.4	1.46	0.774E+06	0.328E-01	133.	0.93	0.94	0.97
8247.	0.183E+04	0.615E-02	2.18	44.6	44.6	1.70	0.777E+06	0.381E-01	134.	1.07	0.96	0.94
8248.	0.184E+04	0.610E-02	1.68	45.0	45.0	1.32	0.785E+06	0.293E-01	135.	0.96	0.98	0.98
8249.	0.184E+04	0.613E-02	1.56	44.8	44.8	1.22	0.781E+06	0.272E-01	134.	0.99	1.04	1.02
8250.	0.184E+04	0.615E-02	2.08	44.5	44.5	1.62	0.777E+06	0.363E-01	134.	1.01	0.99	1.10
8252.	0.184E+04	0.611E-02	1.70	45.0	45.0	1.34	0.785E+06	0.297E-01	135.	0.92	0.96	0.98
8245.	0.183E+04	0.615E-02	1.95	44.5	44.5	1.51	0.776E+06	0.512	134.	15.73	0.21	0.39

TEMPERATUREINSTELLUNG: -6 GRAD
 FREQUENZZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.732 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER [N/mm2]	VERLUST [Pa*s]	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
9490.	0.183E+04	0.615E-02	1.22	44.4	44.4	0.949	0.774E+06	0.214E-01	133.	1.01	0.96	1.03
9492.	0.184E+04	0.615E-02	1.88	44.6	44.6	1.47	0.778E+06	0.329E-01	134.	1.00	0.99	0.93
9493.	0.184E+04	0.610E-02	1.49	45.1	45.1	1.17	0.786E+06	0.261E-01	135.	0.91	0.94	0.94
9494.	0.184E+04	0.610E-02	1.21	45.0	45.0	0.951	0.785E+06	0.211E-01	135.	0.94	0.99	0.94
9495.	0.183E+04	0.613E-02	1.46	44.7	44.7	1.14	0.780E+06	0.255E-01	134.	1.03	1.41	1.00
9497.	0.183E+04	0.605E-02	1.37	45.2	45.2	1.08	0.788E+06	0.239E-01	136.	0.94	1.00	0.93
9490.	0.183E+04	0.616E-02	1.47	44.5	44.5	1.14	0.776E+06	0.595	134.	15.73	0.27	0.63

TEMPERATUREINSTELLUNG: -8 GRAD
 FREQUENZZEINSTELLUNG: 16.057 S-1
 FREQUENZMESSUNG: 15.734 S-1
 KORREKTUR REIBUNG: 10.0

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	WEG [mm]	PHASE [GB]	KOMPLEXER	MODULE SPEICHER [N/mm2]	VERLUST [Pa*s]	VISKOSITAET [Pa*s]	TANPHI	E-MODUL [N/mm2]	SYMMETRIE KRAFT WEG	REL. AMPL. KRAFT WEG	TEMP [GC]
10735.	0.184E+04	0.617E-02	1.15	44.6	44.6	0.892	0.777E+06	0.200E-01	134.	0.99	1.00	0.98
10737.	0.185E+04	0.618E-02	1.06	44.7	44.7	0.829	0.779E+06	0.186E-01	134.	1.04	0.96	1.00
10738.	0.184E+04	0.609E-02	1.23	45.1	45.1	0.966	0.787E+06	0.214E-01	135.	0.95	1.00	0.98
10739.	0.184E+04	0.621E-02	1.46	44.4	44.4	1.13	0.773E+06	0.255E-01	133.	0.94	0.96	1.01
10740.	0.184E+04	0.614E-02	1.30	44.8	44.8	1.02	0.781E+06	0.227E-01	134.	0.97	1.20	1.03
10742.	0.183E+04	0.609E-02	1.00	45.1	45.1	0.790	0.787E+06	0.175E-01	135.	1.03	1.00	0.99
10735.	0.184E+04	0.618E-02	1.20	44.6	44.6	0.936	0.777E+06	0.633	134.	15.73	0.19	0.82

Beschreibung der in den Tabellen präsentierten Resultate

Tabellenkopf

Jede Tabelle beginnt mit einem für den ganzen Prüfplan geltenden Tabellenkopf, der neben Angaben zum geprüften Material auch solche maschinentechnischer Art umfasst wie Messbereiche.

Jede Bestimmung eines Moduls für ein Paar von Temperatur und Frequenz beginnt zudem mit einem eigenen Tabellenkopf, der Angaben zu Temperatur- und Frequenzeinstellung sowie Kolonnenüberschriften enthält.

Die Messwerttabellen enthalten dann die folgenden Spalten:

Zeit

Beginn der jeweiligen Schwingungsmessung in Sekunden ab Versuchstart.

Kraft

Amplitude der Kraft in N. Während der Dauer einer Schwingung werden in zeitgleichen Abständen 32 Kraftmessungen vorgenommen und daraus die Koeffizienten für den Cosinus- und Sinusanteil der Kurve ermittelt. Die Amplitude wird aus diesen beiden Koeffizienten nach der bekannten, folgenden Formel berechnet:

$$A = \sqrt{k_{\cos}^2 + k_{\sin}^2}$$

Weg

Amplitude des Weges in mm, die Bestimmung erfolgt völlig analog zur Bestimmung der Kraftamplitude.

Phase

Aus den Sinus- und Cosinusanteilen der Grundtöne für Kraft und Weg wird die Phasenverschiebung ermittelt. Sie ist in normalen Winkelgraden tabelliert.

Komplexer Modul

Der komplexe Modul in N/mm^2 ergibt sich aus dem Verhältnis der Amplituden von Weg und Kraft unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse. Dieses vereinfachte Berechnungsverfahren (vereinfacht im Vergleich zur Verwendung von Finite-Element-Konstanten) ist angesichts eines Radienverhältnisses von 50/60 eine gute Approximation.

Speichermodul

Elastischer Anteil des komplexen Moduls.

Verlustmodul

Viskoser Anteil.

Viskosität

Sogenannte Schwingungsviskosität, berechnet aus dem komplexen Modul G^* nach der Formel:

$$G^* / 2\pi / \text{Frequenz}$$

Tanphi

Tangens der Phase.

E-Modul

Elastizitätsmodul, der zum komplexen Modul gehörende, dreidimensionale Modul der Elastizitätslehre.

Symmetrie Kraft

Neben den Koeffizienten für Cosinus- und Sinusanteil werden jeweils auch die Differenzen der Messwerte bei beiden Nulldurchgängen ermittelt. Bei einem Raster von 32 Messpunkten während der Sinusschwingung sind diese Werte gute Näherungen für die Ableitung bei den Nulldurchgängen. Da nun die Ableitung einer Sinuskurve wiederum einen Sinus ergibt, muss die so bestimmte maximale Ableitung, richtige Normierung vorausgesetzt, gleich der Amplitude

sein. Je nach Nulldurchgang weist der Wert dabei einmal ein positives und einmal ein negatives Vorzeichen auf. Der Vergleich der beiden Steigungen sollte somit betragsmässig 1 ergeben und wird als Kontrollgrösse Symmetrie Kraft ausgedruckt.

Symmetrie Weg

Die gleiche Berechnung für den Weg durchgeführt, liefert auch hier eine nützliche Kontrollgrösse.

Relative Amplitude Kraft

Wie schon oben beschrieben, lässt sich aus den Steigungen beim Nulldurchgang ebenfalls die Amplitude einer sinusförmigen Kurve berechnen. Verglichen mit der aus der Grundtonauswertung bestimmten Amplitude, ergibt sich der Kontrollwert 1, der ebenfalls der Bewertung der Kurve dient.

Modulwerte pro Temperatur und Frequenz

Pro Temperatur und Frequenz werden wiederholt eine Messung und die entsprechende Auswertung durchgeführt. Die Amplituden von Kraft und Weg, die Phase und die Temperatur können dabei einen Gang aufweisen und nicht nur um den Mittelwert schwanken. Am meisten interessiert aber der Wert am ungestörten Material, also zu Beginn der Schwingung. Von den vier genannten Grössen wird deshalb je eine lineare Regression durchgeführt und so Amplituden, Phase und Temperatur bei Beginn der Schwingungsbelastung errechnet. Alle anderen Werte lassen sich aus den Resultaten dieser statistischen Auswertung ermitteln, und es können so die Eigenschaften des ungestörten Materials bestimmt werden. Die entsprechenden Werte sind in einer separaten Zeile unter dem Block mit den sechs Messzeilen angeordnet. Diese Modulwerte können als repräsentativ für die jeweiligen Prüfbedingungen betrachtet werden, es wird im weiteren nur noch auf sie abgestützt.

Streuung des komplexen Moduls

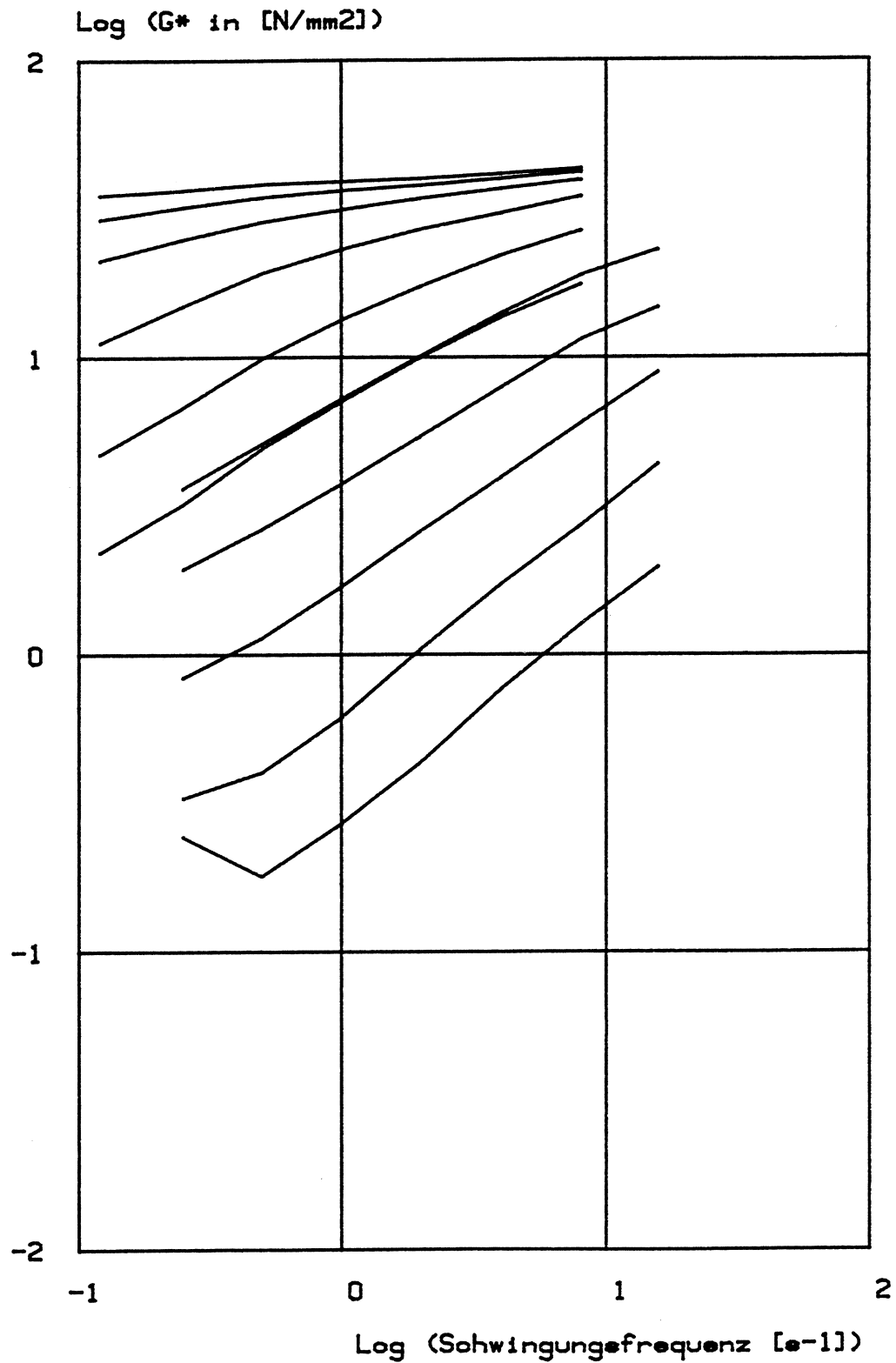
Ein grobes Mass für die Verlässlichkeit von Werten ist ihre Streuung. In der zusammenfassenden Zeile ist anstelle des regressierten Tangens der Phase ($\tan\phi$) die Streuung des komplexen Moduls in Prozent eingetragen. Die relativ hohen Werte für die Mischung mit 65% Filler C bei niedrigen Frequenzen resultieren aus der Modulabnahme als Folge des Einflusses der Belastung.

6. Bestimmen der Module in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur

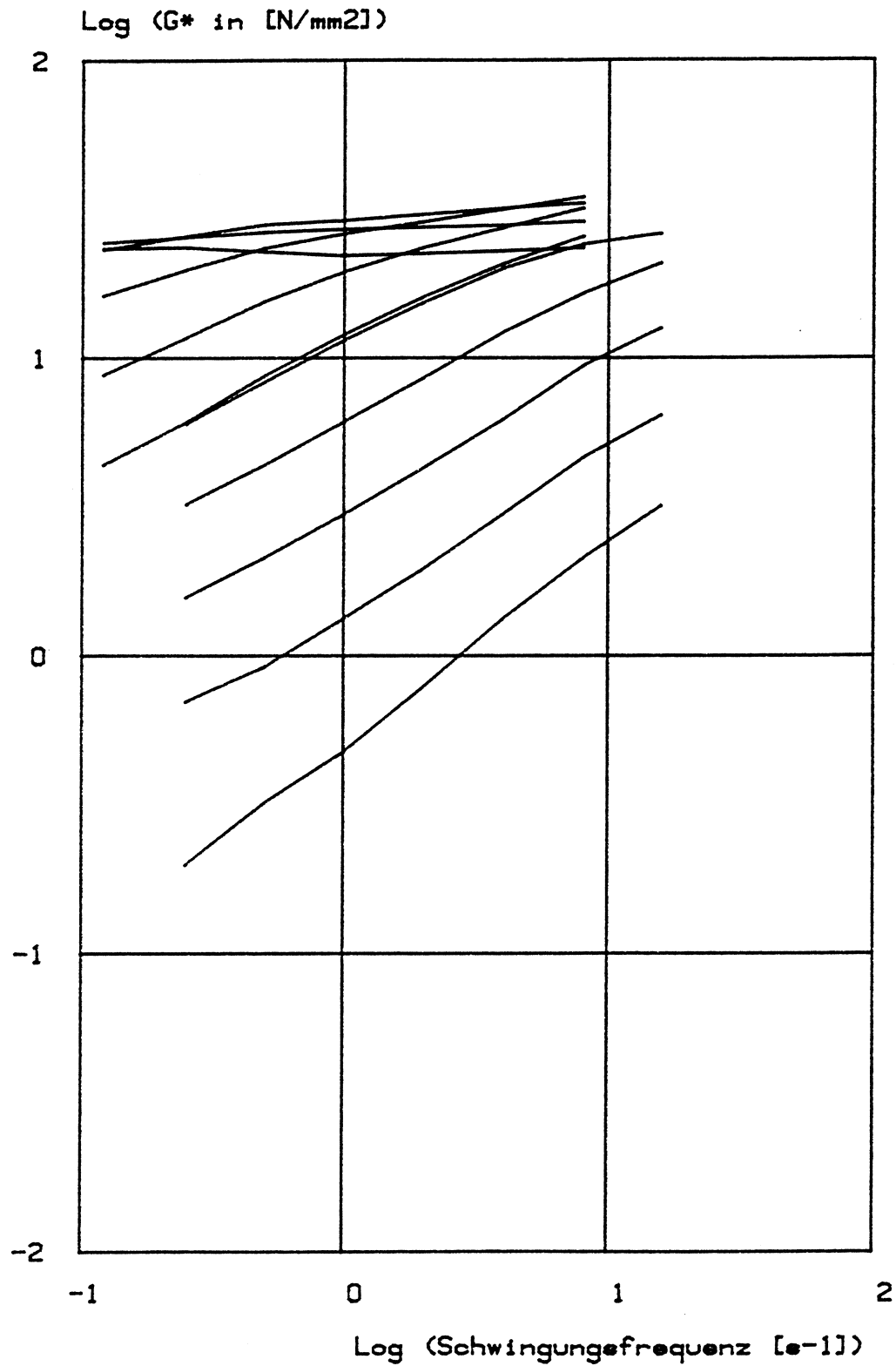
Mit den erarbeiteten Prüfplänen konnten nun an Mischungen die Module in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz bestimmt werden, ohne dass dabei das geprüfte Material durch übermässige Beanspruchung wesentlich verändert wurde. Auch zeigen die kleinen Streuungen, dass gravierende Messfehler vermieden werden konnten. Die Inspektion der Werte und das Prüfen der Kurvenform der dynamischen Signale erlauben nötigenfalls das Ausschliessen zu ungenauer oder fehlerhafter Messungen. Die Diagramme auf den folgenden Seiten zeigen zwei Beispiele graphisch dargestellter komplexer Module.

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Beispielen zu erkennen. Im zweiten Beispiel verlaufen die Kurven für die tiefsten Temperaturen zum Teil unter jenen für die höheren. Das ist der bereits erwähnte Fall für anomales Temperaturverhalten. Dieses Verhalten gab Anlass zu speziellen Untersuchungen, wie sie unter Punkt 7. vorgestellt werden sollen.

Komplexer Modul



Komplexer Modul



7. Prüfungen im tiefen Temperaturbereich

Aus einer Vielzahl von Untersuchungen ist bekannt, dass Bitumen mit fallender Temperatur immer härter, aber nie weicher wird. Die festgestellte Abnahme der Module mit fallender Temperatur konnte, nachdem Prüffehler ausgeschlossen worden waren, nur mit der Ausbildung von Rissen erklärt werden. Das praktische Interesse an Rissbildung ist unbestritten, der Vorgang verdiente es somit, näher untersucht zu werden. Abbildung 2 zeigt die Versuchsanordnung in bezug auf das Problem Rissbildung.

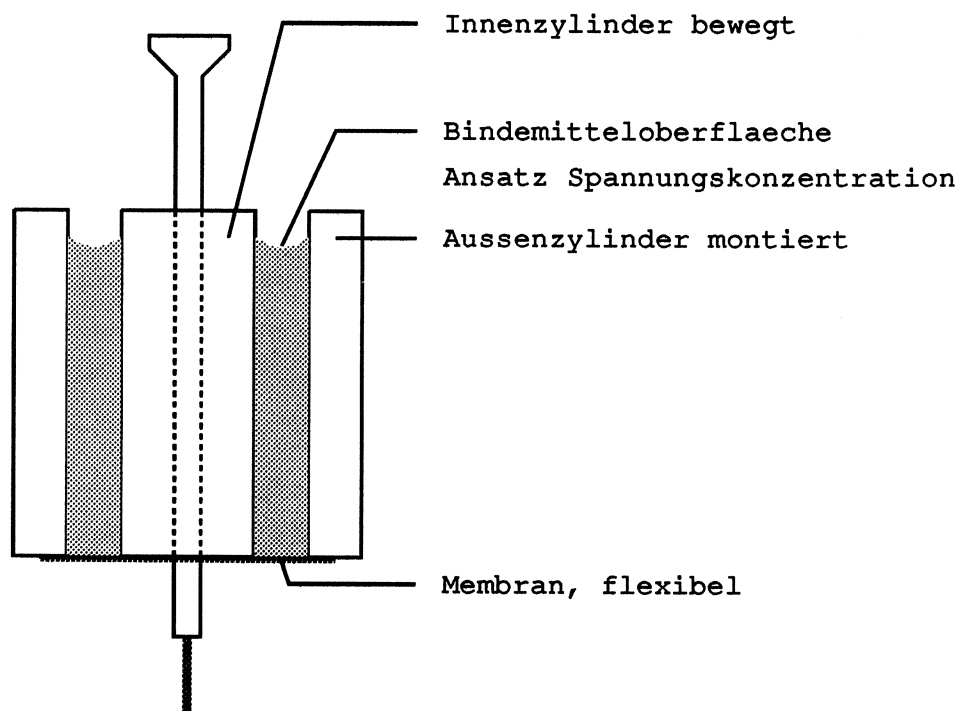


Abbildung 2: Ansatzpunkt der Spannungskonzentration

Alle Materialien ziehen sich beim Abkühlen zusammen, aber im Ausmass des Zusammenziehens bestehen deutliche Unterschiede. Bitumen zieht sich viel stärker zusammen als Metall, das gilt auch für Bitumen-Filler-Mischungen. Somit entsteht beim Abkühlen eine radiale Zugspannung, die umso grösser wird, je härter die Mischung ist und je weniger sie nachfliessen kann. Untersuchungen an reinem

Bitumen zeigten, dass bei tiefen Temperaturen schlagartig ein Riss auftritt, der sich durch den ganzen vom Bitumen gebildeten Hohlzylinder zieht. Als Folge davon schnellte die Wegamplitude schlagartig in die Höhe, die Wegkurve wird annähernd rechteckig und die Module ergeben unsinnige Werte.

Mischungen von Bitumen mit Fillern verhalten sich gänzlich anders. Die Wegamplituden wachsen nur geringfügig an und die Wegkurve bleibt sinusförmig. Der Mechanismus der Rissbildung muss somit deutlich anders sein.

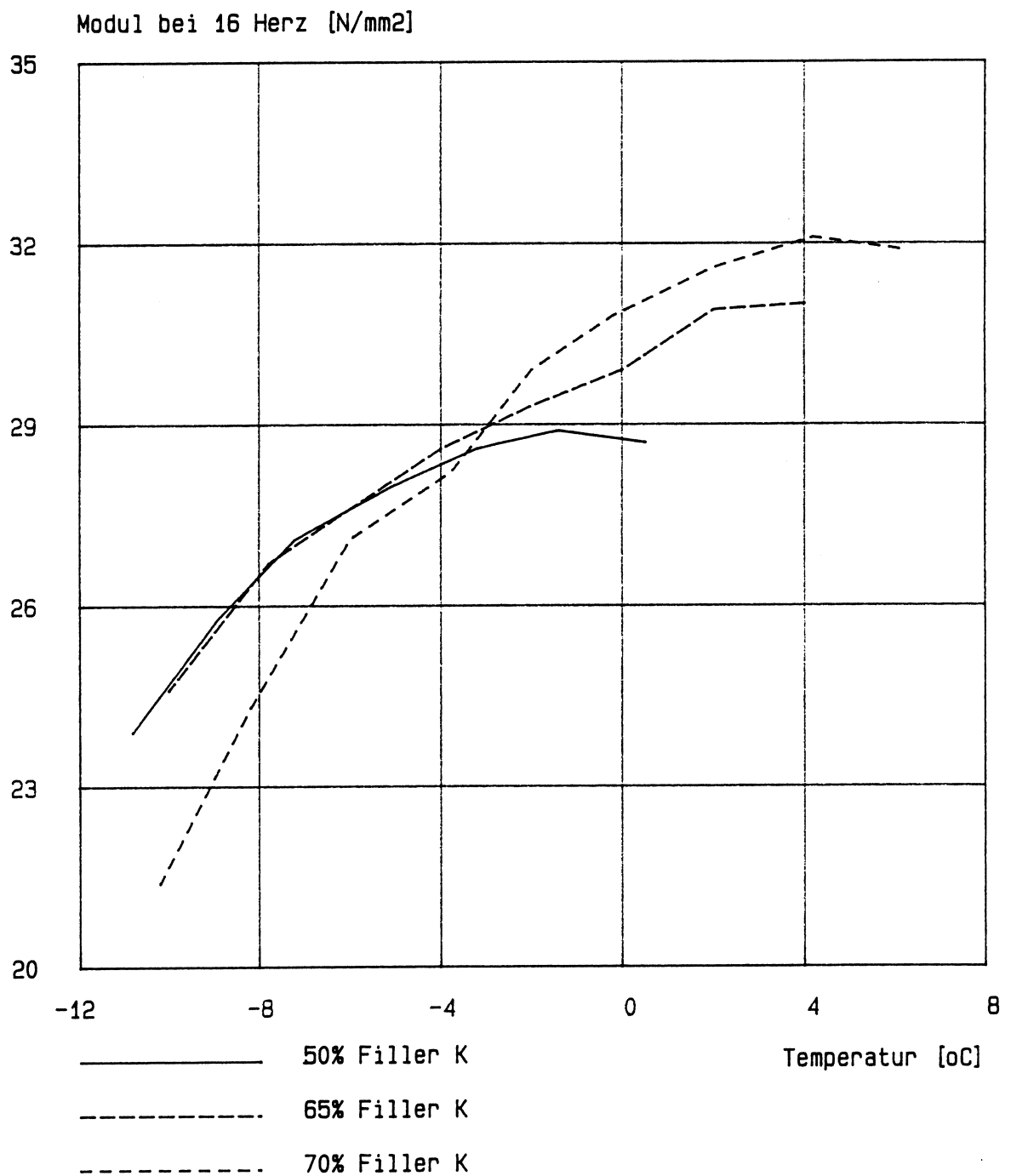
a) Wiederholbarkeit der Modulabnahme

Um prüftechnische Fehler auszuschliessen, wurden die Prüfungen unter Beachtung möglicher Fehlerquellen wiederholt. So wurde mehrmals während der Prüfung untersucht, ob irgendwelche Verschraubungen infolge ungleichen Zusammenziehens einzelner Teile des Prüfeinbaus sich gelöst hatten. Es konnte nie ein Spiel, welches grössere Wegamplituden mit sich gebracht hätte, festgestellt werden. Selbst ein Anziehen zwischen zwei Messungen ergab keine Veränderung der Wegamplitude.

b) Linearität und Kurvenform

Die folgende Abbildung zeigt die Verhältnisse am Einbau und den Ansatzpunkt für eine Spannungskonzentration. Ein grossflächiges Ein- oder gar Durchreissen der Probe müsste sich in den Resultaten zeigen. Durchreissen ergibt ein markantes Abweichen der Wegform vom Sinus, grossflächiges Einreissen als Folge der Spannungskonzentration ein plötzliches Abfallen der Module. Es konnte weder eine Veränderung der Kurvenform noch ein plötzliches Abfallen der Module mit zunehmender Belastung oder abnehmender Temperatur beobachtet werden. Das Diagramm auf der folgenden Seite zeigt den Modulverlauf bei fester Frequenz in Abhängigkeit der Temperatur für Mischungen mit Kalkfiller.

Moduln in Abhängigkeit der Temperatur



c) Temperaturabhängigkeit

Der Effekt wurde mit Prüfungen genauer untersucht, bei denen nur die Temperatur, nicht aber die Frequenz und die Kraftamplitude verändert wurde. Ziel war dabei das Auffinden des Stabilitätsmaximums. Diese Temperatur ist interessant, weil sie auf die beginnende Rissbildung der Mischung hinweist. Für eine Mischung wurde die Prüfung anschliessend mit steigender Temperatur wiederholt. Es konnte festgestellt werden, dass der ursprüngliche Modul mit steigender Temperatur wieder erreicht wurde. Das nahezu bei 100% liegende Heilungsvermögen dieser Mischung ist ein deutlicher Hinweis auf die Richtigkeit der These der Bildung von Mikrorissen.

8. Untersuchung der Belastungsempfindlichkeit

a) Hinweise auf Belastungsempfindlichkeit

Die Prüfungen zum Bestimmen der Moduln in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur lieferten nicht nur die entsprechenden Kennwerte, sondern auch Hinweise auf die Belastungsempfindlichkeit. Das Phänomen ist von praktischem Interesse, denn es besagt, dass die Vorgeschichte einen Einfluss auf das Verhalten von bituminösen Baustoffen hat. Daraus ergeben sich zwei Fragestellungen:

- In welchem Ausmass verändert eine Beanspruchung die Eigenschaften der Mischung?
- Inwieweit ist eine solche Veränderung reversibel und wie schnell und wie vollständig stellt sich der ursprüngliche Zustand wieder ein?

b) Bestimmen einer Belastungsempfindlichkeit anhand der Prüfung am Filler C

Die Prüfungen zum Bestimmen der Module wurden anfänglich mit grossen Sollwerten für Kraft- resp. Wegamplituden durchgeführt, um Messfehler zu minimieren. Sechs nacheinander, bei gleichen Prüfbedingungen bestimmte Modulwerte zeigten dabei eine deutliche Abnahme. Das Fillergerüst wurde während der Schwingbelastung so verändert, dass die innere Reibung der Mischung und damit ihr Modul ab-

nahmen. Diese Abnahme der Module kann als grobes Mass für die Belastungsempfindlichkeit verwendet werden. Für die Mischung mit 70% Filler C wurde die Modulabnahme in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur bestimmt und die Resultate in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Zusätzlich zur Modulabnahme wurde ein weiterer Kennwert berechnet, und zwar die relative Modulabnahme pro Sekunde und pro Millimeter Wegamplitude. Grund für die Berechnung dieses Kennwertes ist die Tatsache, dass die relative Modulabnahme in grober Näherung linear von der Wegamplitude abhängt. Der so berechnete Kennwert ist weniger ausgeprägt abhängig von der Wegamplitude und Temperatur und kann somit eher als Materialkennwert betrachtet werden. Er wird im weiteren als Belastungsempfindlichkeit bezeichnet. Die Module nehmen bei Temperaturen über 25 °C unregelmässig ab, bei unter 15 °C ist die Abnahme gering, weshalb nur ein beschränkter Temperaturbereich ausgewertet werden konnte.

Belastungsempfindlichkeit der Mischung 70% Filler C

Werte im mittleren Temperatur- und niederen Frequenzbereich

Temperatur °C	Frequenz s ⁻¹	Modul- abnahme N/mm ²	Belastungs- empfindlichkeit s ⁻¹ · mm ⁻¹	Bemerkungen
Prüfung im hohen Temperaturbereich				
25.000	0.250	0.040	0.08	
20.000	0.250	0.120	0.09	
20.000	0.500	0.110	0.06	
Prüfung im mittleren Temperaturbereich				
20.000	0.125	0.070	0.023	
20.000	0.500	0.060	0.061	
15.000	0.125	0.030	0.010	
15.000	0.250	0.050	0.028	
15.000	0.500	0.060	0.062	

Es zeigen sich die günstigsten Prüfbedingungen bei 20 °C und bei tiefen Frequenzen, dementsprechend wurden die Parameter für eine gezielte Prüfung dieser Eigenschaft gewählt. Da in der Praxis die grösste Verformungsgefahr bei hohen Temperaturen auftritt, wurde

auch eine Prüfung für diesen Bereich entworfen. Als Temperatur bot sich 40 °C mit Anschluss an das Bestimmen der Moduln bei hohen Temperaturen an. Um ausreichende Kraftamplituden für eine hinreichend genaue Messung zu erhalten, wurde 1 Hertz als Belastungsfrequenz gewählt.

b) Prüfung zum Erfassen der Belastungsempfindlichkeit

Bei konstanter Temperatur und Frequenz werden 9 Kennwertbestimmungen bei unterschiedlich gewählten Amplituden für die Sollwertkurven durchgeführt. Die minimale Amplitude wurde dabei in Anlehnung an die Prüfung zum Bestimmen der Module gewählt. Bei 6 Kennwertbestimmungen wurde diese minimale Amplitude eingestellt, bei 3 weiteren eine abgestufte, vergrösserte Amplitude gewählt:

1)	2)	Anmerkung
-----------	-----------	------------------

- | | | |
|---|------|---|
| 2 | 2 | Aus der Verdoppelung der Amplitude sollten keine ausgeprägten Effekte resultieren. Diese Bestimmung stellt somit eine Ueberprüfung der Bedingungen für das Bestimmen der Module dar und zeigt, ob bei der gewählten Amplitude Linearität noch ausreichend zutrifft. |
| 4 | 5 | Diese Kombination stellt eine mittlere Belastung dar. Ihr folgen zwei Kennwertbestimmungen mit minimaler Amplitude, so dass die Erholung nach dieser Belastung verfolgt werden kann. |
| 7 | 12.5 | Diese Kombination stellt die stärkste Belastung dar und liefert die ausgeprägtesten Effekte. Zwei weitere Bestimmungen (Nr. 8 und 9) mit minimaler Amplitude für die Sollwertkurven erlauben auch hier das Erfassen der Erholung. |

1) = Nr. der Bestimmung

2) = Faktor für Amplitude

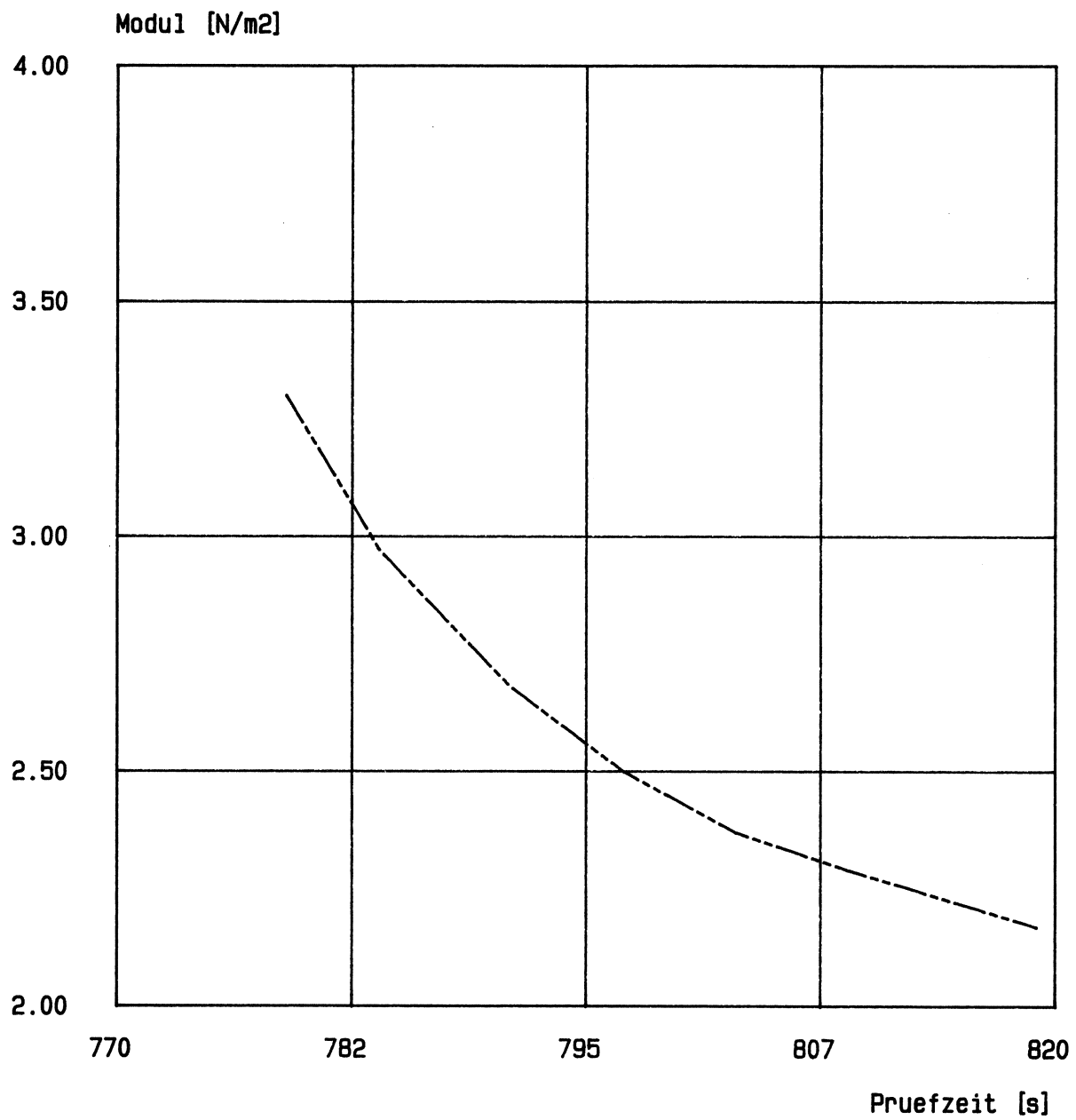
d) Ermitteln von Kennwerten zur Belastungsempfindlichkeit

Ausgangspunkt ist jeweils der am ungestörten Material ermittelte komplexe Modul. Für mittlere und hohe Beanspruchung ist dann der verbleibende Modul in Prozent des ursprünglichen anzugeben. Es ist dabei der letzte Modul aus der Gruppe zu verwenden, also der Modul nach der längsten Belastungszeit. Die Erweichung kann graphisch dargestellt werden, wie das Diagramm auf Seite 123 zeigt.

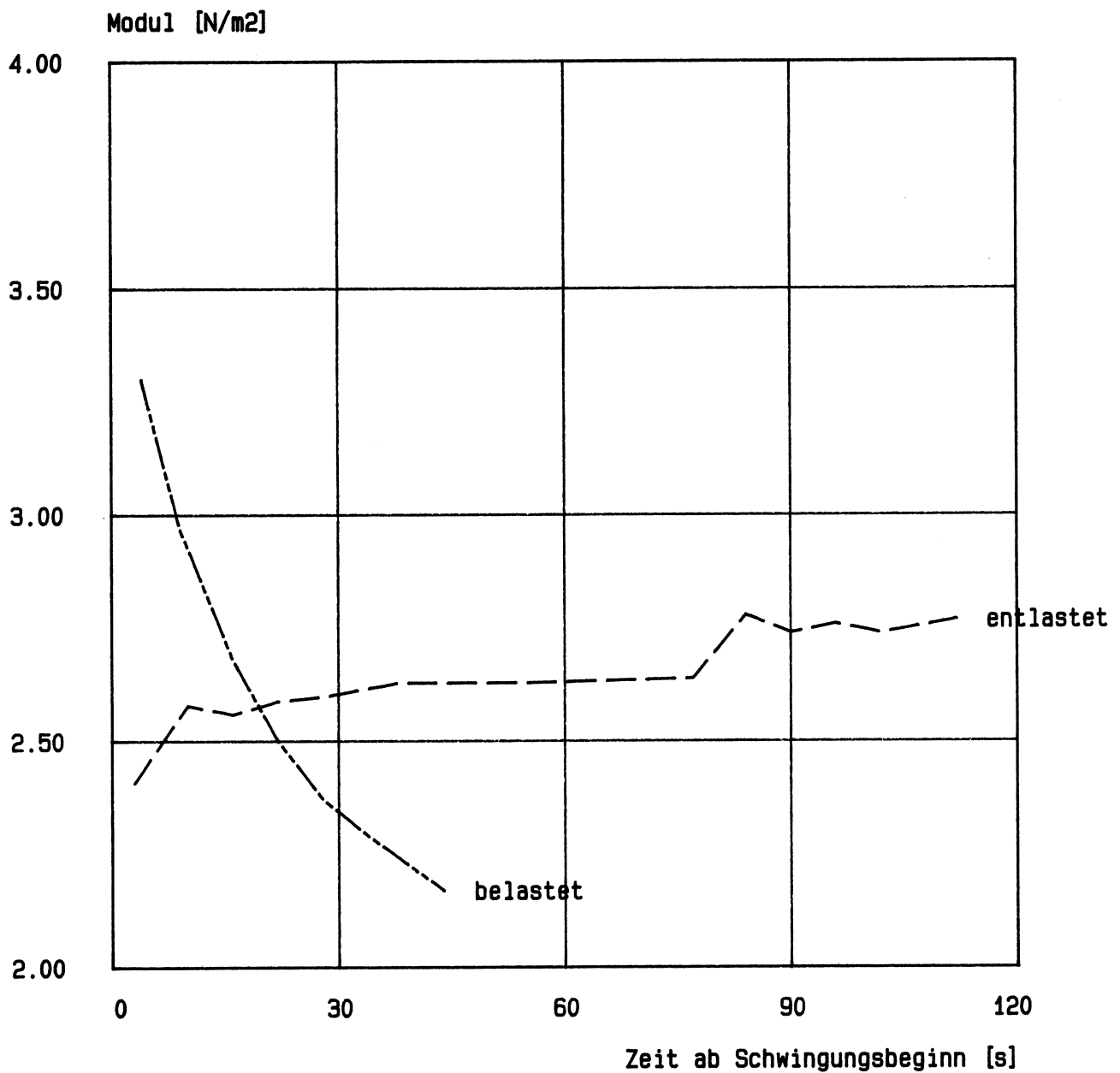
Das Diagramm auf Seite 124 demonstriert die Rückbildung des Moduls. Einer raschen, teilweisen Rückbildung der Modulabnahme folgt eine langsam verlaufende Annäherung an den ursprünglichen Wert. Es kann angegeben werden, wieviel Prozent der Modulabnahme durch die Belastung wieder ausgeglichen werden; im Beispiel sind dies 53%.

Die Untersuchung der Belastungsempfindlichkeit bei 40 °C muss mit weggeregelten Versuchen durchgeführt werden. Es zeigt sich dabei ein deutlich anderes Bild. Bei hohen Beanspruchungen ist eher eine Zunahme der Module festzustellen. Möglicherweise ist das auf Turbulenzen im Bindemittelfilm zwischen den Fillerkörnern zurückzuführen. Beim Prüfen der Rückbildung des Einflusses der starken Belastung zeigt sich anfangs ein reduzierter Wert für die Module, der sich langsam dem ursprünglichen Wert annähert. Das steht im Einklang mit dem Modell, welches sowohl Turbulenz als auch eine Belastungsempfindlichkeit enthält. Da die Effekte insgesamt wenig ausgeprägt sind, wurde auf eine weitere Untersuchung verzichtet.

Veraenderung des Moduls waehrend der Pruefung



Veraenderung des Moduls infolge Belastung



L Resultate der Untersuchung

1. Bestimmen der mechanischen Kennwerte

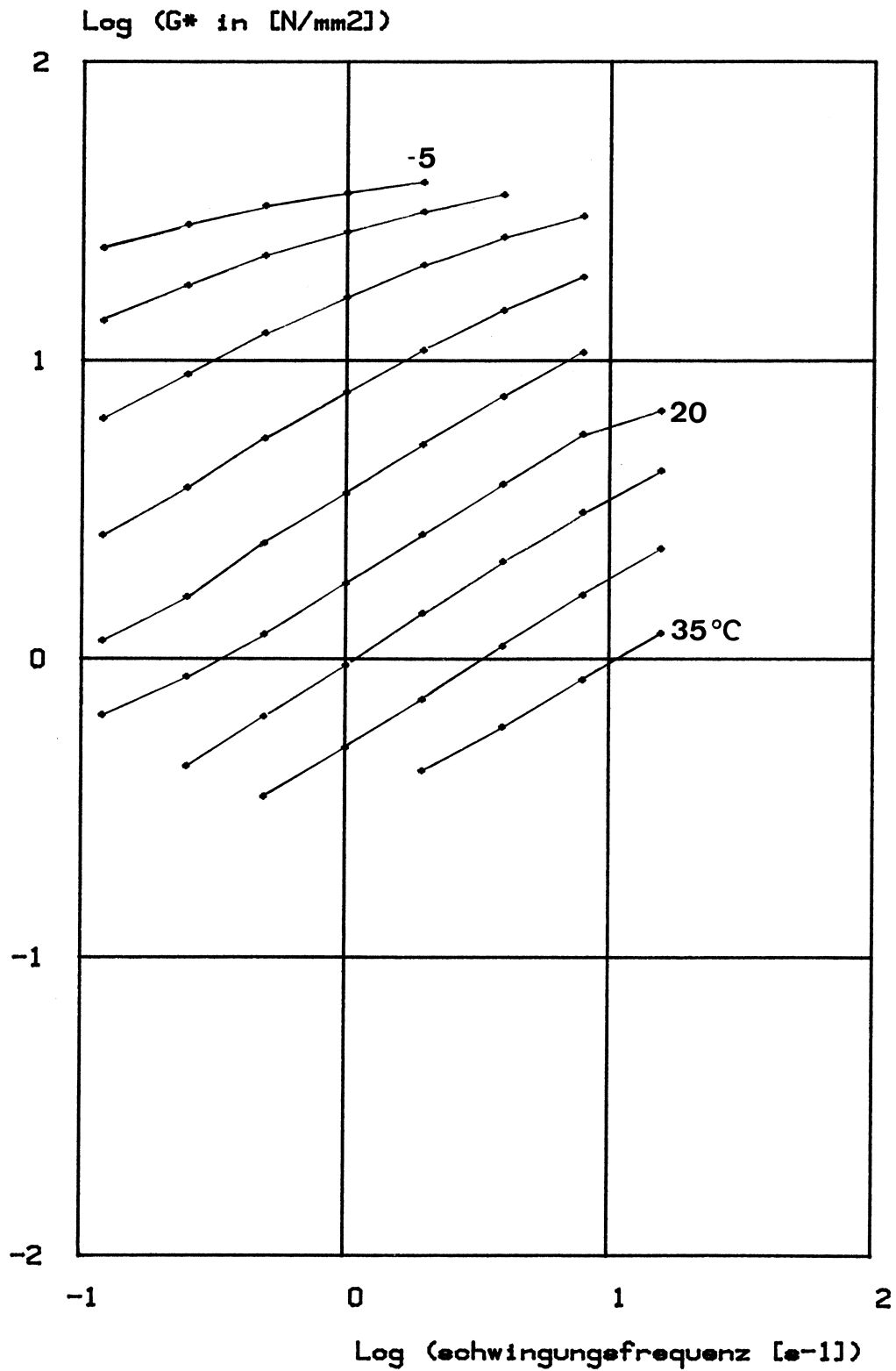
Das Bestimmen des mechanischen Verhaltens von Mischungen aus Bitumen und Fillern umfasst die Variation der drei Parameter Mischungsverhältnis, Temperatur und Belastungsfrequenz. Das ergibt rasch einen grossen Prüfaufwand, weshalb nicht für alle Filler das gleiche Programm durchgeführt wurde.

- Während der Prüfung der Filler A und C wurde das Verfahren weiterentwickelt. Die durchgeführten Prüfungen weisen deutliche Mängel auf, insbesondere sind die Moduln wegen zu gross gewählter Amplituden zu klein. Auf eine Wiederholung der Prüfungen an diesen Fillern wurde verzichtet.
- An den Fillern B, E, K und Q wurde ein umfangreiches Prüfprogramm an Mischungen mit 50, 65, 70 und 75 Masse-% Filler mit hohen (20 bis 40 °C, Temperaturschritte 5 °C), mittleren (20 bis 10 °C, Temperaturen fallend) und tiefen (5 bis -5 °C) Temperaturen durchgeführt, wobei jeweils optimale Werte für die Amplituden der Sollwertkurven gewählt wurden. Zusätzlich wurde an diesen Filler-mischungen Belastungsempfindlichkeiten und Tieftemperaturverhalten untersucht.
- An den restlichen Fillern D, F, G, H, M, N, O und T wurde ein reduziertes Prüfprogramm mit Mischungen von 50 und 70 Masse-% Filler bei hohen (20 bis 40 °C) und tiefen (15 bis -10 °C) Temperaturen durchgeführt. Als Amplituden für die Sollwertkurven wurden Kompromisswerte eingesetzt, wie sie sich aufgrund der umfangreichen Prüfungen an anderen Fillern vertreten liessen.

Die Resultate dieser Untersuchungen sind in den Diagrammen der Seiten 127 bis 167 graphisch dargestellt. Sie zeigen deutlich das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Filler. Auch der Einfluss der Fillerkonzentration ist klar ersichtlich. Zu erkennen ist bei einigen Fillern das besprochene anomale Tieftemperaturver-

halten. Bei jenen Fillern, bei denen die Moduln für die Temperatur 20 °C mit zwei verschiedenen Prüfprogrammen erfasst wurde, ist ein unterschiedlich gutes Uebereinstimmen der entsprechenden Kurvenäste zu erkennen. Ausgeprägte Unterschiede kommen nicht vor, die Differenzen lassen sich am besten durch die zum Teil unterschiedliche Vorgeschichte der Mischung erklären. Das zeigt die Notwendigkeit, Prüfungen mit genau definierten Prüfplänen durchzuführen. Fehlerhafte Messungen traten verschiedentlich bei der höchsten Temperatur von 30 °C und der kleinsten Frequenz von 0.25 Hertz auf. Diese Prüfparameter geben den Grenzbereich für diese Prüfung an.

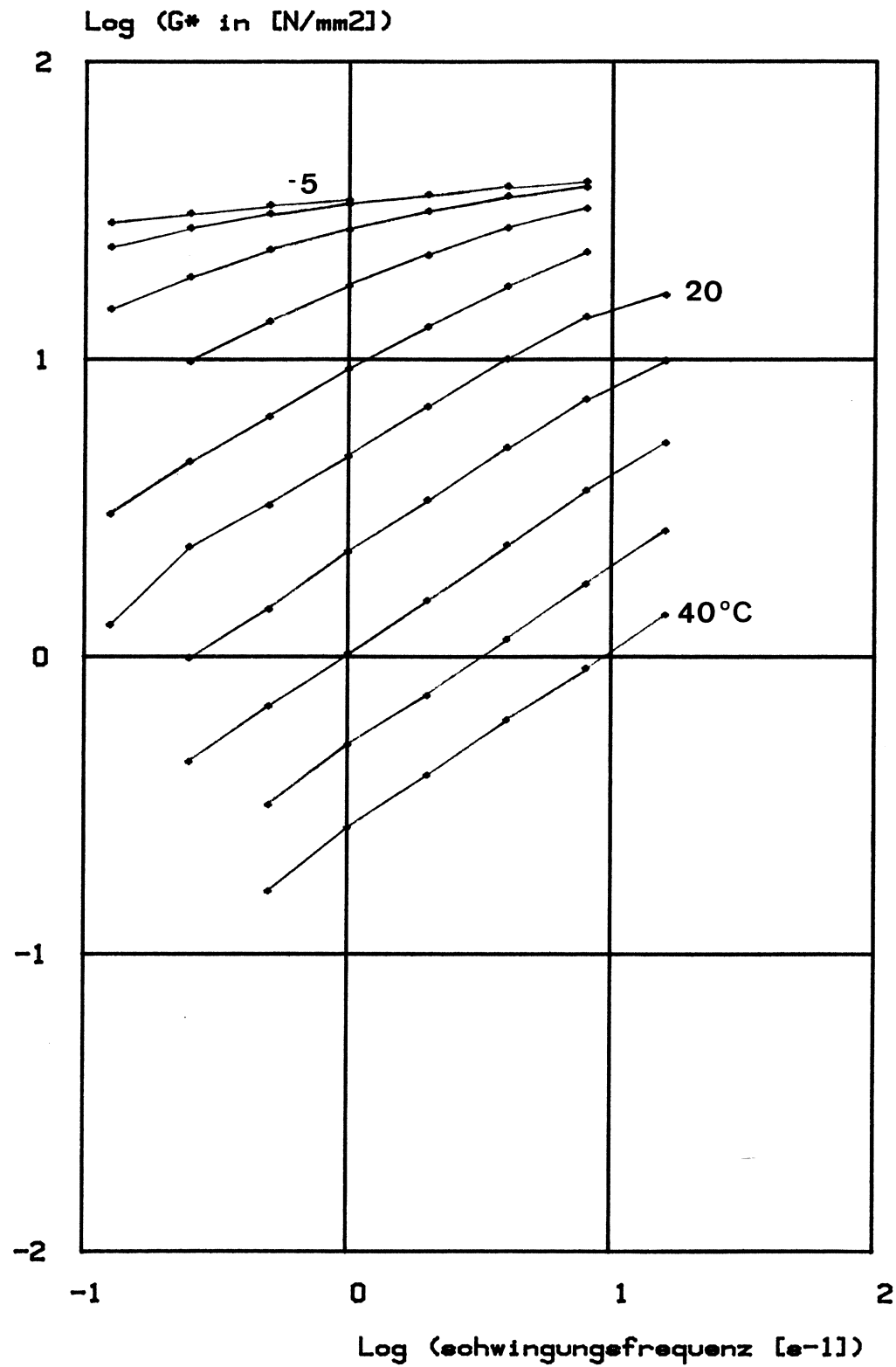
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

50% A

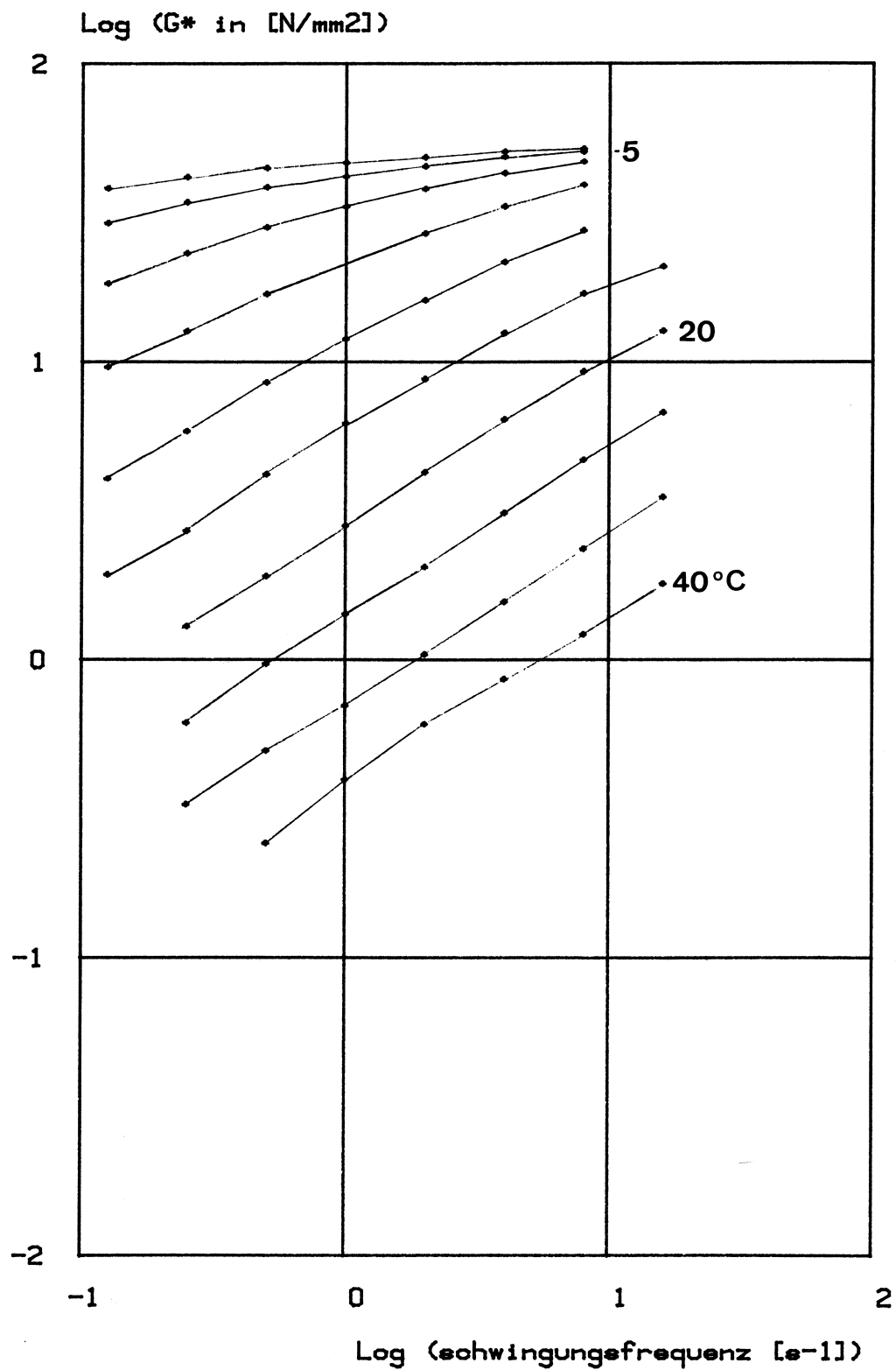
Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorte:

65% A

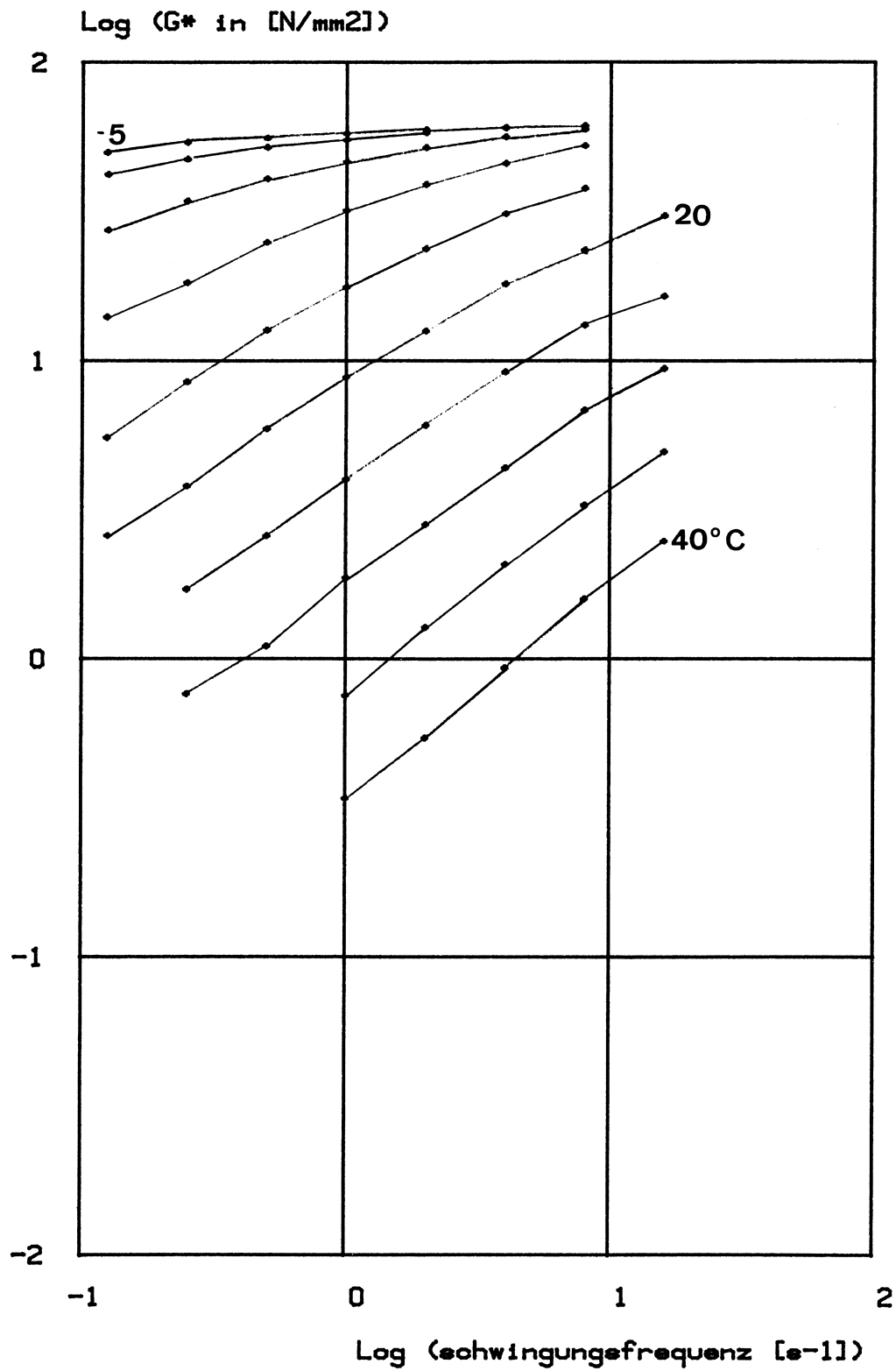
Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorten:

70% A

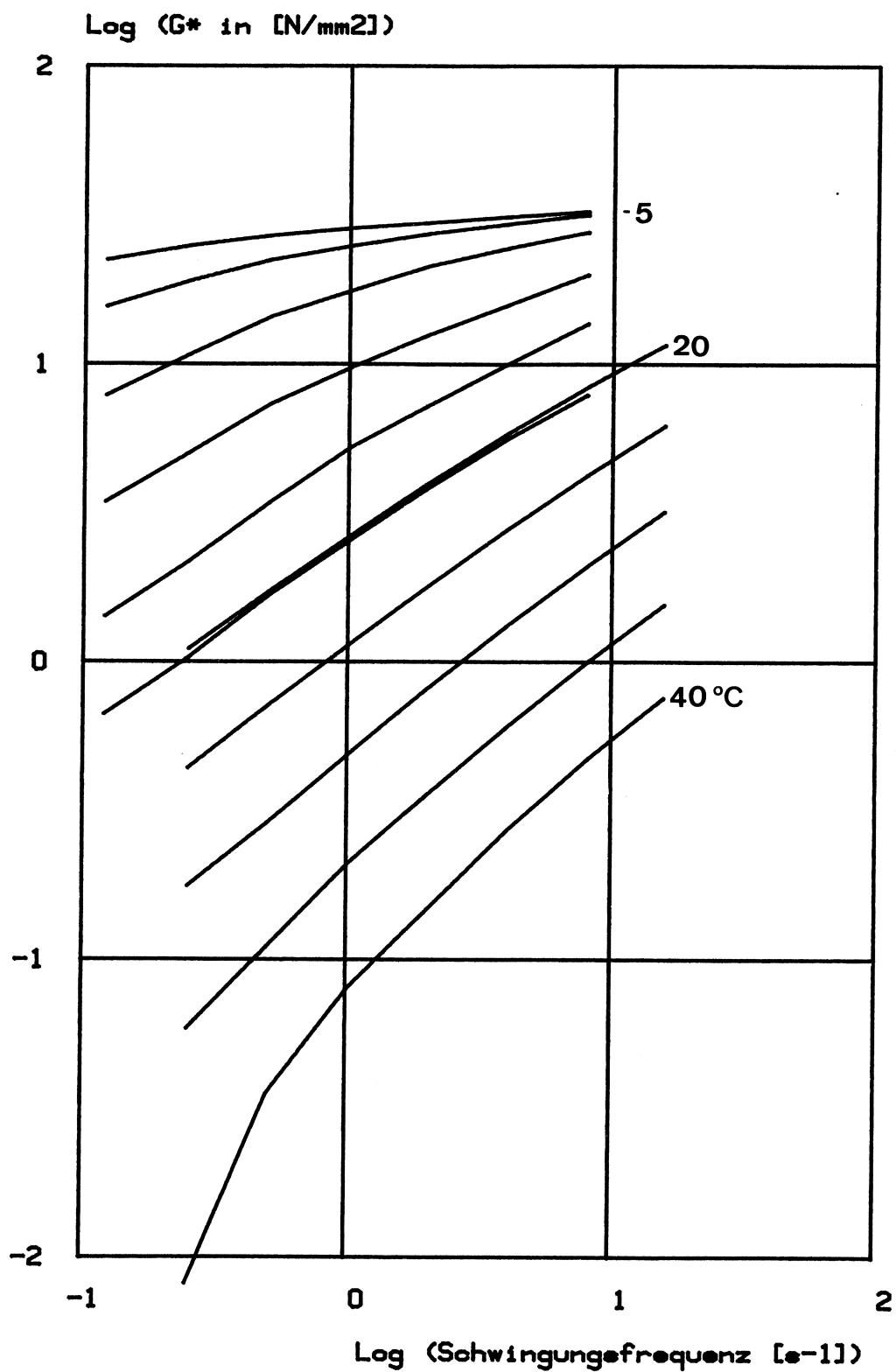
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

75% A

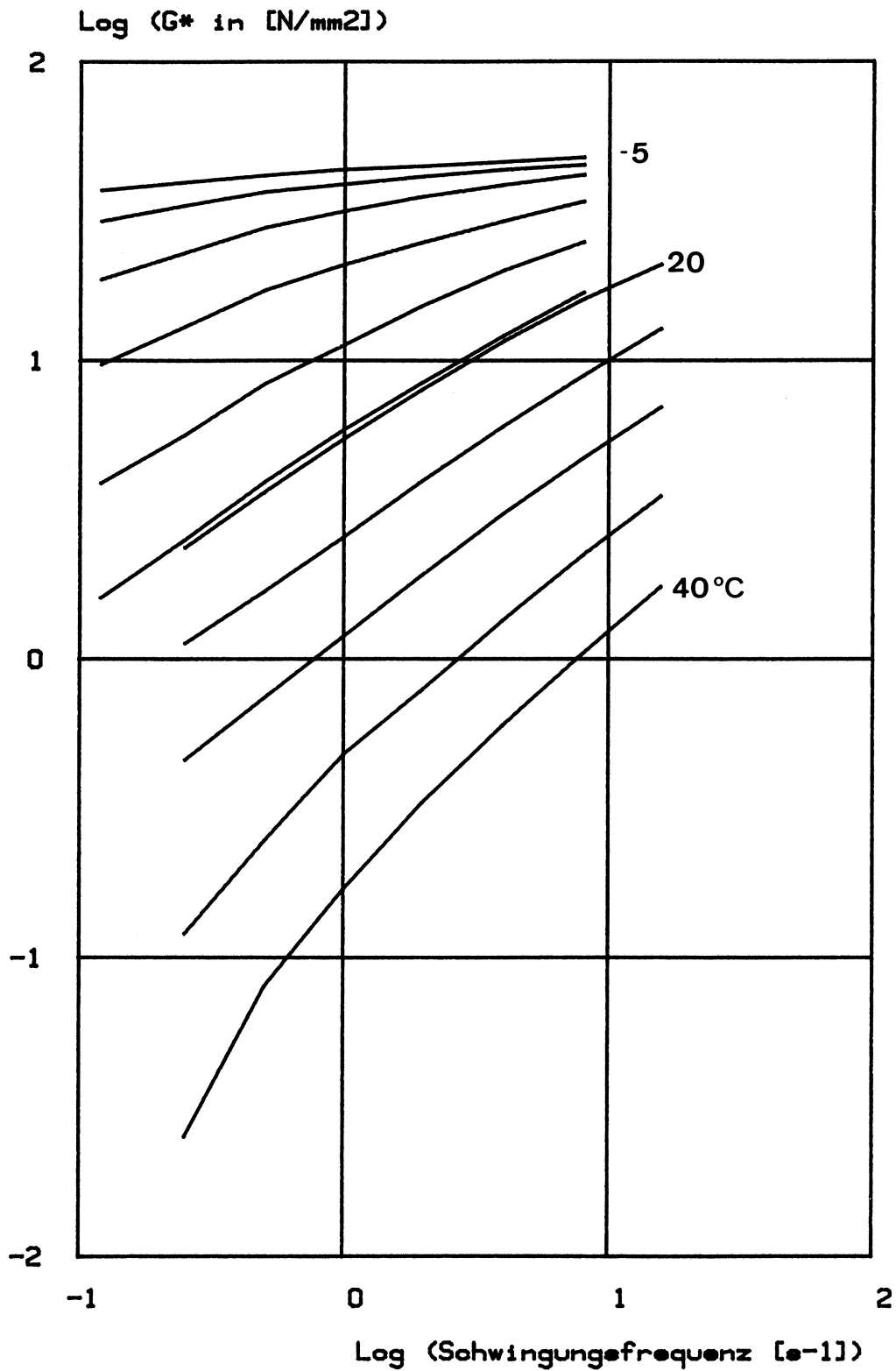
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

50% b

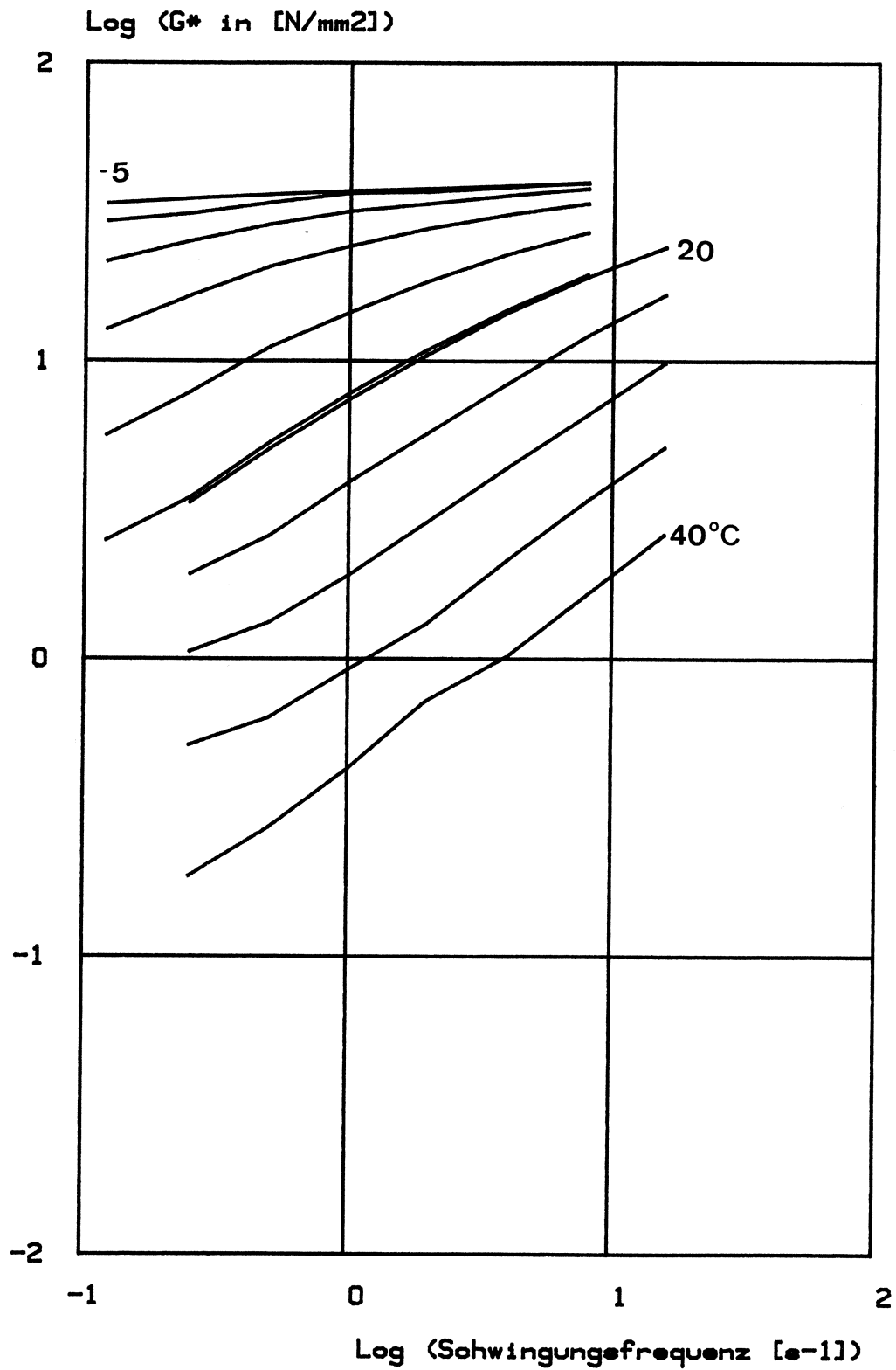
Komplexer Modul



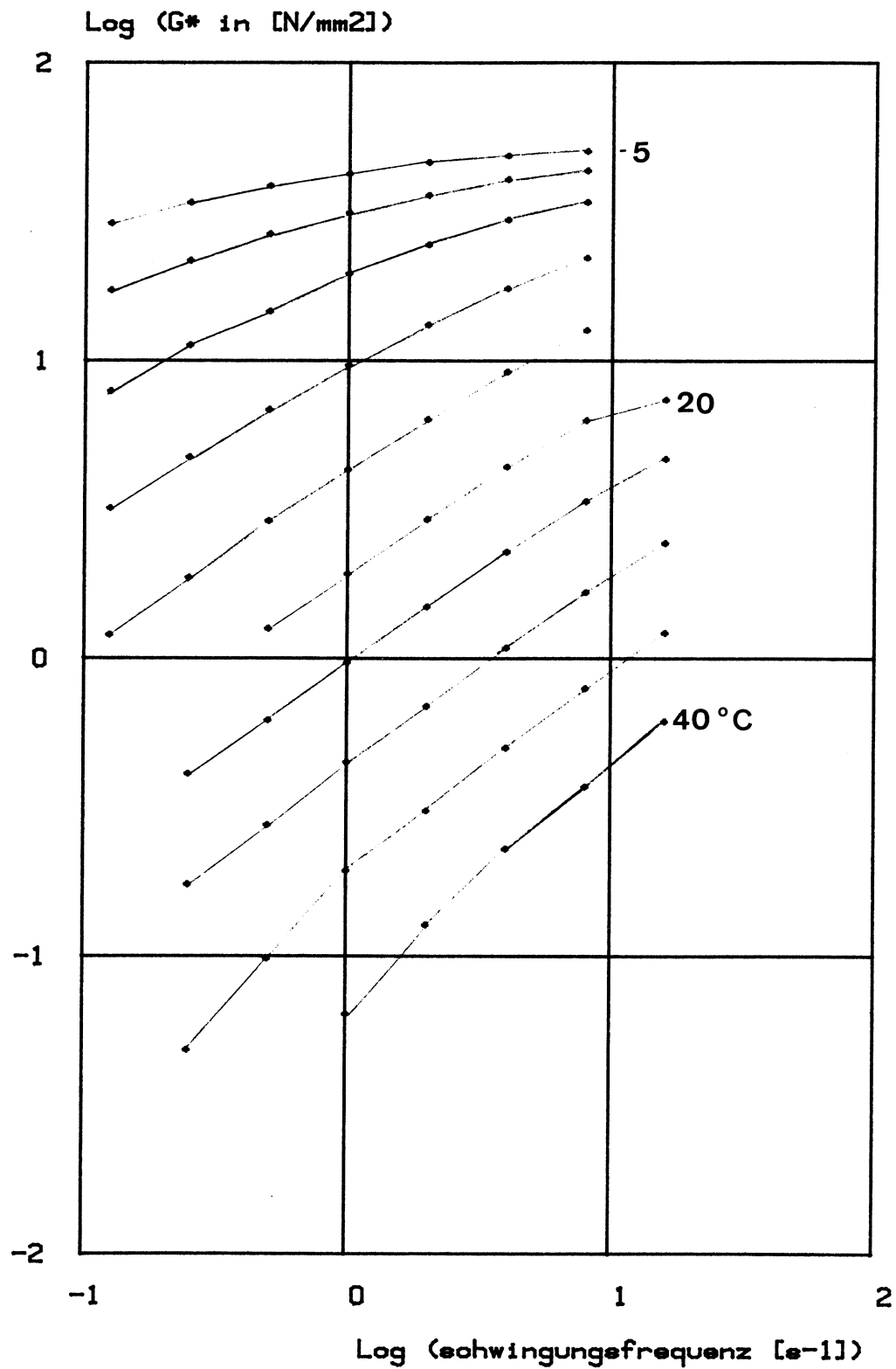
Füllergehalt und Sorte:

65% B

Komplexer Modul



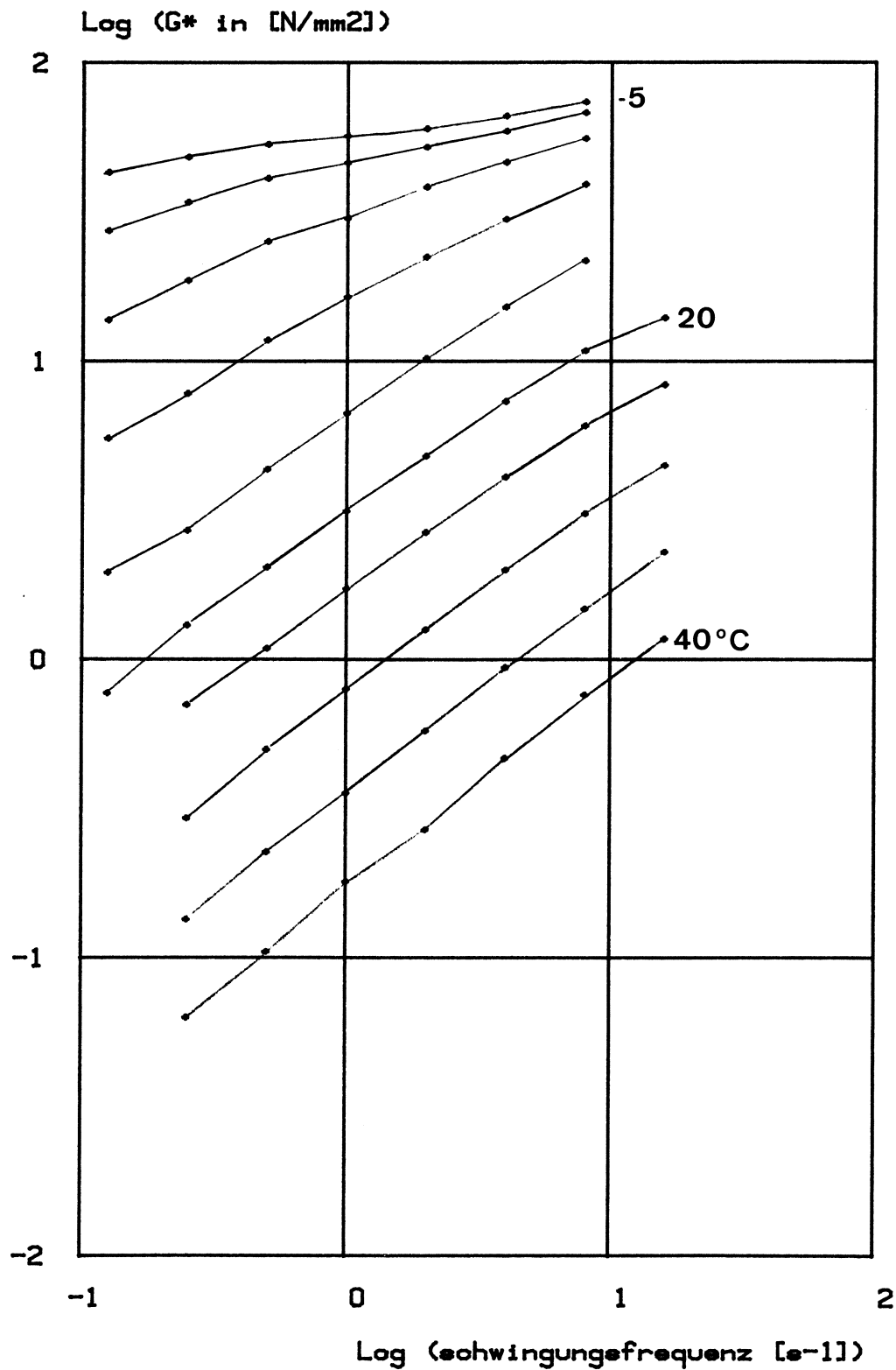
Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorten:

50% C

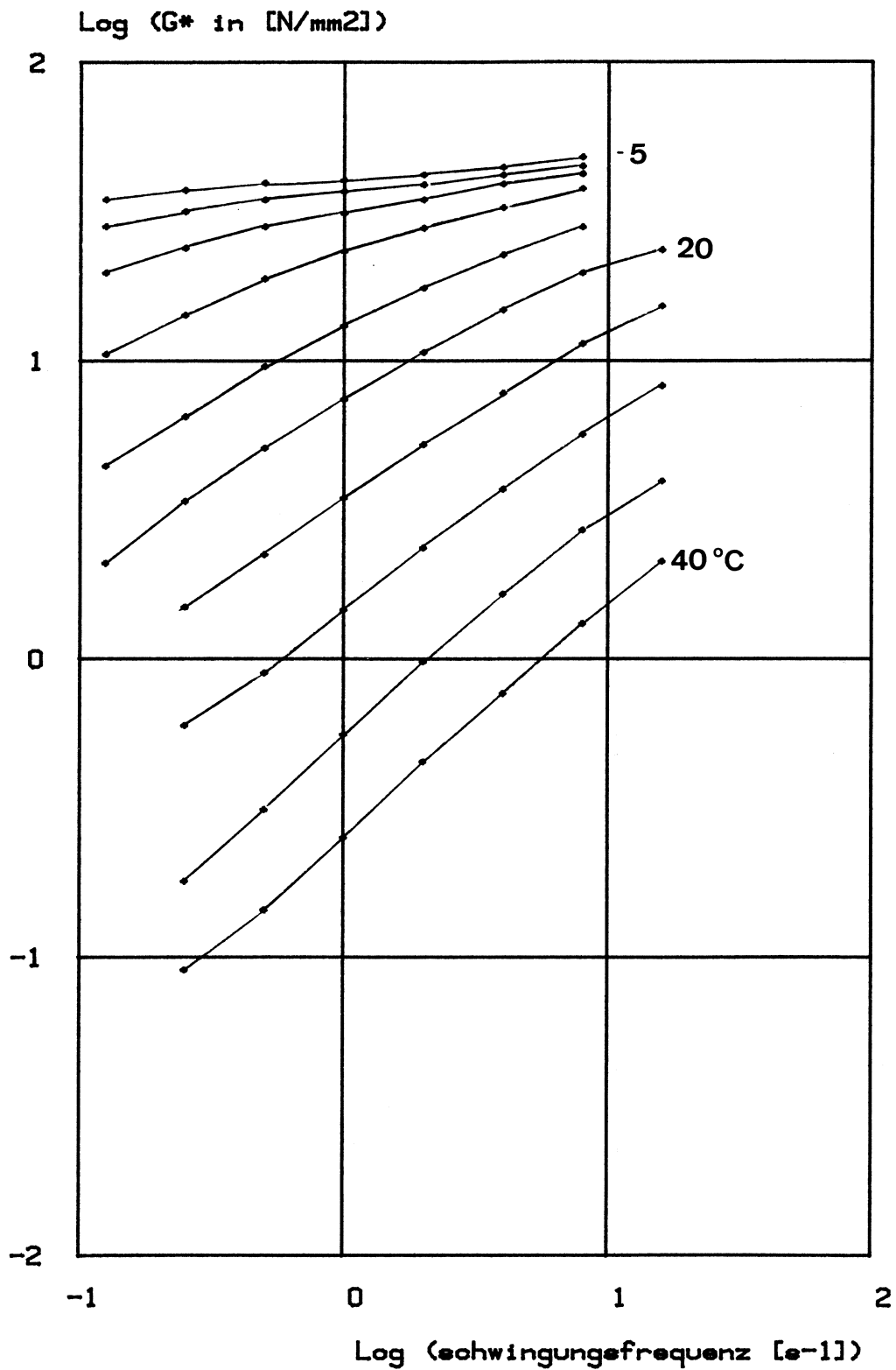
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

65% C

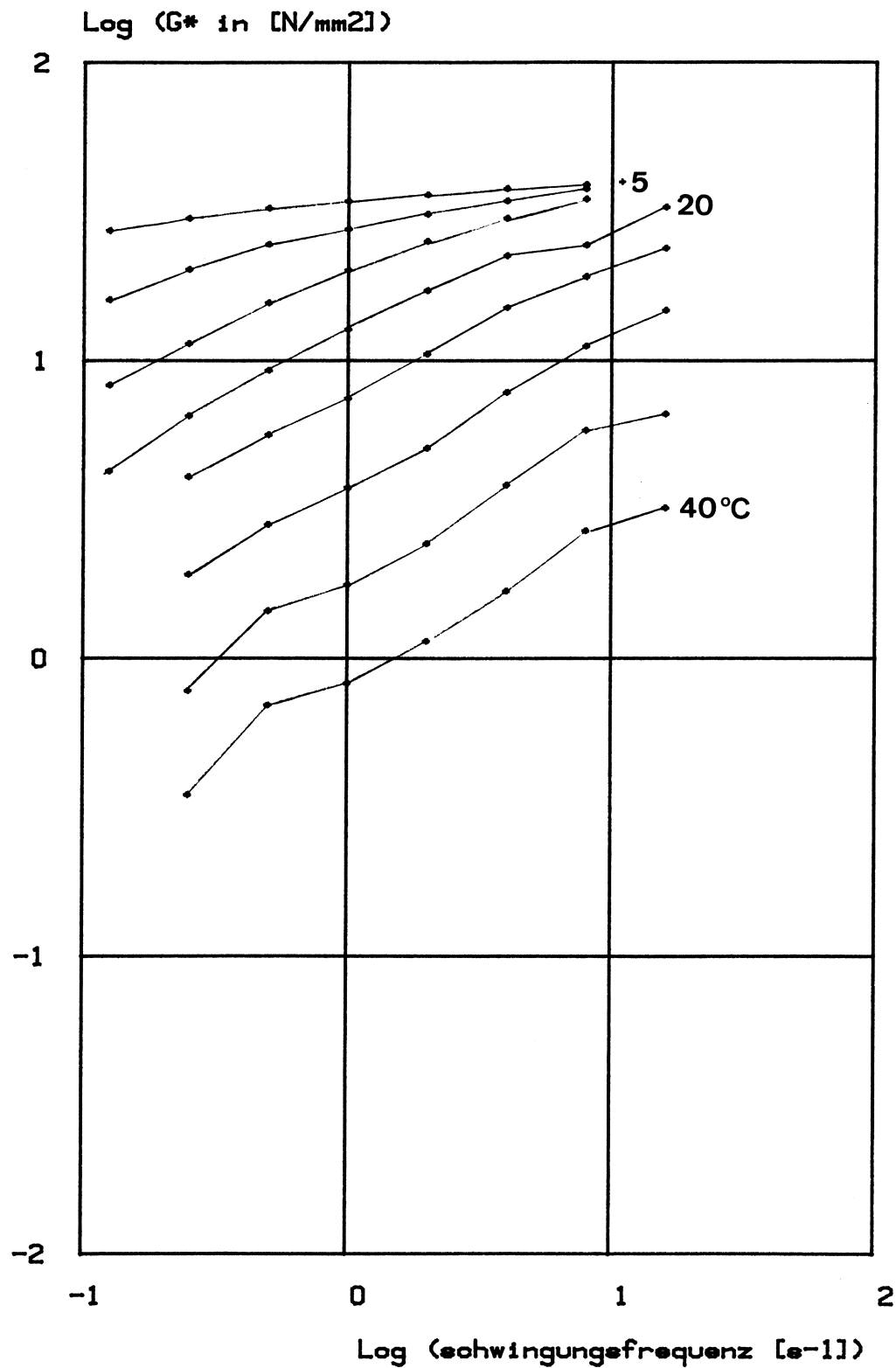
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

70% C

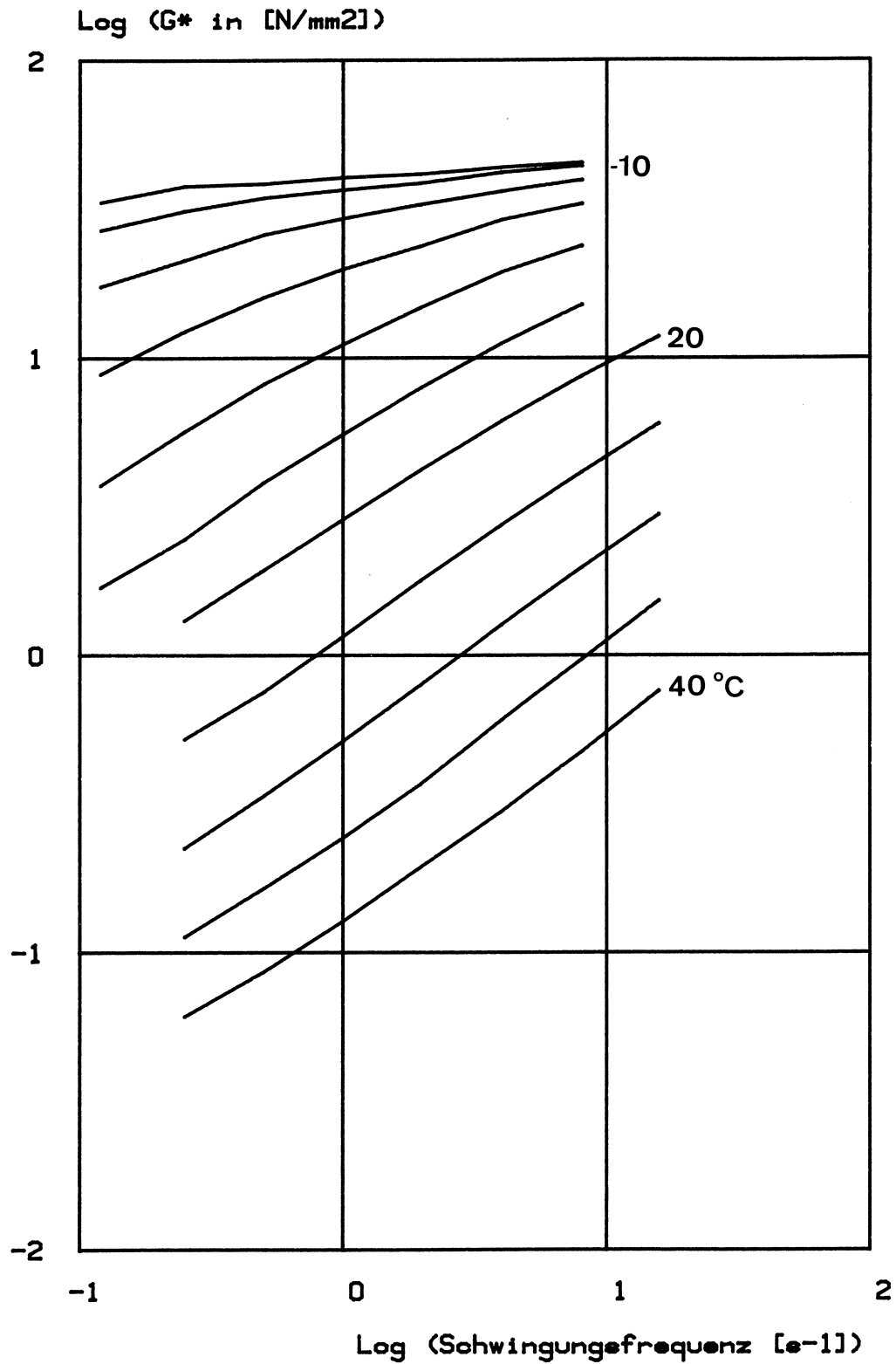
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

75% C

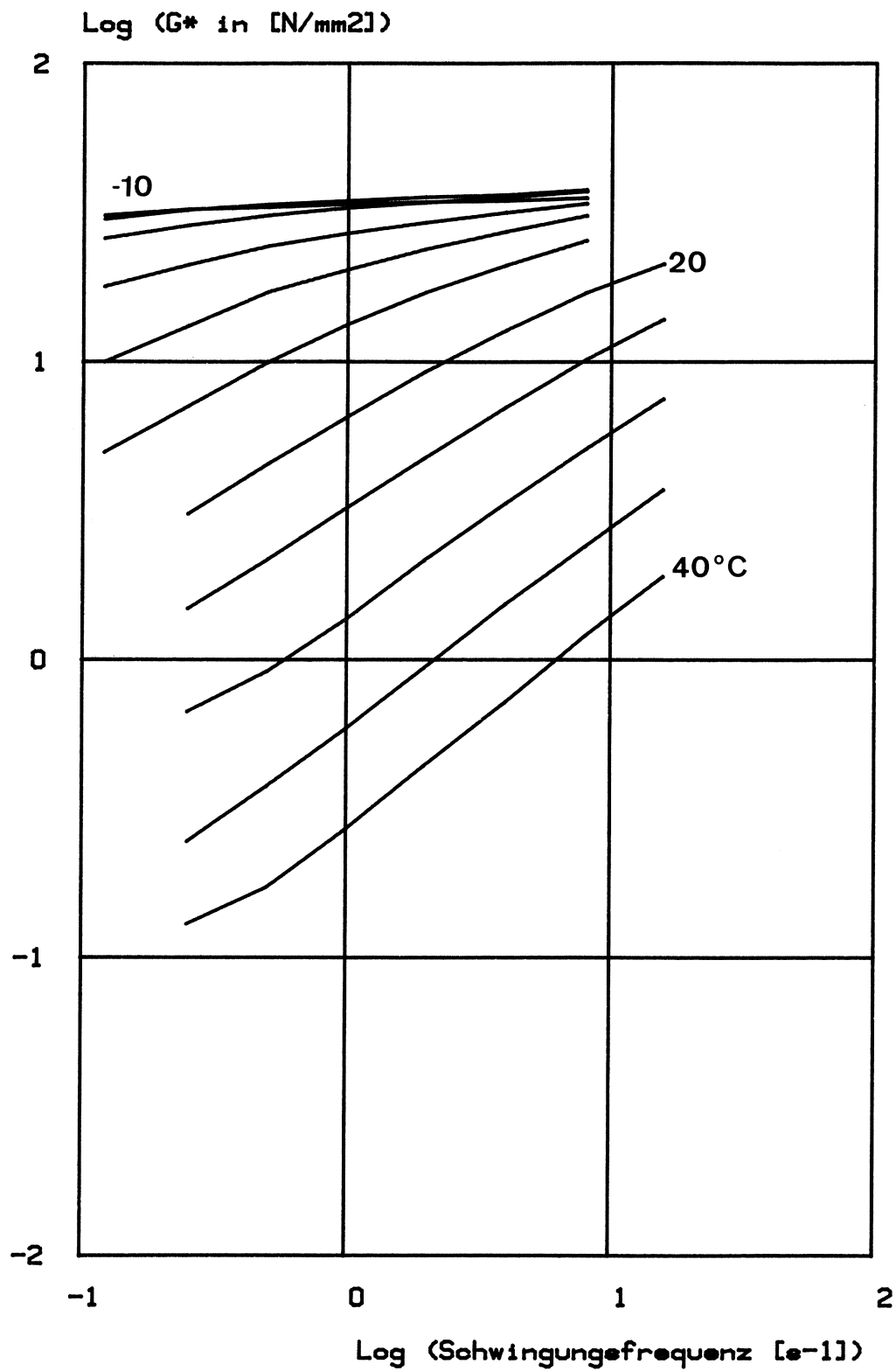
Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorte:

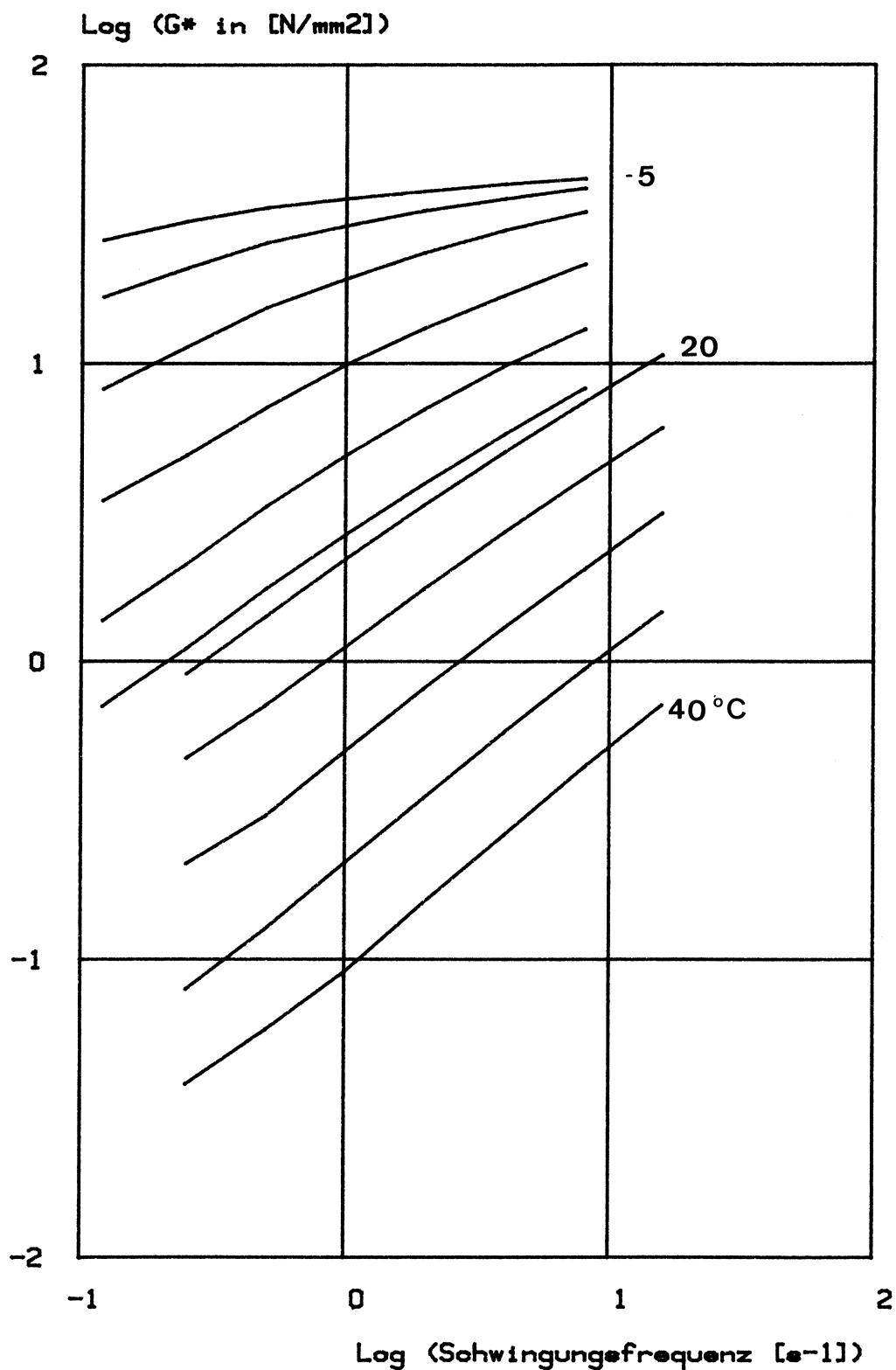
50% D

Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorten: 70% D

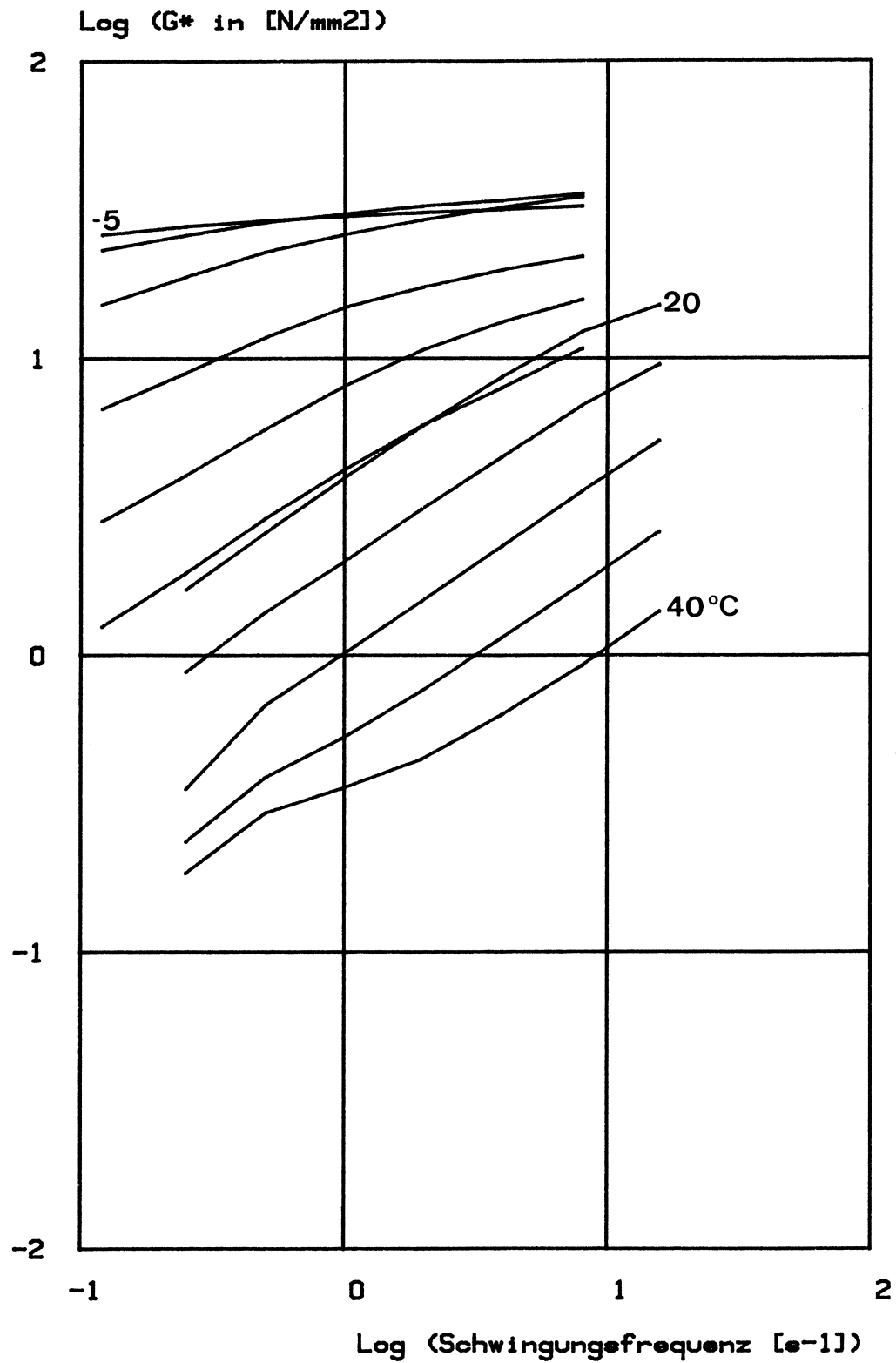
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

50% E

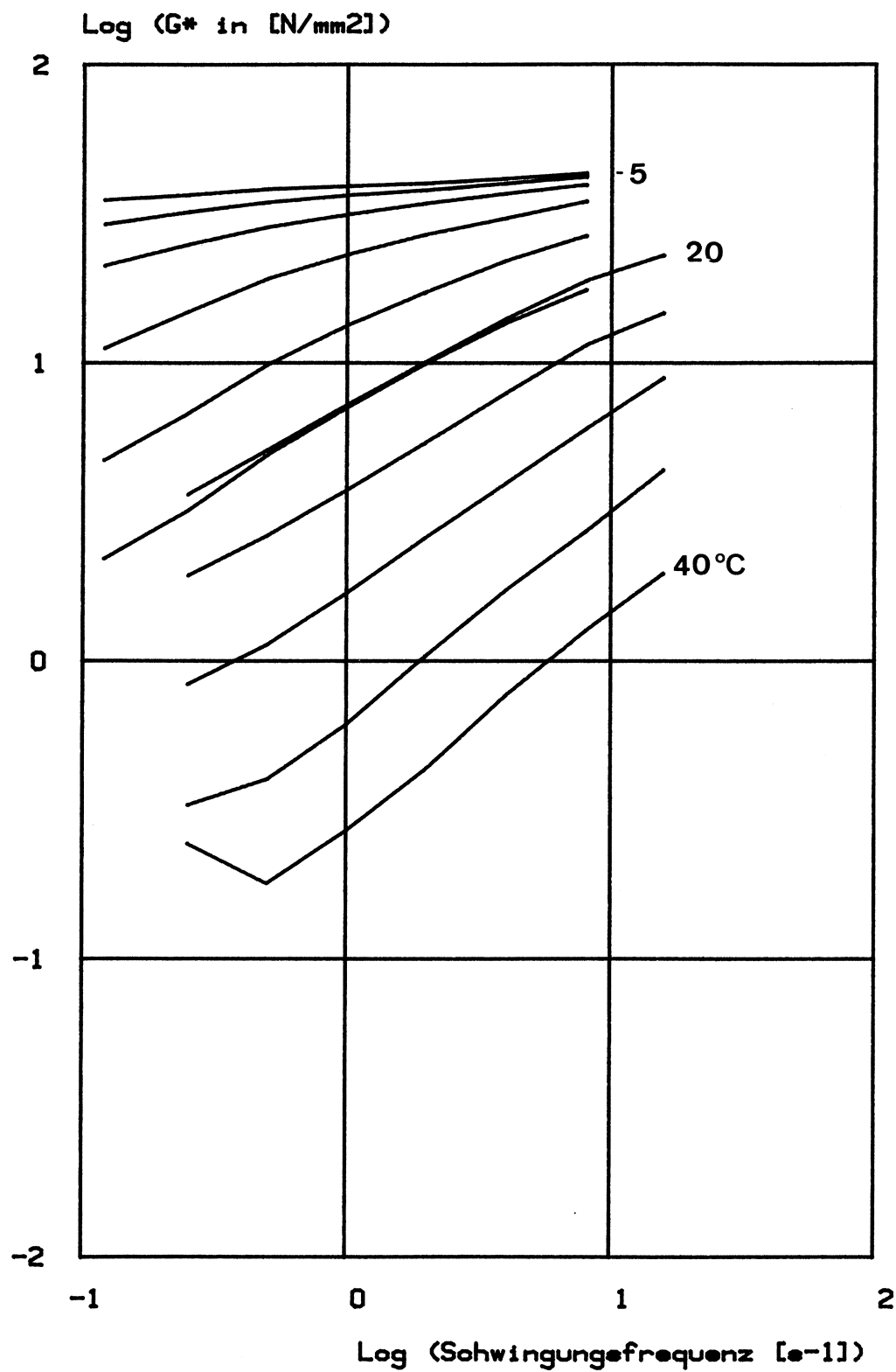
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

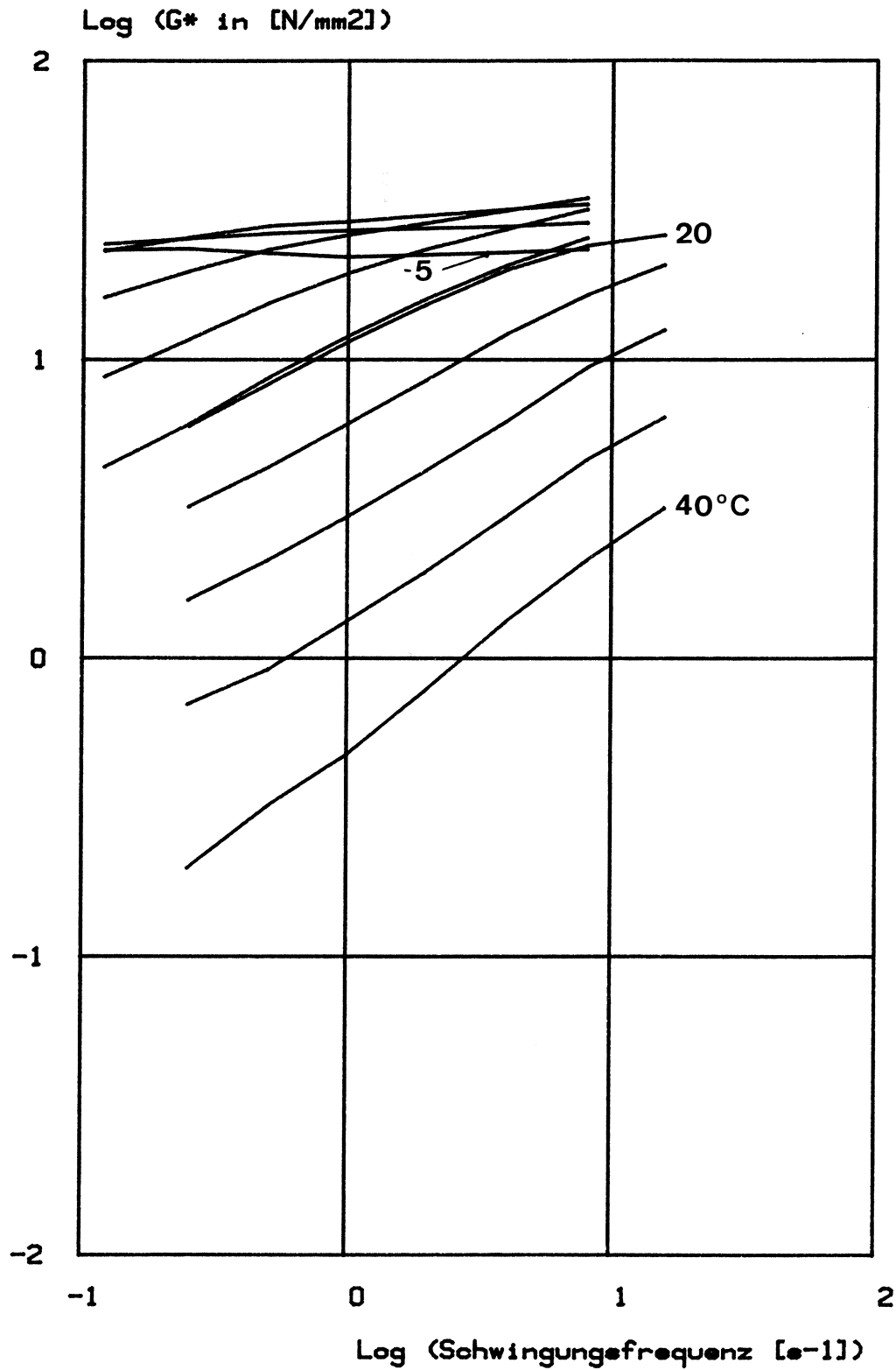
65% E

Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorten: 70% E

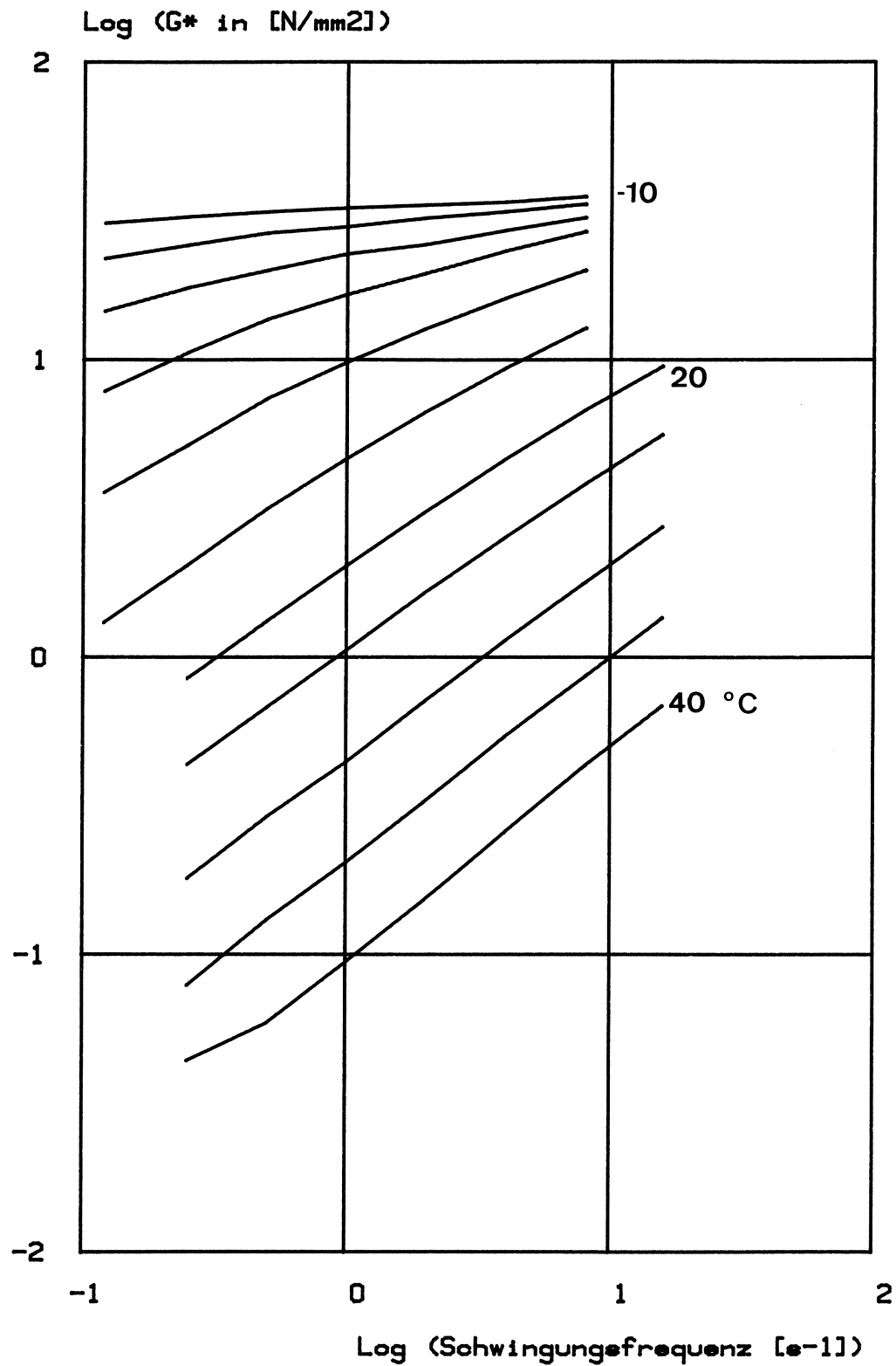
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

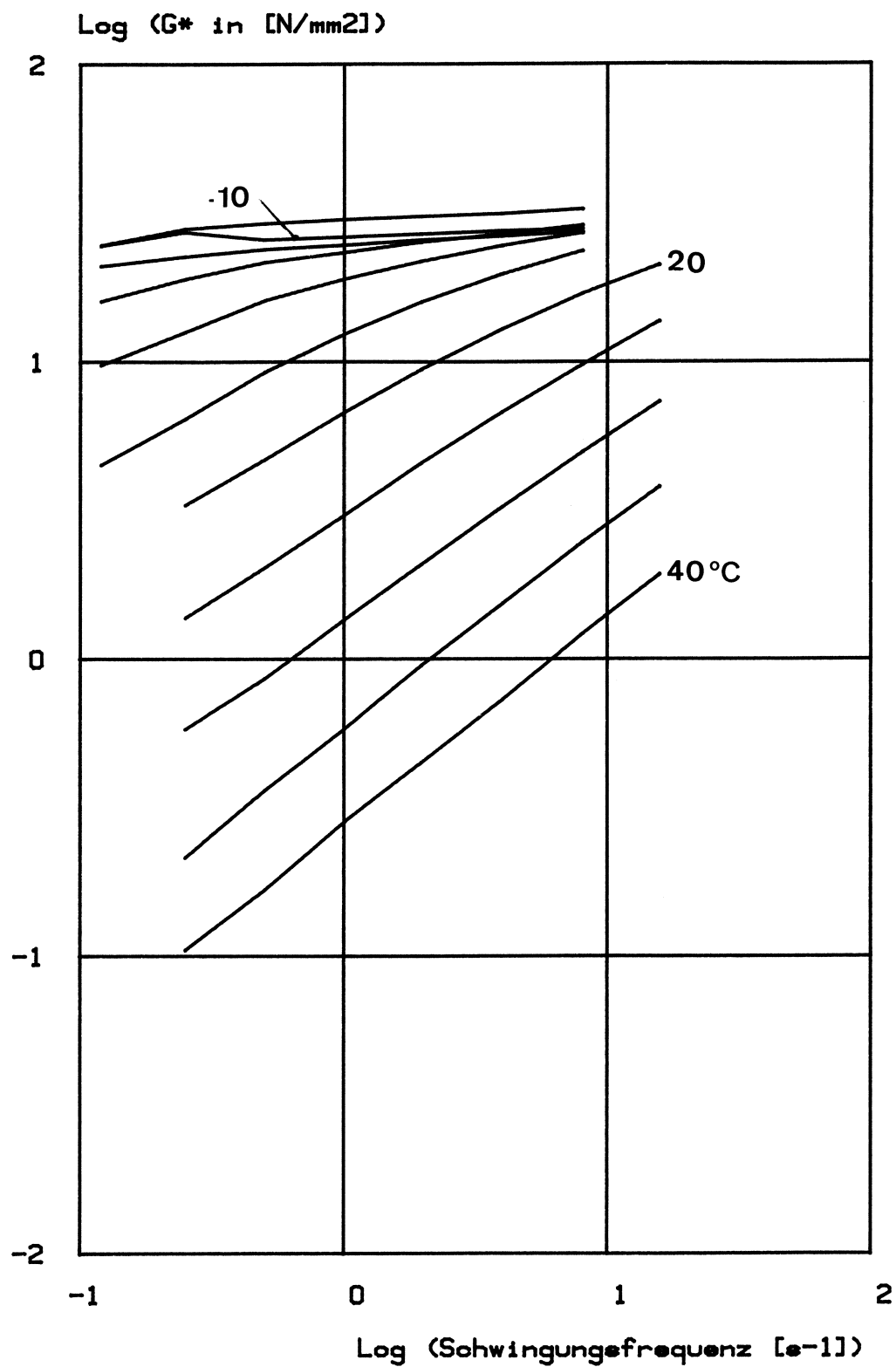
75% E

Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorte: 50% F

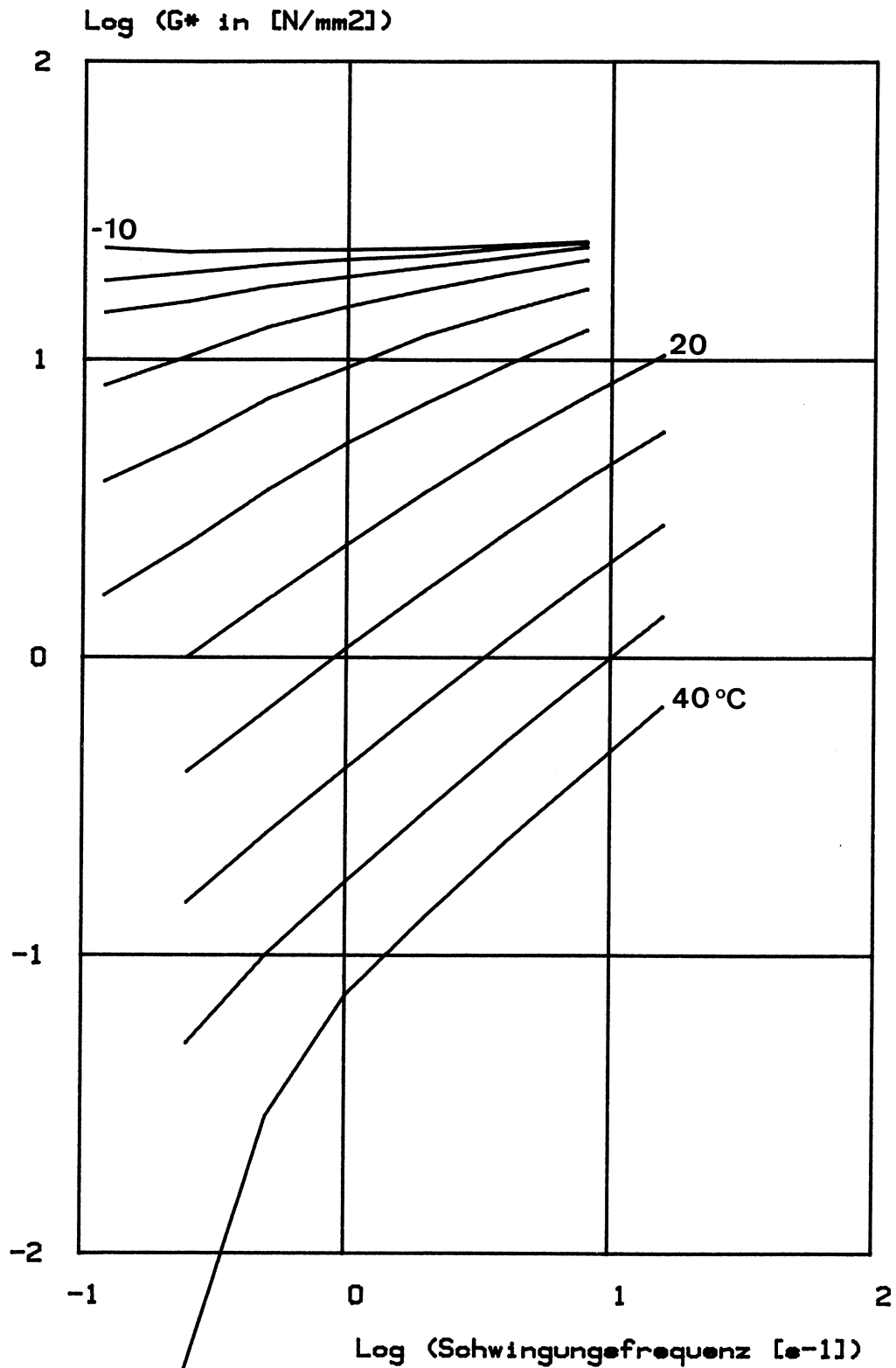
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

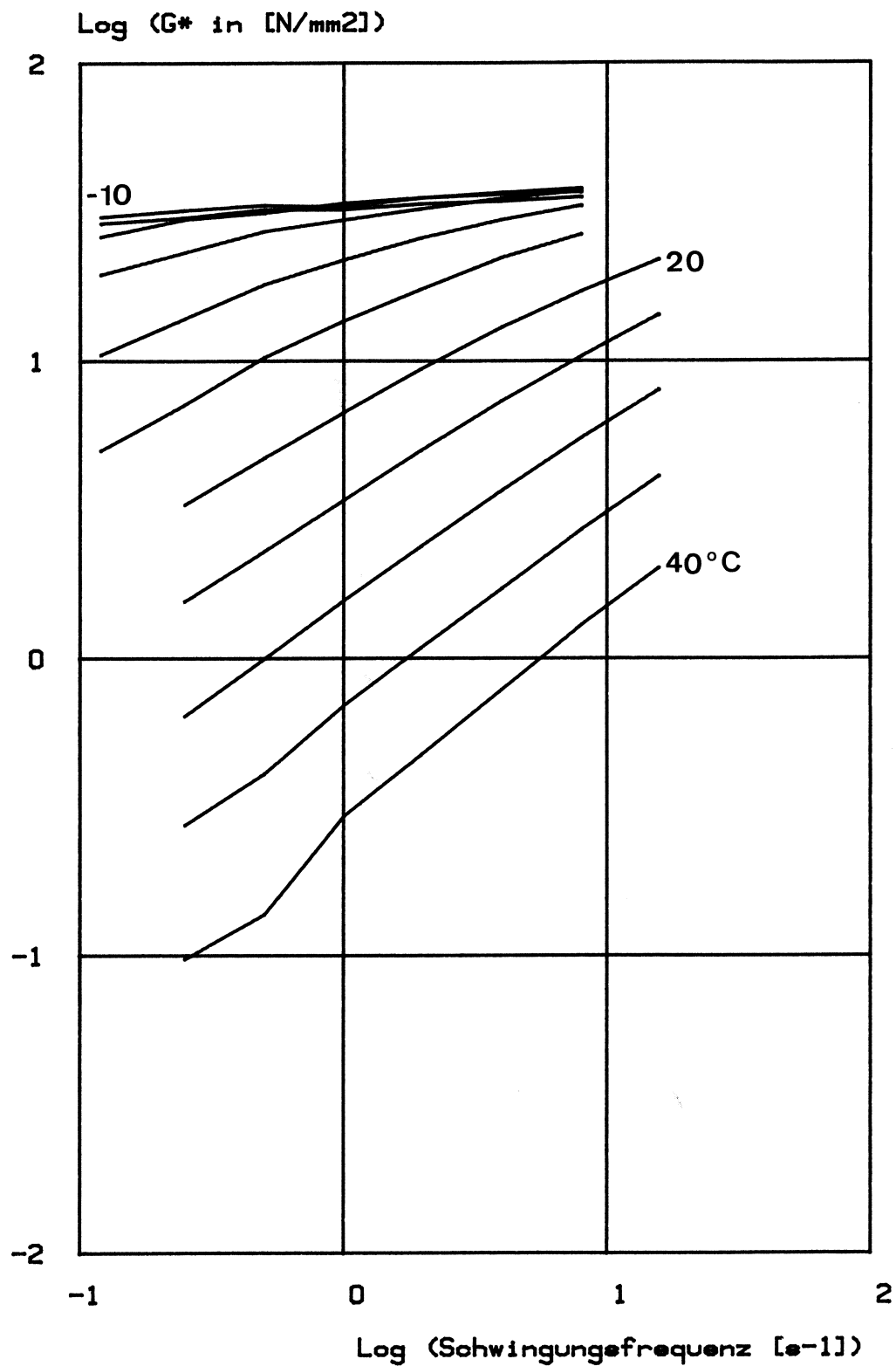
70% F

Komplexer Modul



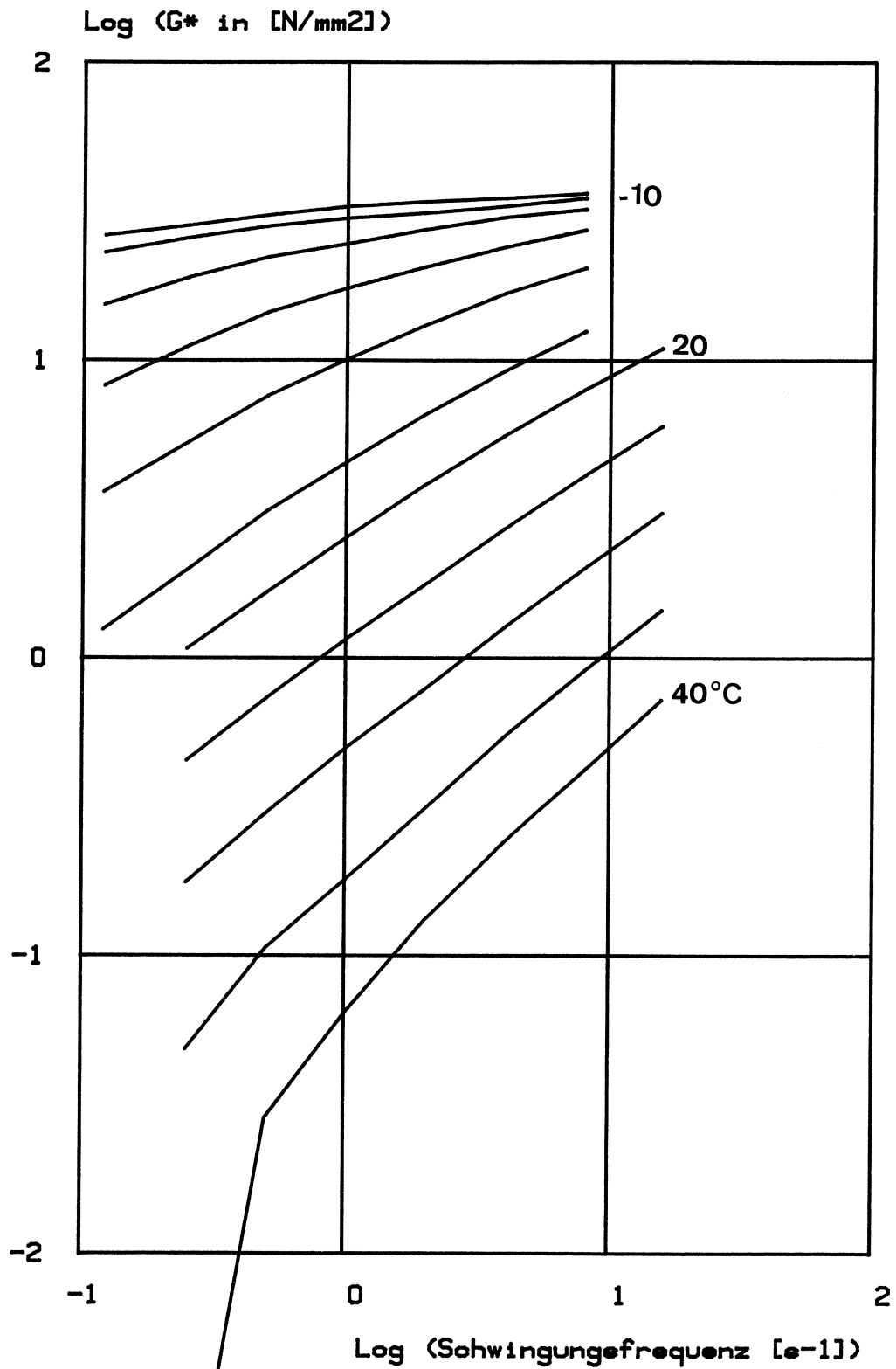
Fillergehalt und Sorte: 50% G

Komplexer Modul



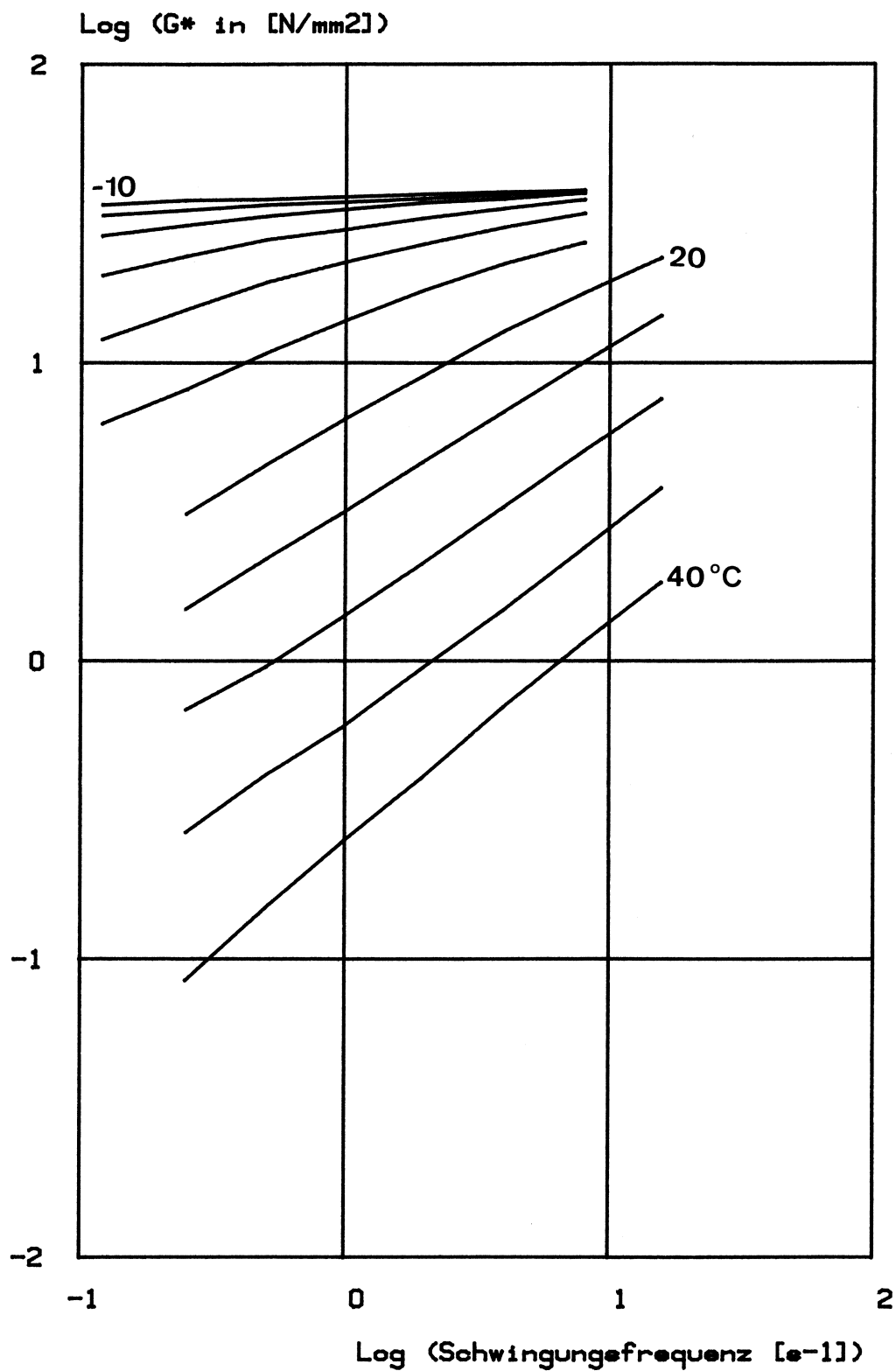
Fillergehalt und Sorte: 70% G

Komplexer Modul

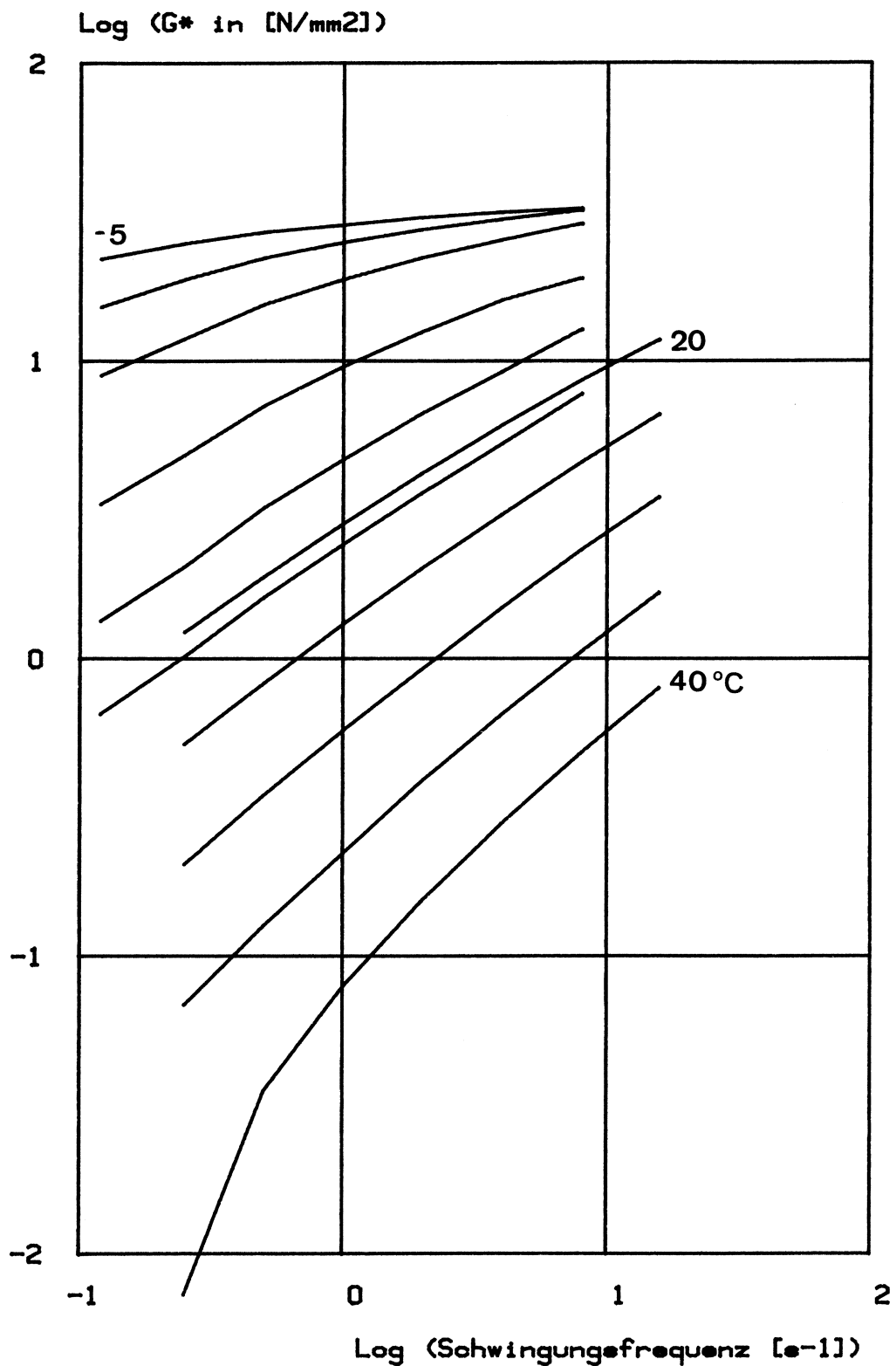


Fillergehalt und Sorte: 50% H

Komplexer Modul



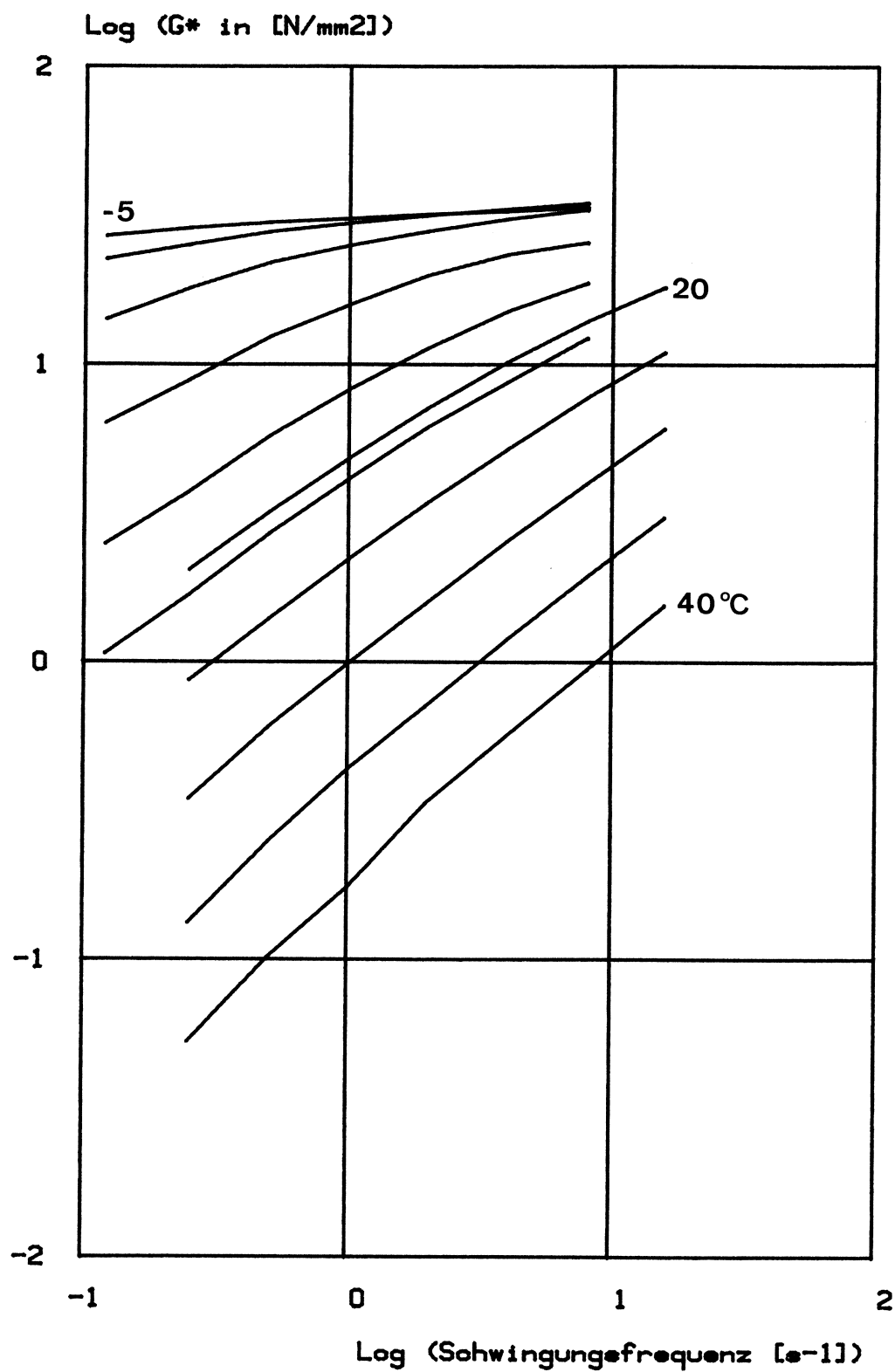
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

50% K

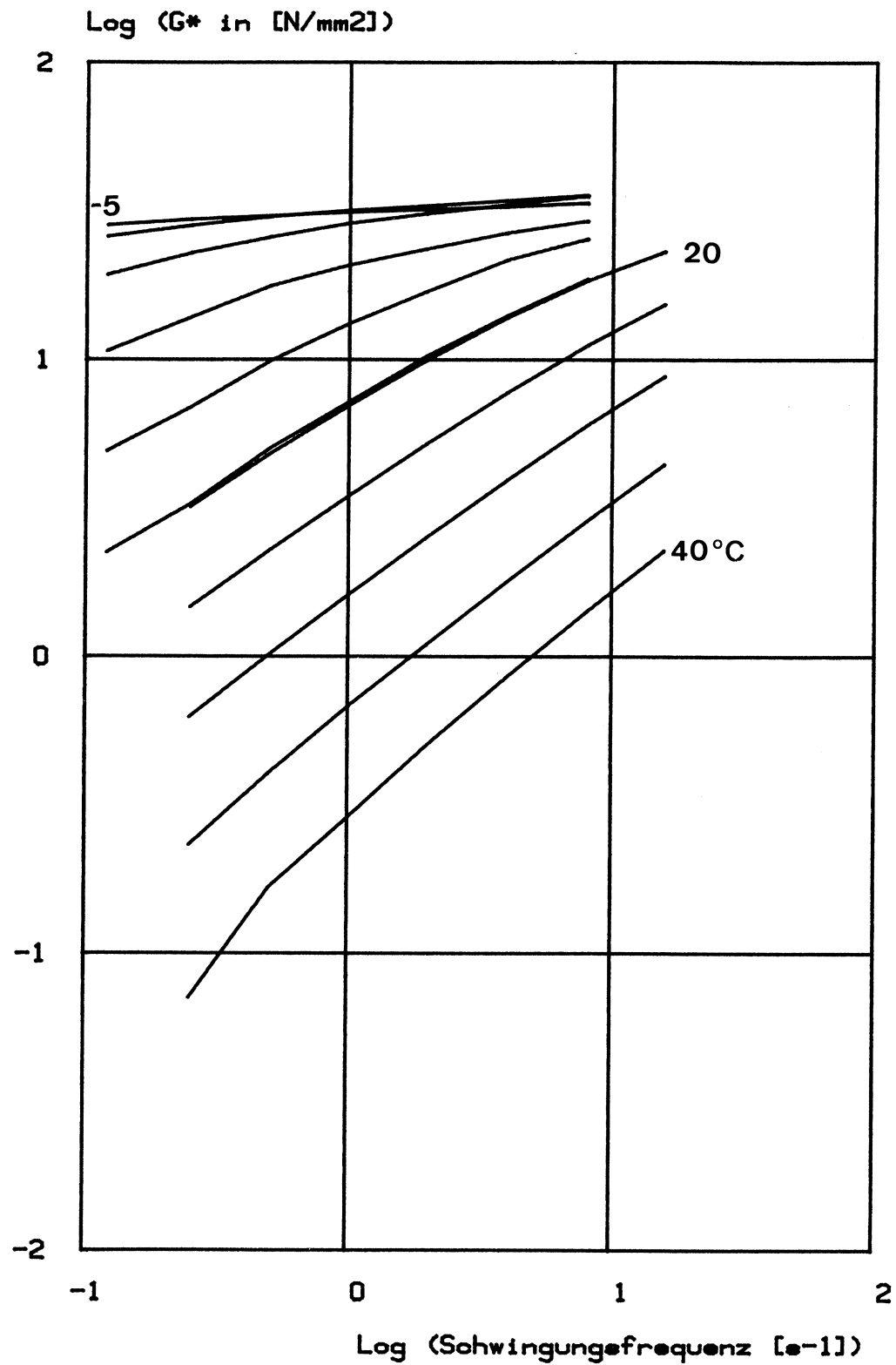
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

65% K

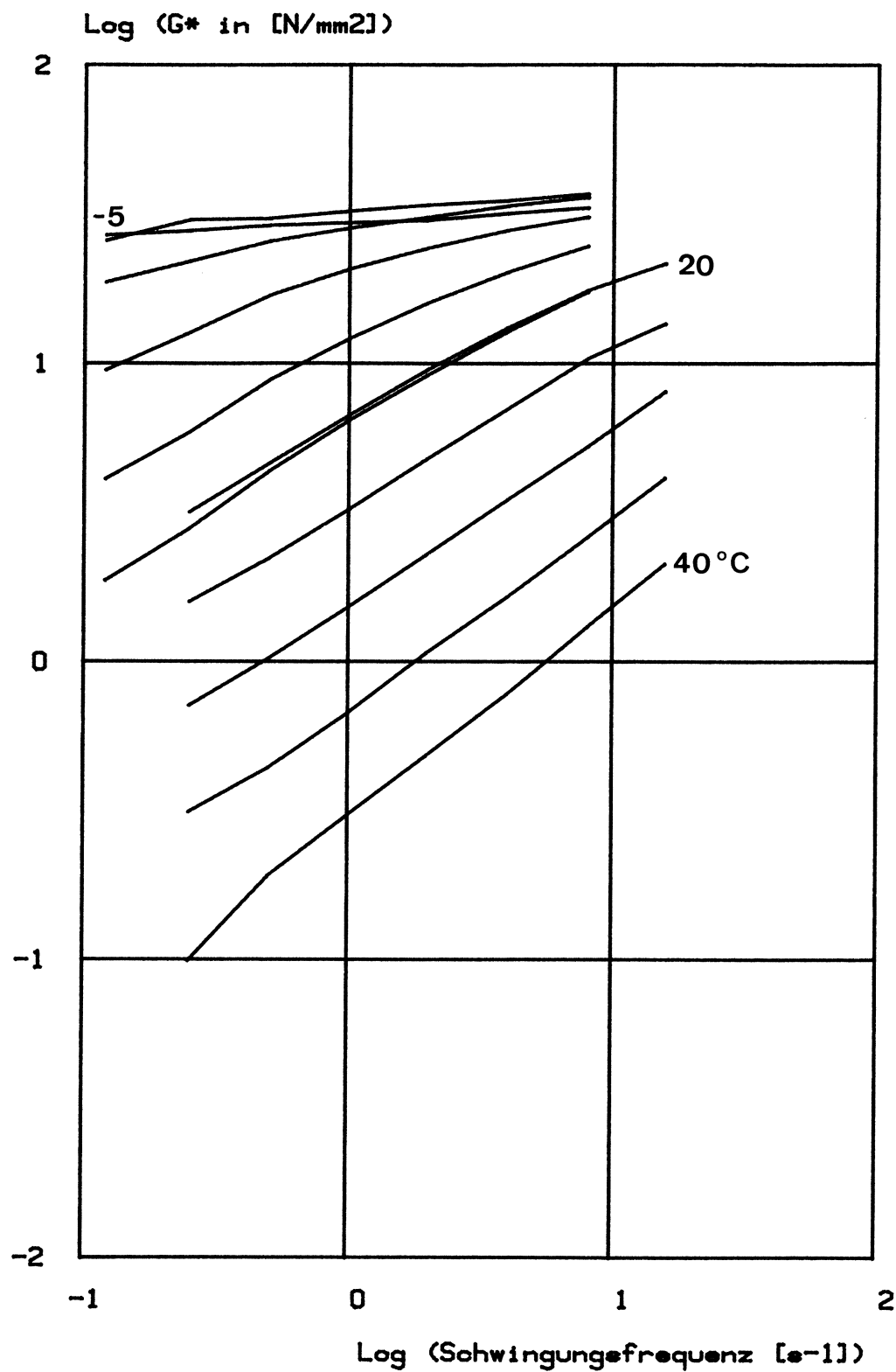
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

70% K

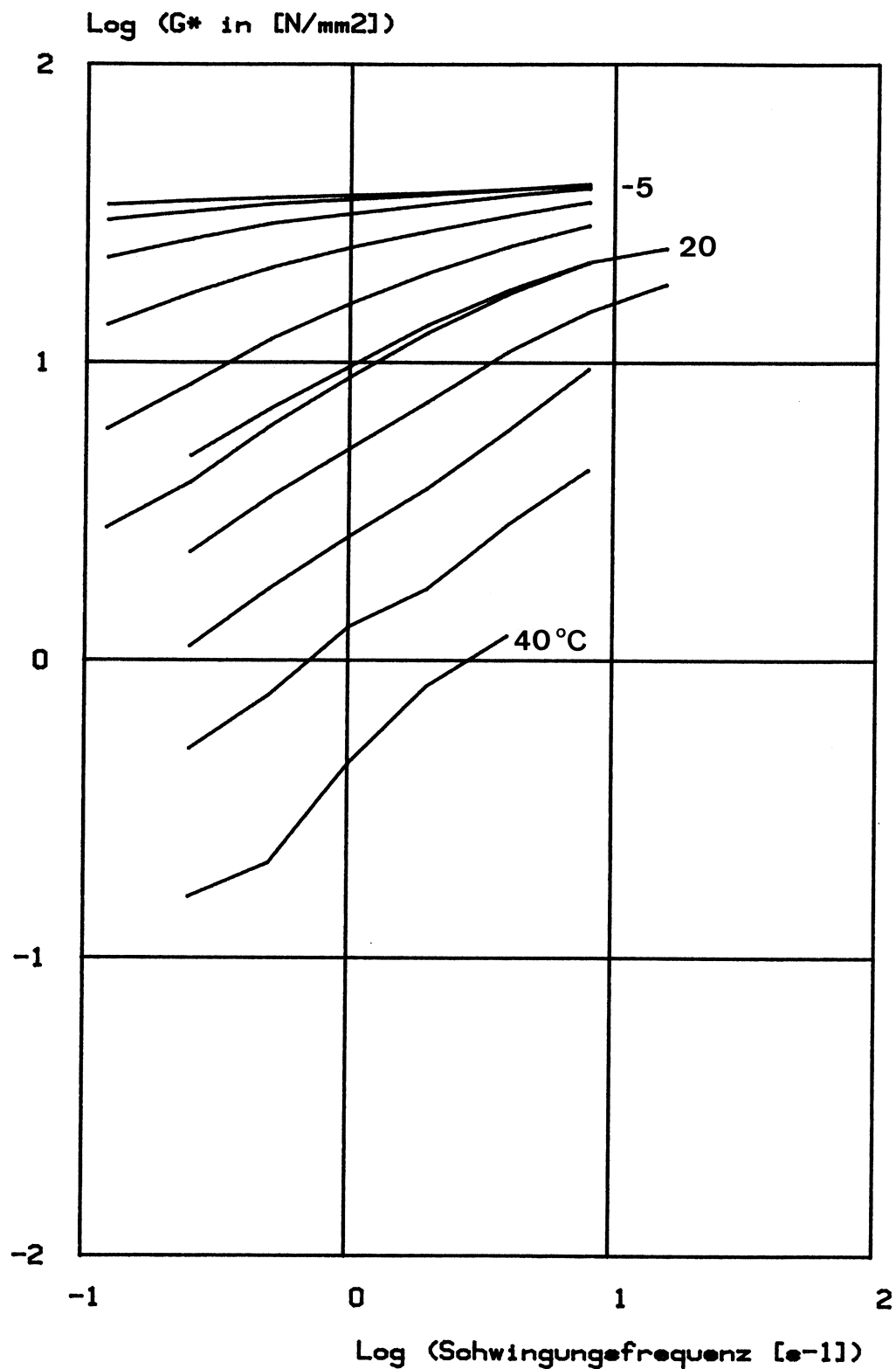
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

70% K Wiederholung

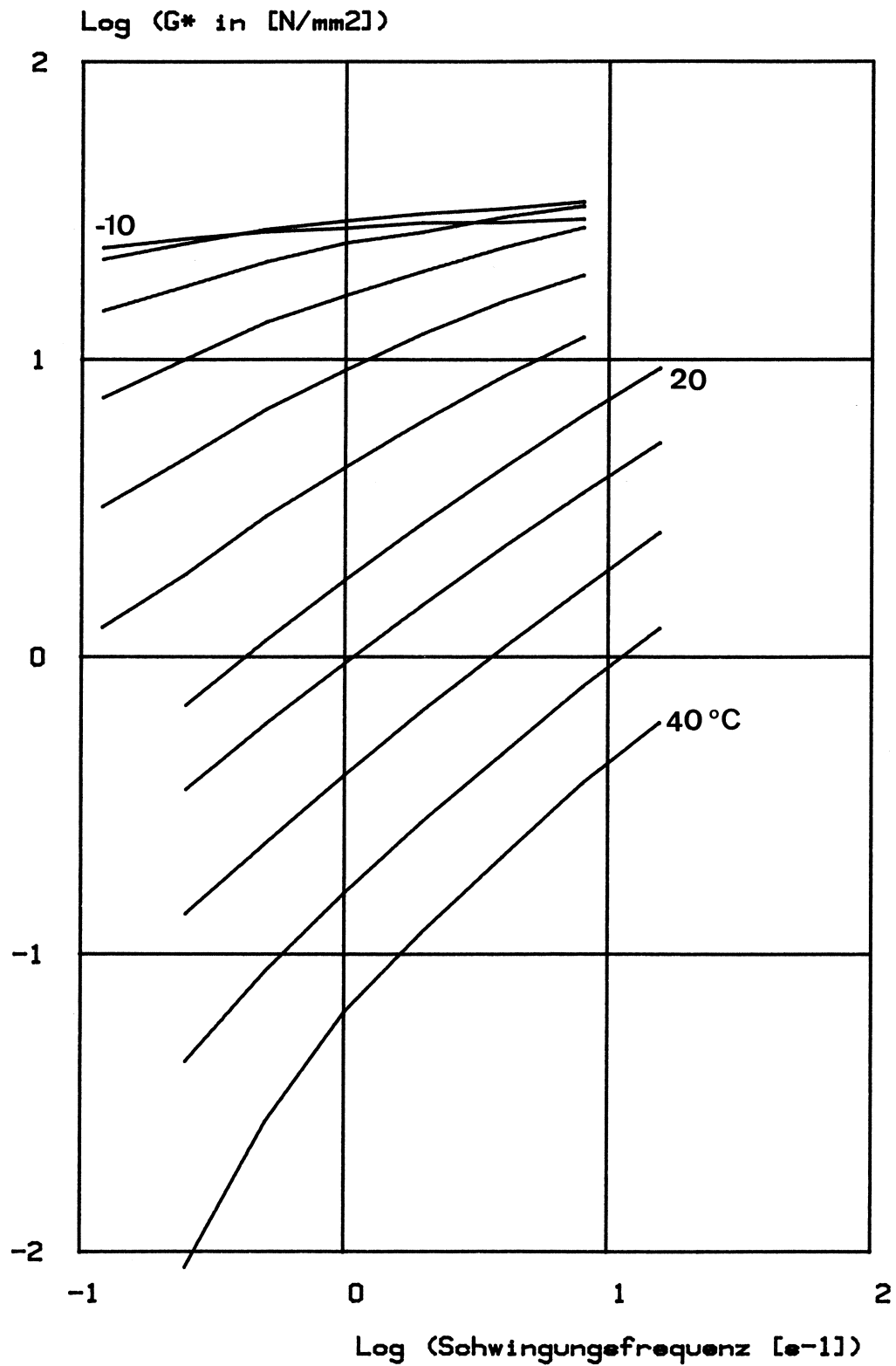
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

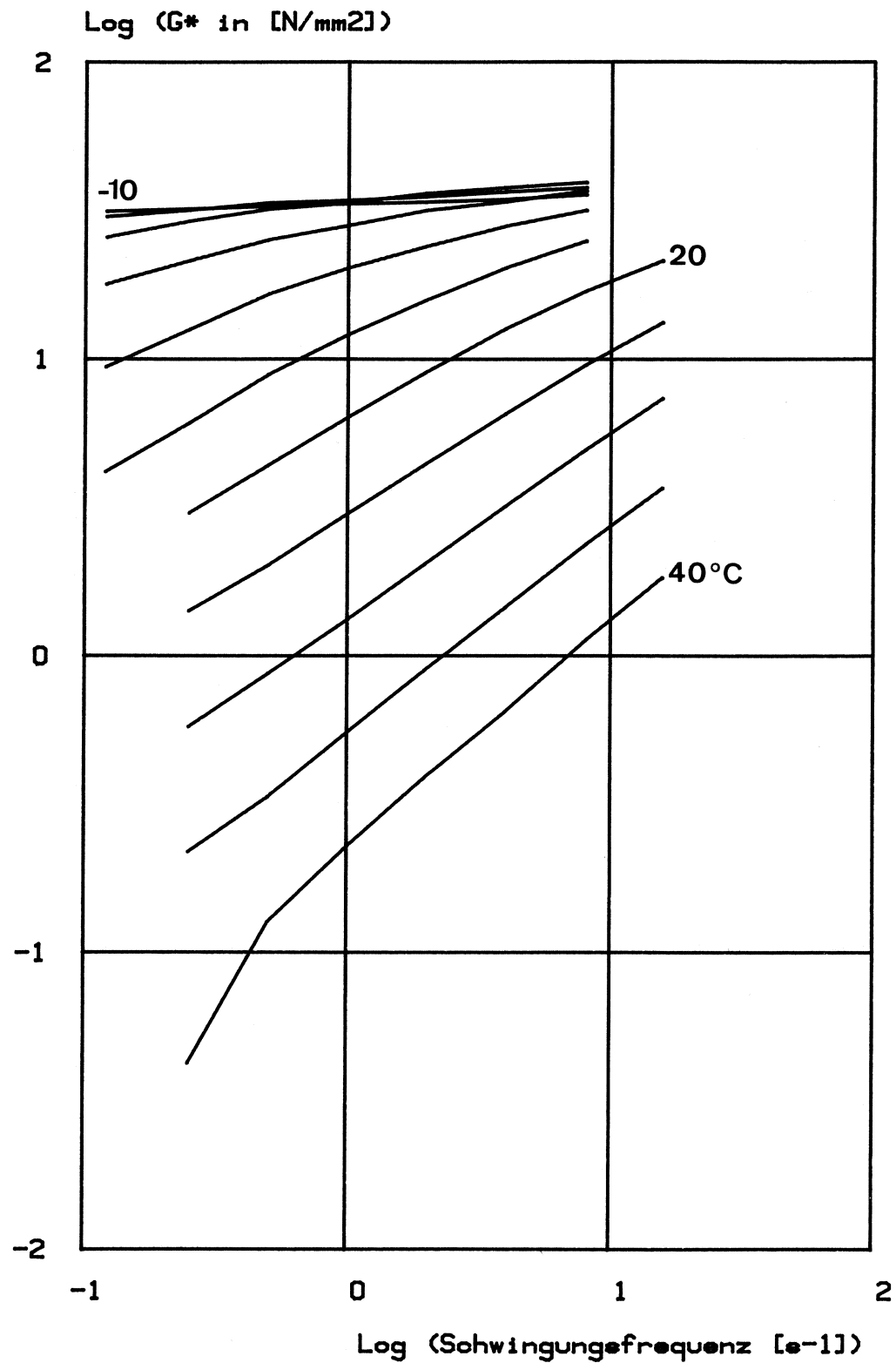
75% K

Komplexer Modul



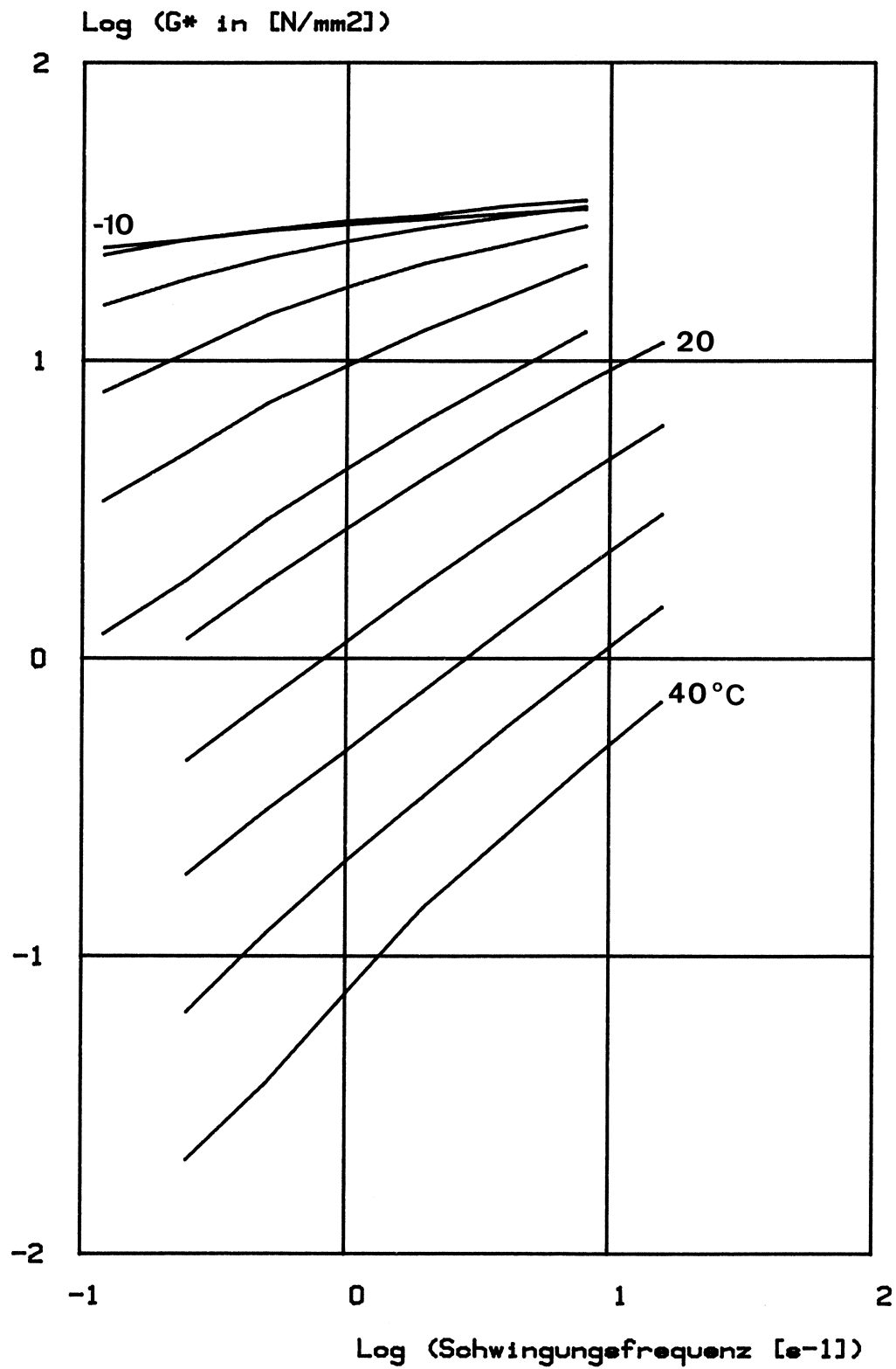
Fillergehalt und Sorte: 50% M

Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorte: 70% M

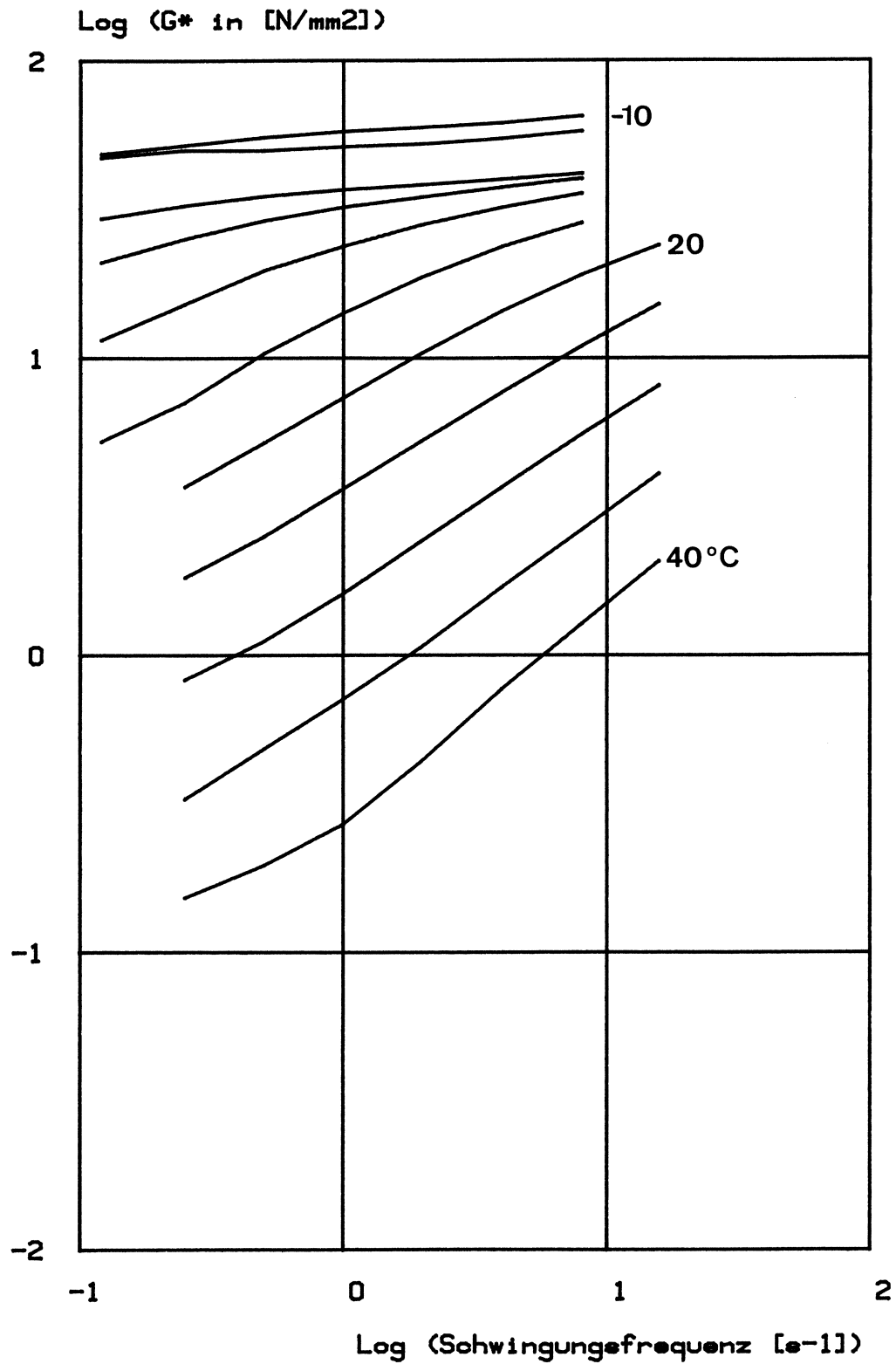
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

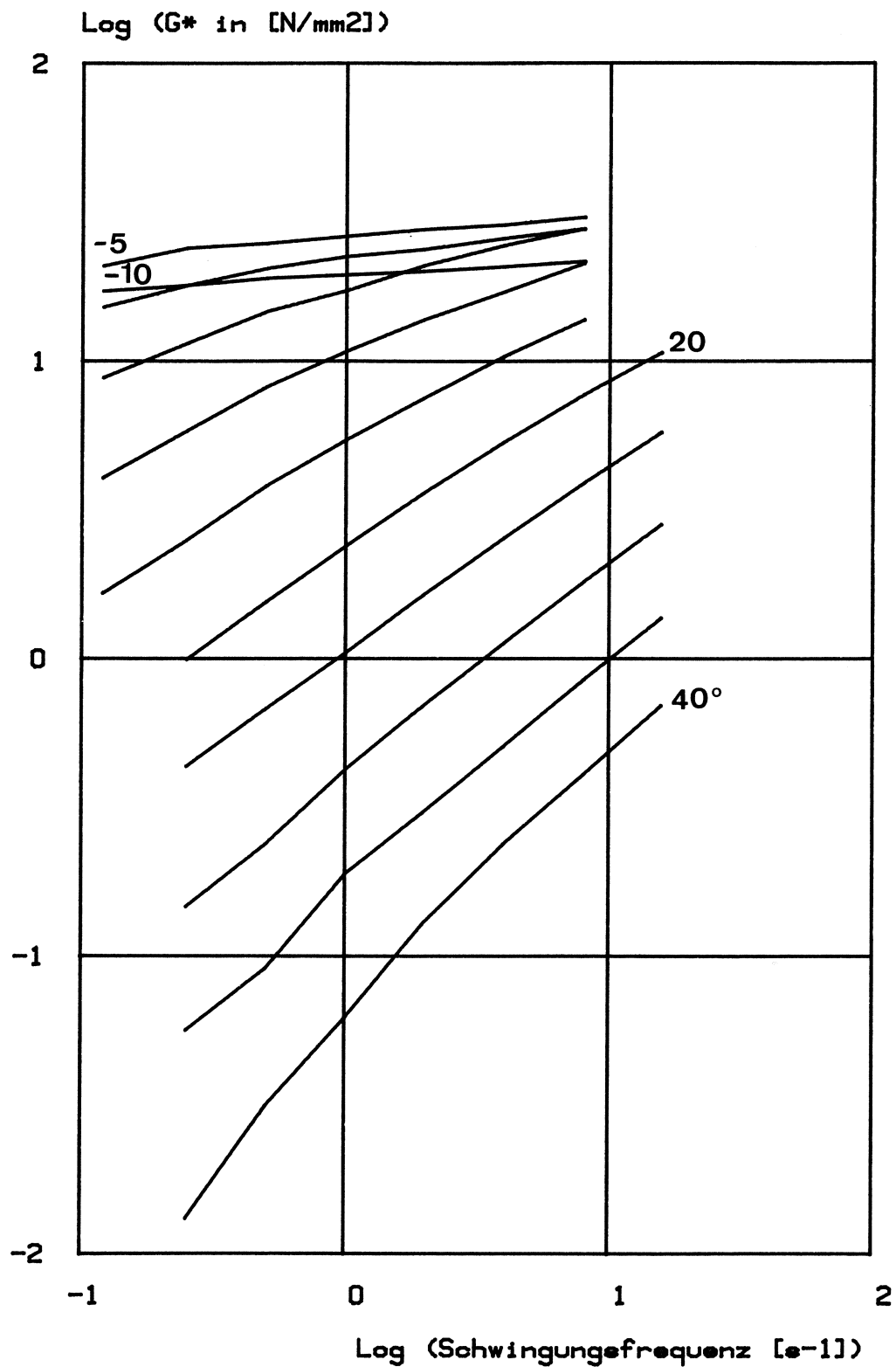
50% N

Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorte: 70% N

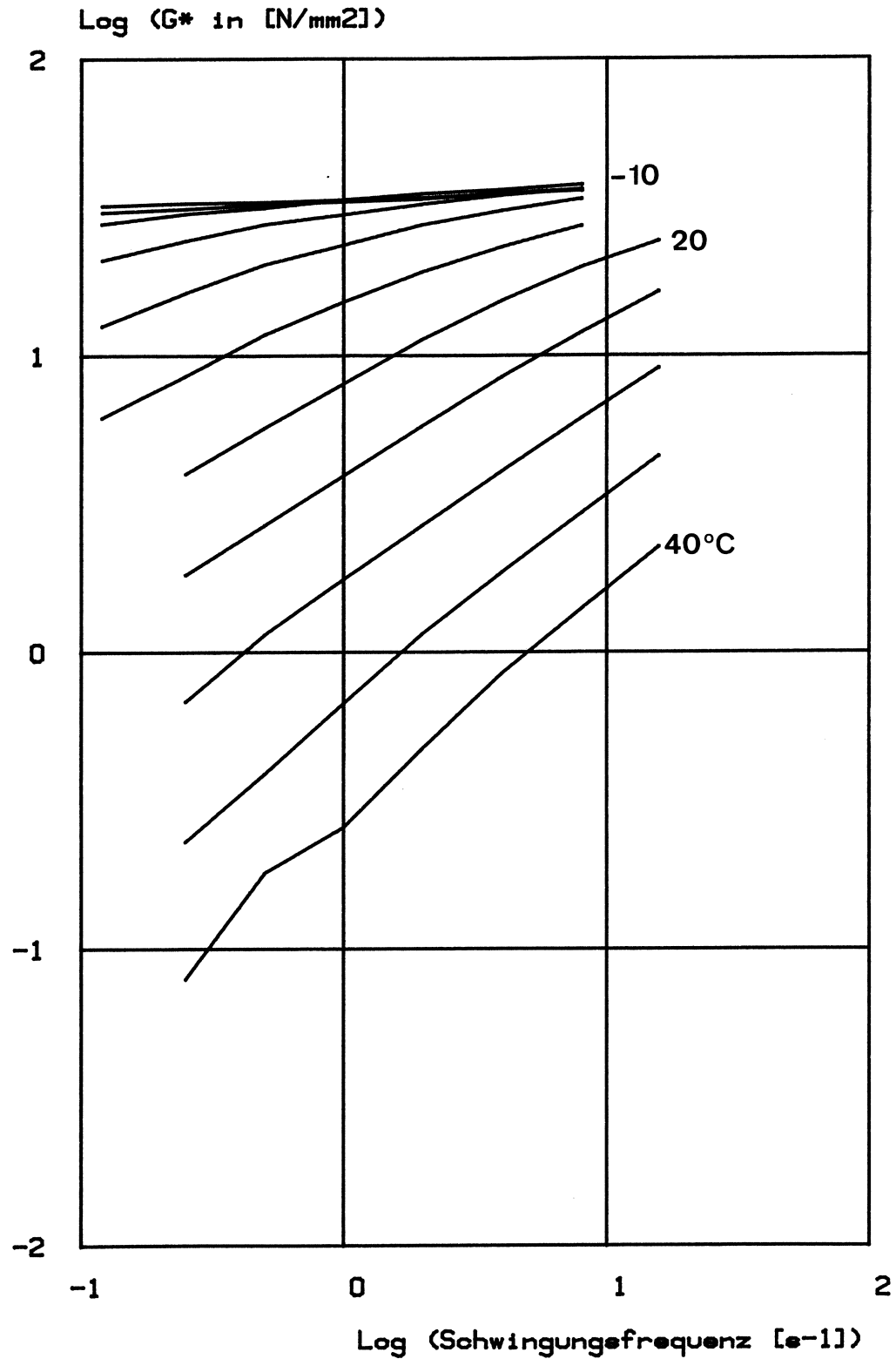
Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorten:

50% 0

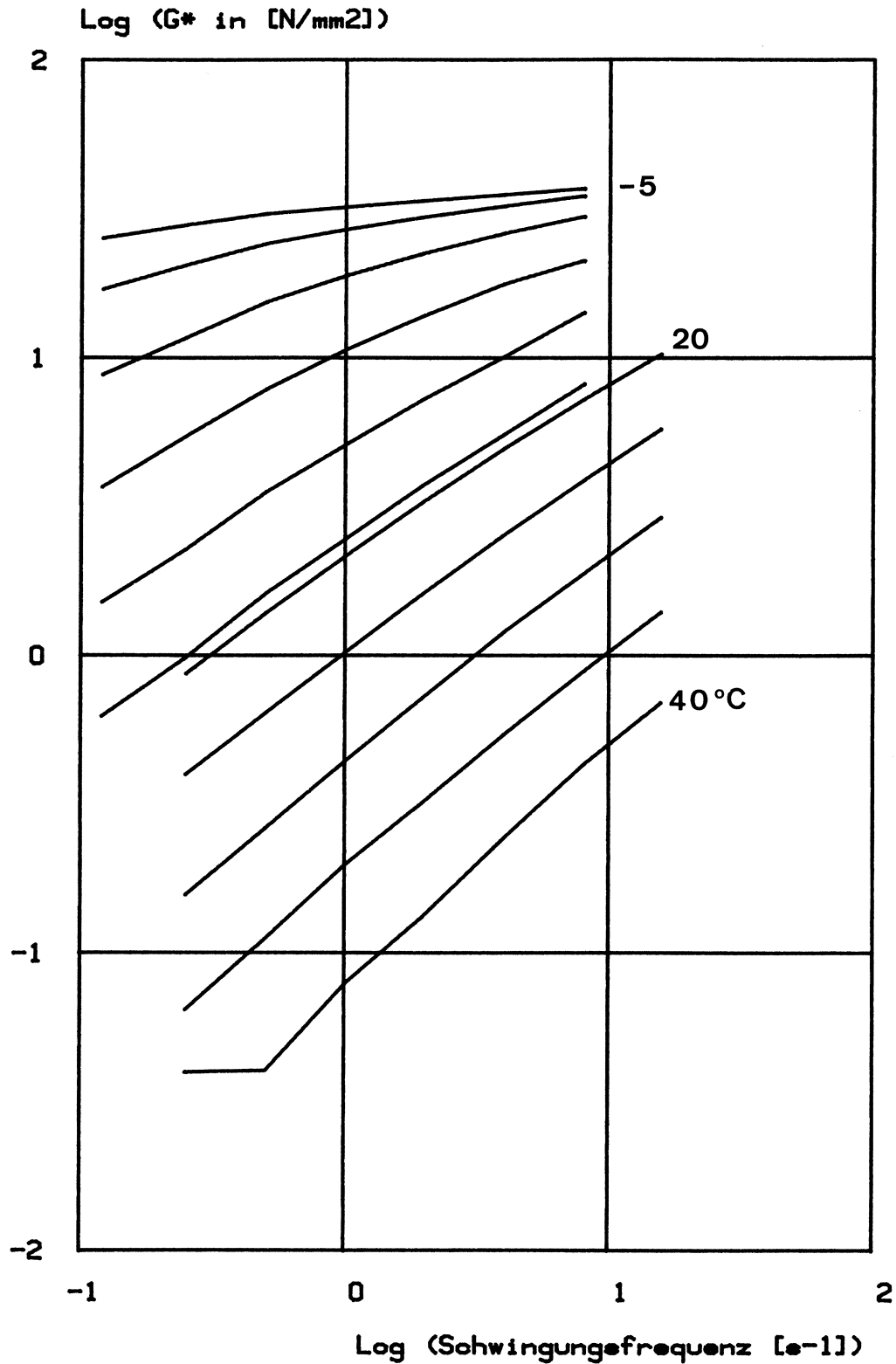
Komplexer Modul



Fillergehalt und Sorten:

70% 0

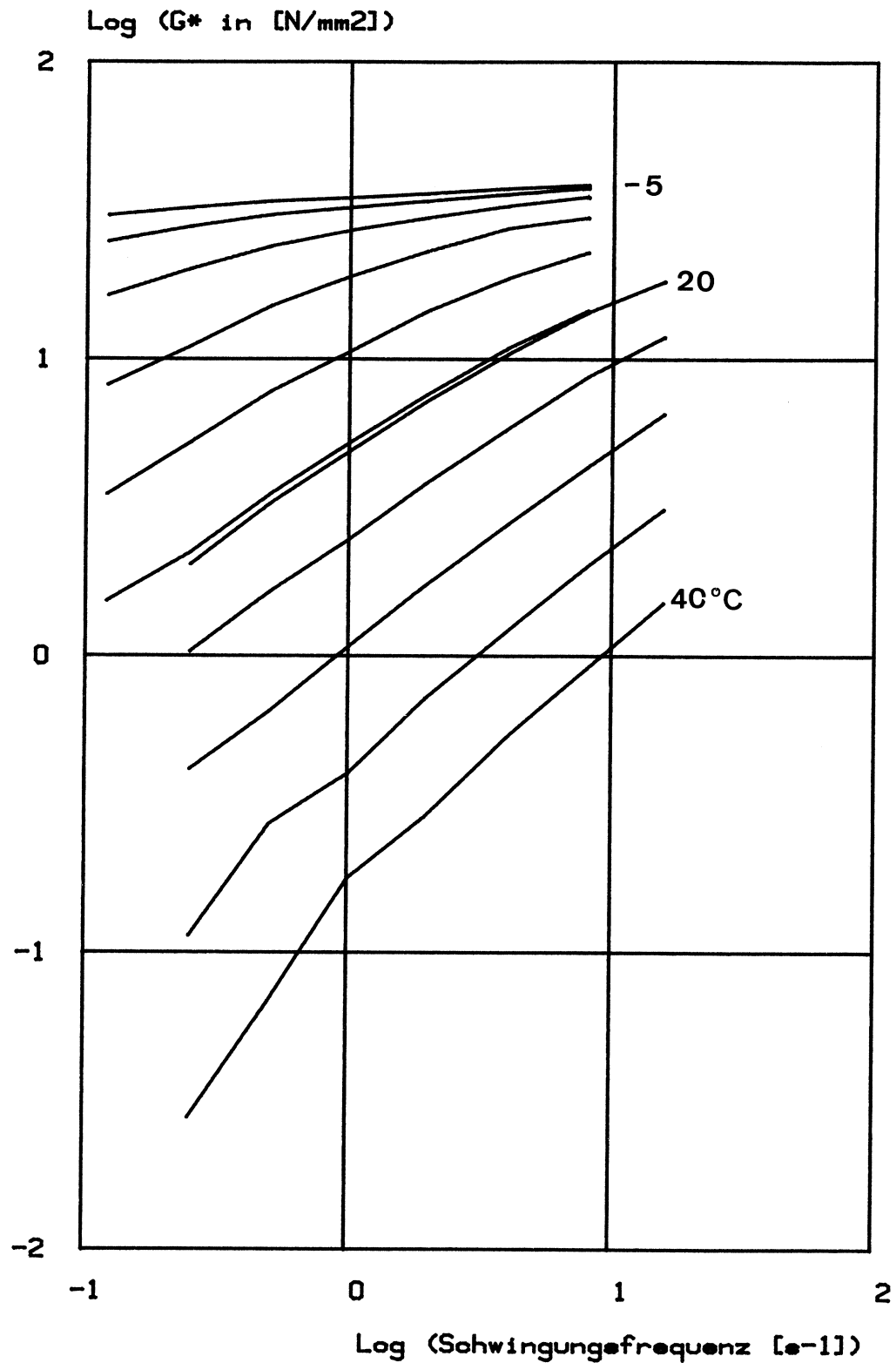
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

50% Q

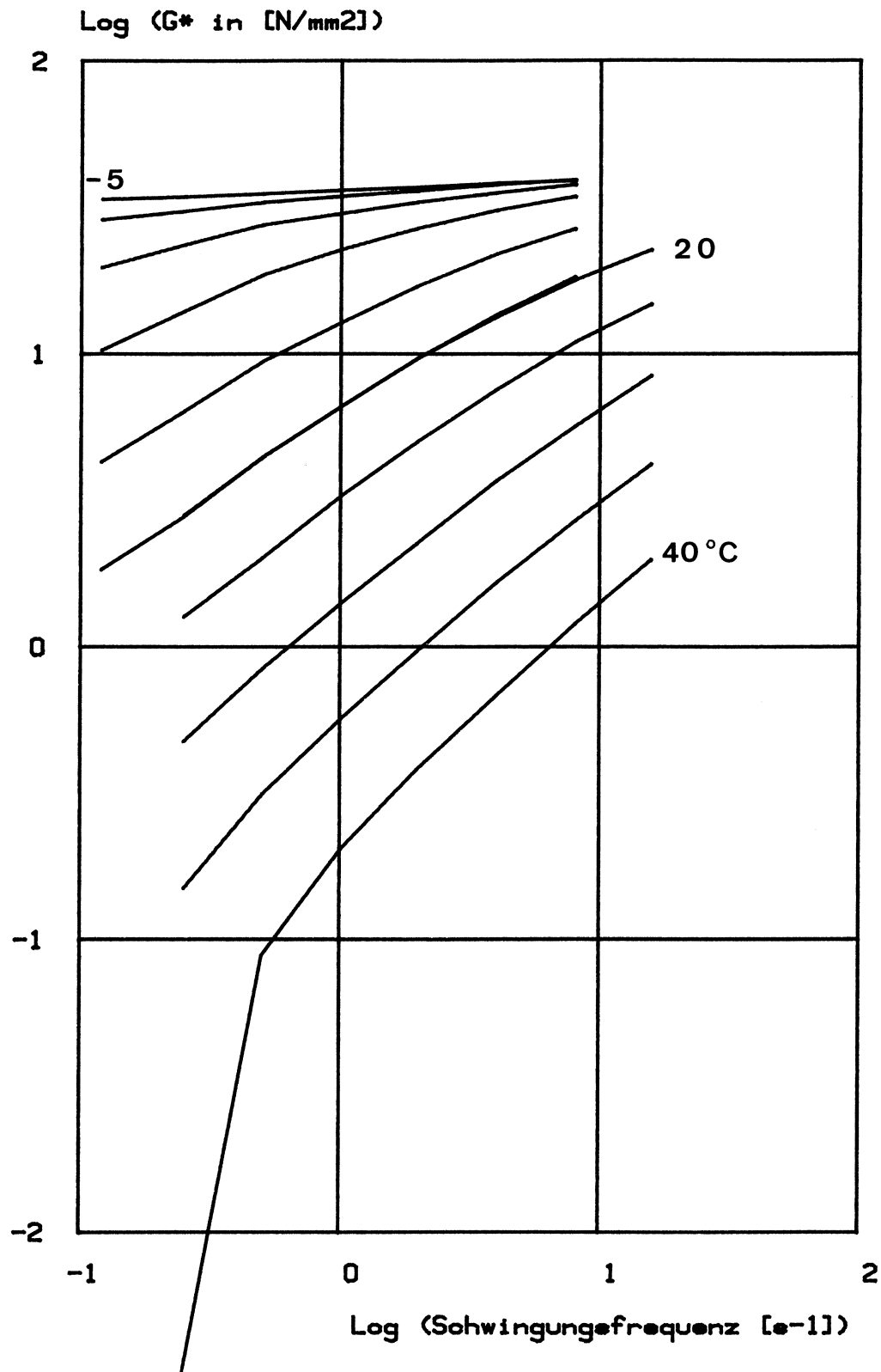
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

65% Q

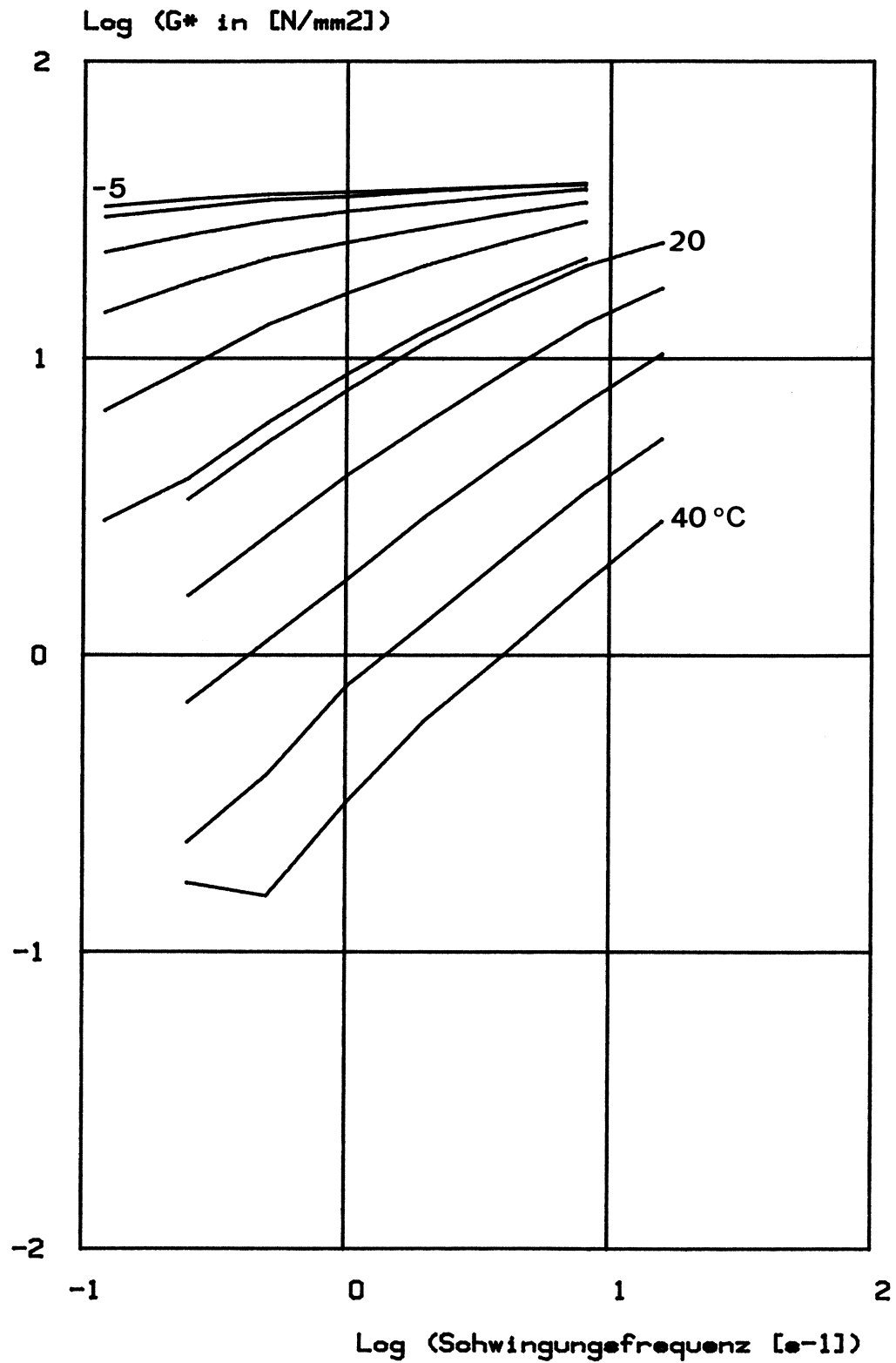
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

70% Q

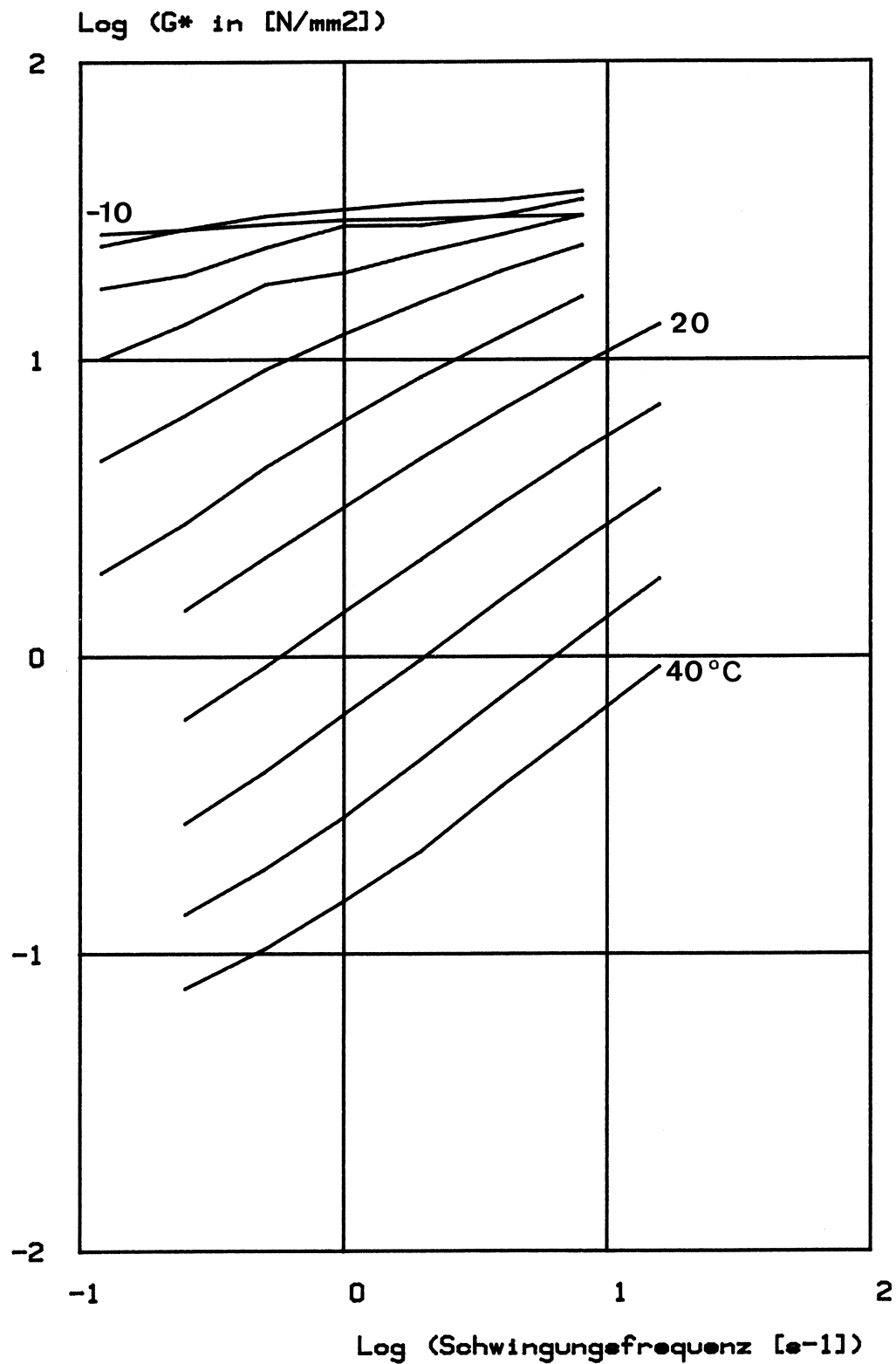
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

75% Q

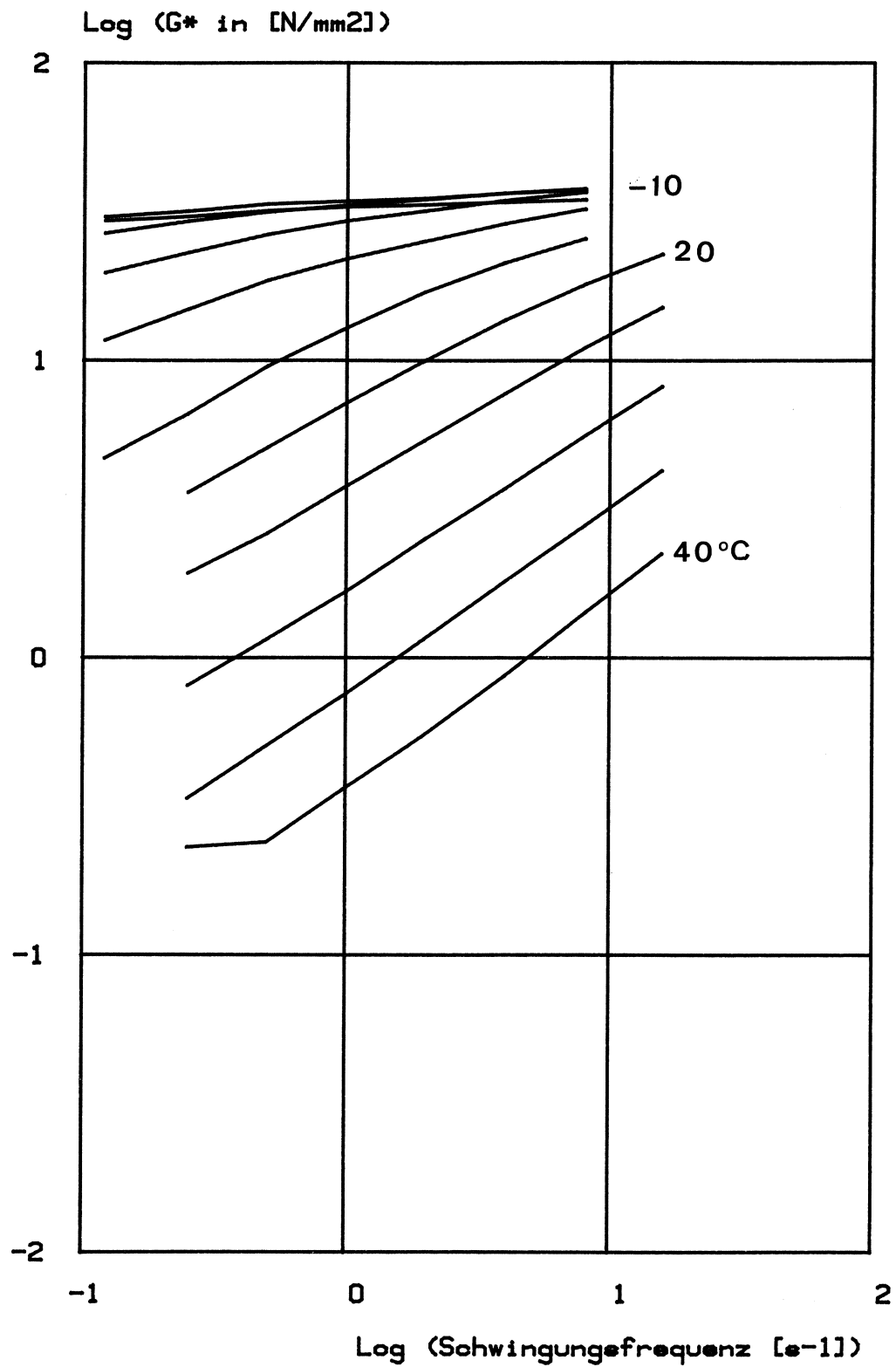
Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorten:

50% T

Komplexer Modul



Füllergehalt und Sorte:

65% T

2. Bestimmen der Belastungsempfindlichkeit

Belastungsempfindlichkeiten wurden aus den Bestimmungen der mechanischen Kennwerte aufgrund der Modulabnahme ermittelt. Auf eine Berechnung wurde jeweils verzichtet, wenn die Streuung der 6 Einzelwerte die Grössenordnung der Abnahme erreichte. Ausgewertet wurden jeweils die Frequenzen 0.25, 0.5 und 1 Hertz bei 20 °C sowie 0.25 und 0.5 Hertz bei 25 °C. Vereinzelt traten sehr unterschiedliche Werte auf, besonders beim Quarzfiller. Für die Filler B, E, K und Q sind die Resultate der zusätzlichen Prüfung auf Belastungsempfindlichkeit weiter unten ausführlich dargestellt. Es ergibt sich dabei für den Füllergehalt von 70 Masse-% die gleiche Reihenfolge von zunehmender Belastungsempfindlichkeit. Das lässt annehmen, dass zumindest der Wert für 70 Masse-% Quarzfiller richtig ist. Die trotz der sich stark unterscheidenden Prüfbedingungen (die Amplituden des Weges erstrecken sich über fast 2 Zehnerpotenzen) und der zwei verschiedenen Prüfverfahren ähnlichen Rangfolgen der Resultate von 50 und 70 Masse-% zeigen, dass die Belastungsempfindlichkeit eine Materialeigenschaft der Filler ist.

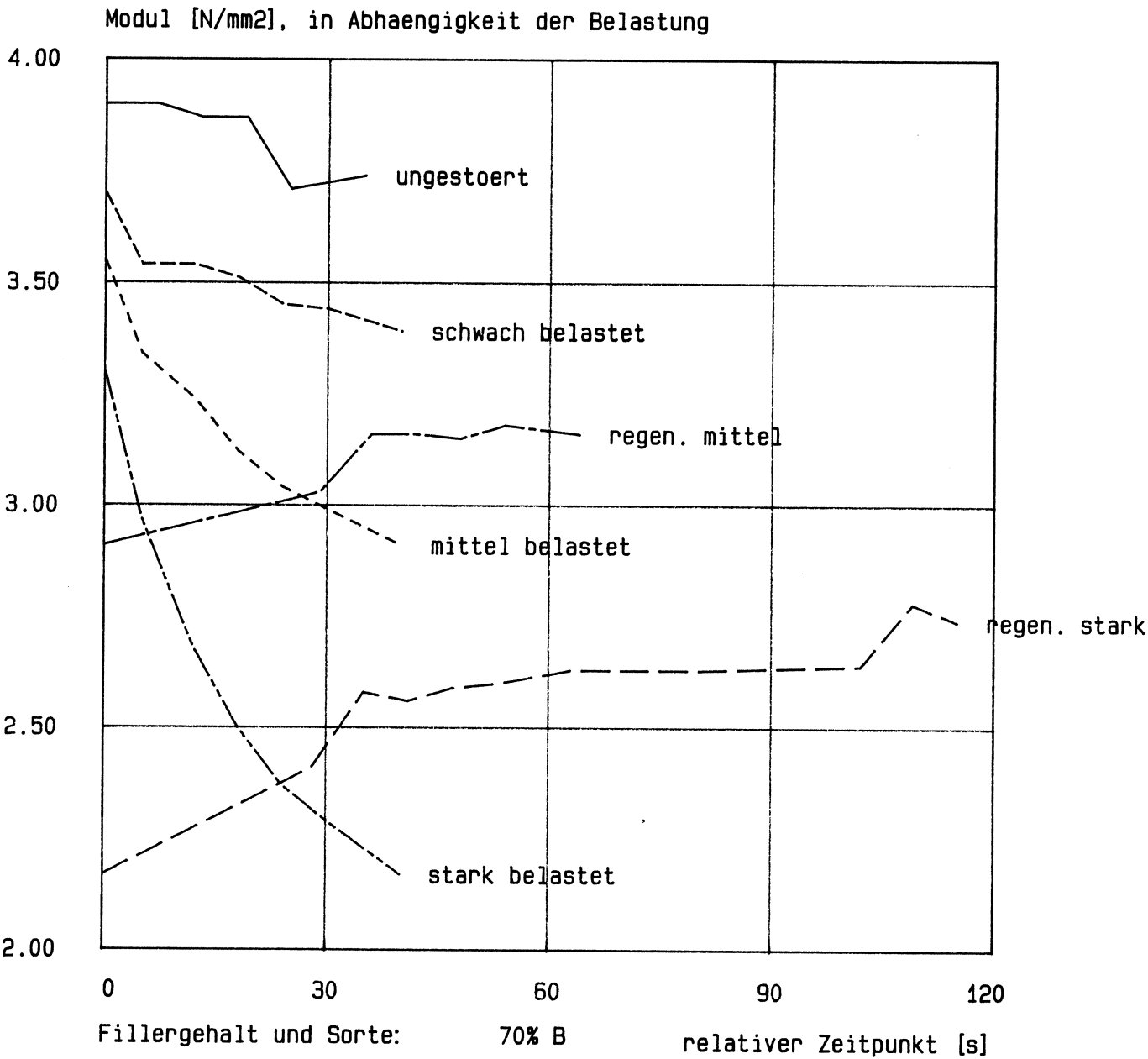
Details des Verhaltens unter Belastung zeigen die Resultate der für das Erfassen der Belastungsempfindlichkeit entwickelten Prüfpläne. Die gewählten Beispiele (3 Abbildungen mit Filler E in 65, 70 und 75 Masse-%) zeigen den dominierenden Einfluss von Füllergehalt. Der Vergleich der Mischungen mit je 70% Filler B, E, K und Q zeigt aber deutlich auch einen Einfluss der Füllersorte. So nimmt die Belastungsempfindlichkeit in der Q, K, E, B zu, während die Regenerierfähigkeit in der Reihe B, Q, E und K zunimmt. Der Filler B schneidet also gemäss dieser graphischen Bewertung schlecht ab, der Kalkfiller K dagegen gut.

Tabelliert sind auf der nächsten Seite die Anzahl der Messpakete, die untersucht wurden, die Anzahl jener, die ausgewertet werden könnten, das Mittel und die Streuung.

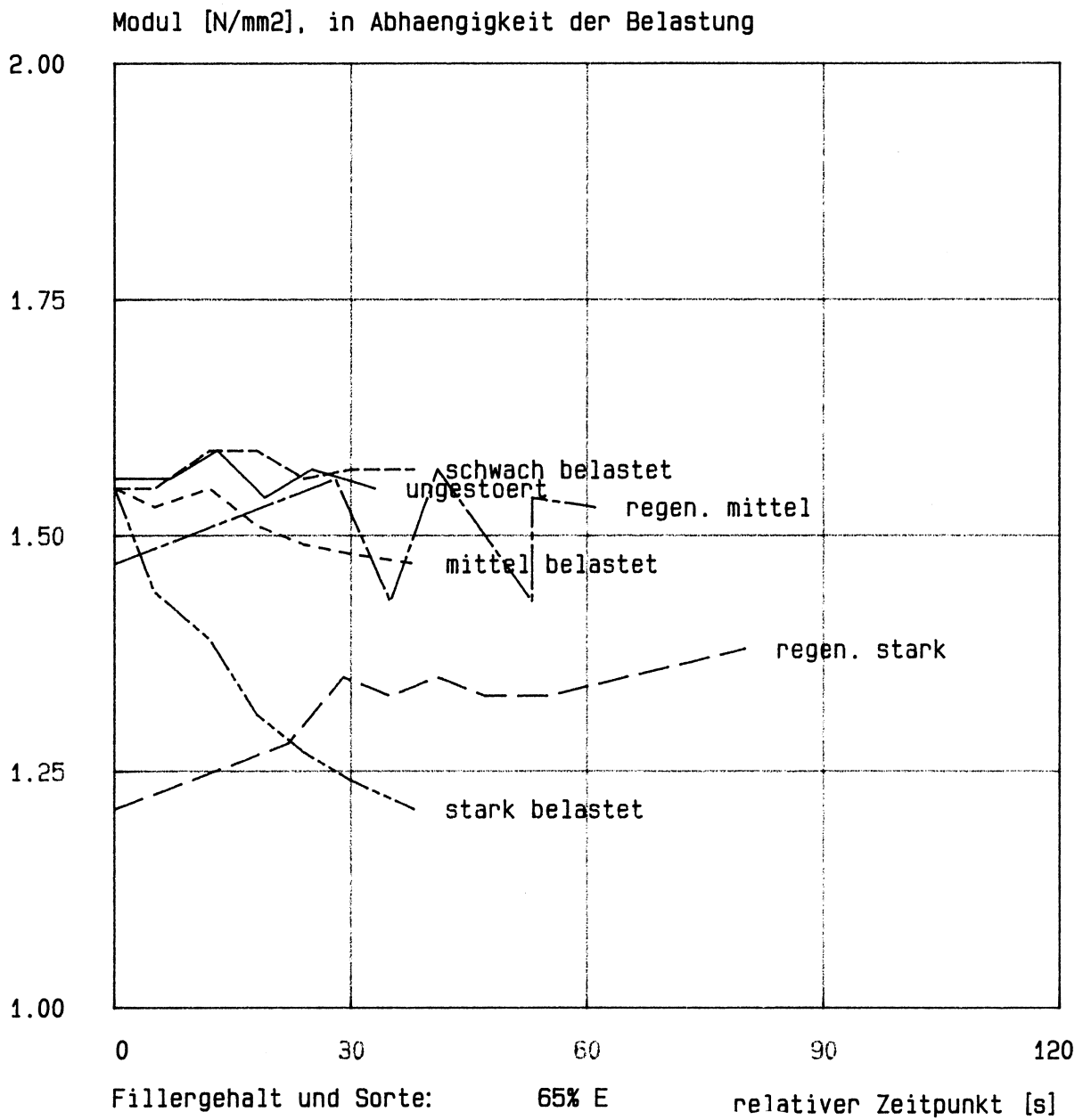
Belastungsempfindlichkeit

Filler	Gehalt	Messpakete		Belastungsempfindlichkeit	Streuung
	Masse-%	im Bereich Anzahl	auswertbar Anzahl		
				mm ⁻¹ · s ⁻¹	mm ⁻¹ · s ⁻¹
A	50	5	3	0.012	0.006
	70	5	3	0.057	0.017
B	50	5	1	0.024	--
	65	5	4	0.128	0.024
	70	5	3	0.174	0.065
C	50	5	4	0.013	0.006
	65	5	4	0.030	0.015
	75	10	7	0.066	0.020
D	50	5	2	0.017	--
	70	5	3	0.065	0.033
E	65	5	2	0.039	--
	70	5	4	0.170	0.007
F	50	5	3	0.020	0.004
	70	5	3	0.052	0.016
G	50	5	2	0.020	--
	70	10	5	0.065	0.010
H	50	5	3	0.010	0.004
	70	10	8	0.132	0.024
K	50	5	3	0.015	0.004
	70	5	4	0.067	0.014
M	50	5	2	0.009	--
	70	5	4	0.057	0.015
N	50	5	2	0.020	--
	70	5	5	0.101	0.022
O	70	5	4	0.108	0.047
Q	50	5	2	0.057	--
	65	5	1	0.129	--
	70	5	2	0.043	--
	75	5	3	0.100	0.071
T	50	5	3	0.019	0.003
	65	5	3	0.084	0.014

Belastungsempfindlichkeit

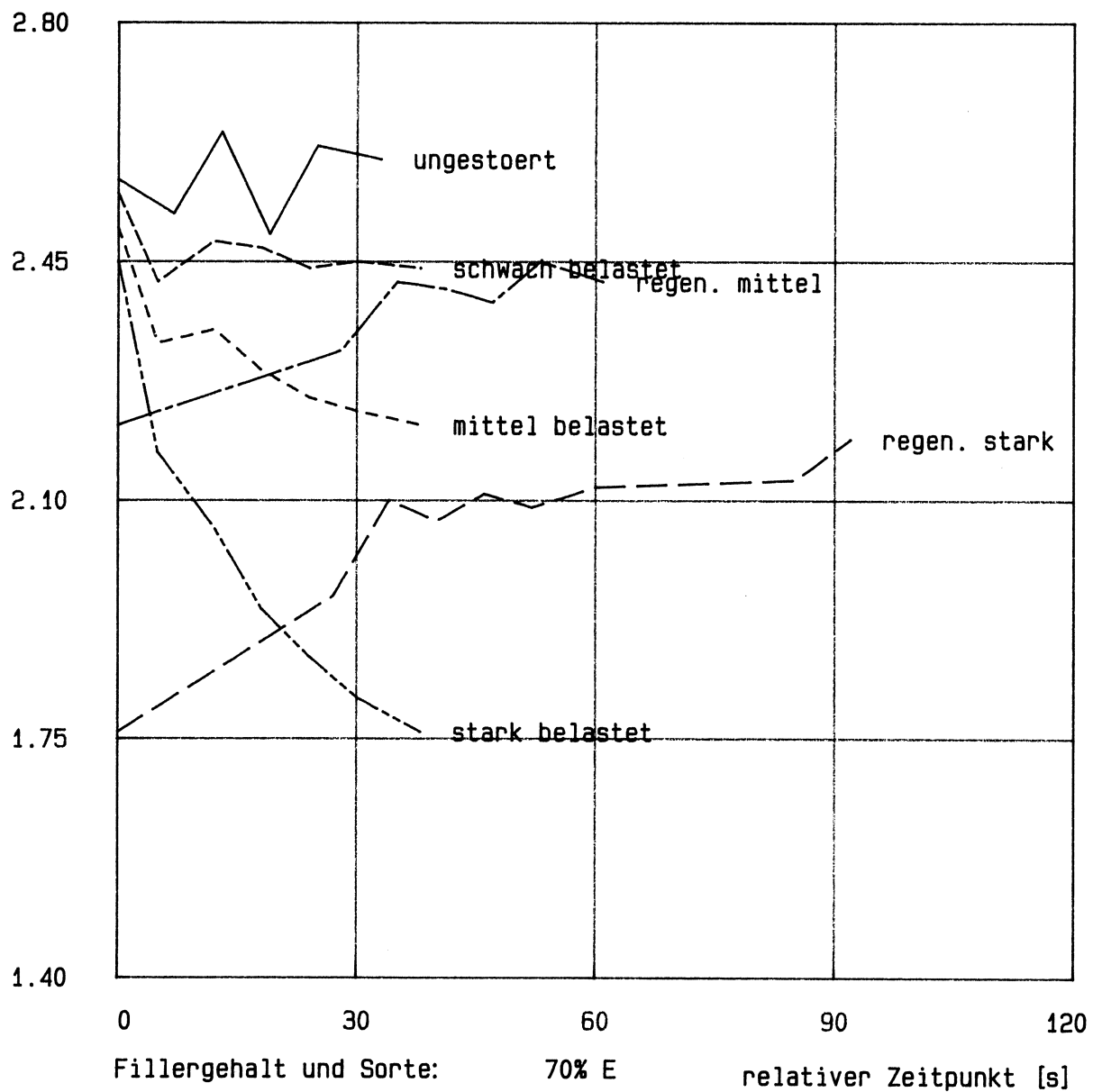


Belastungsempfindlichkeit



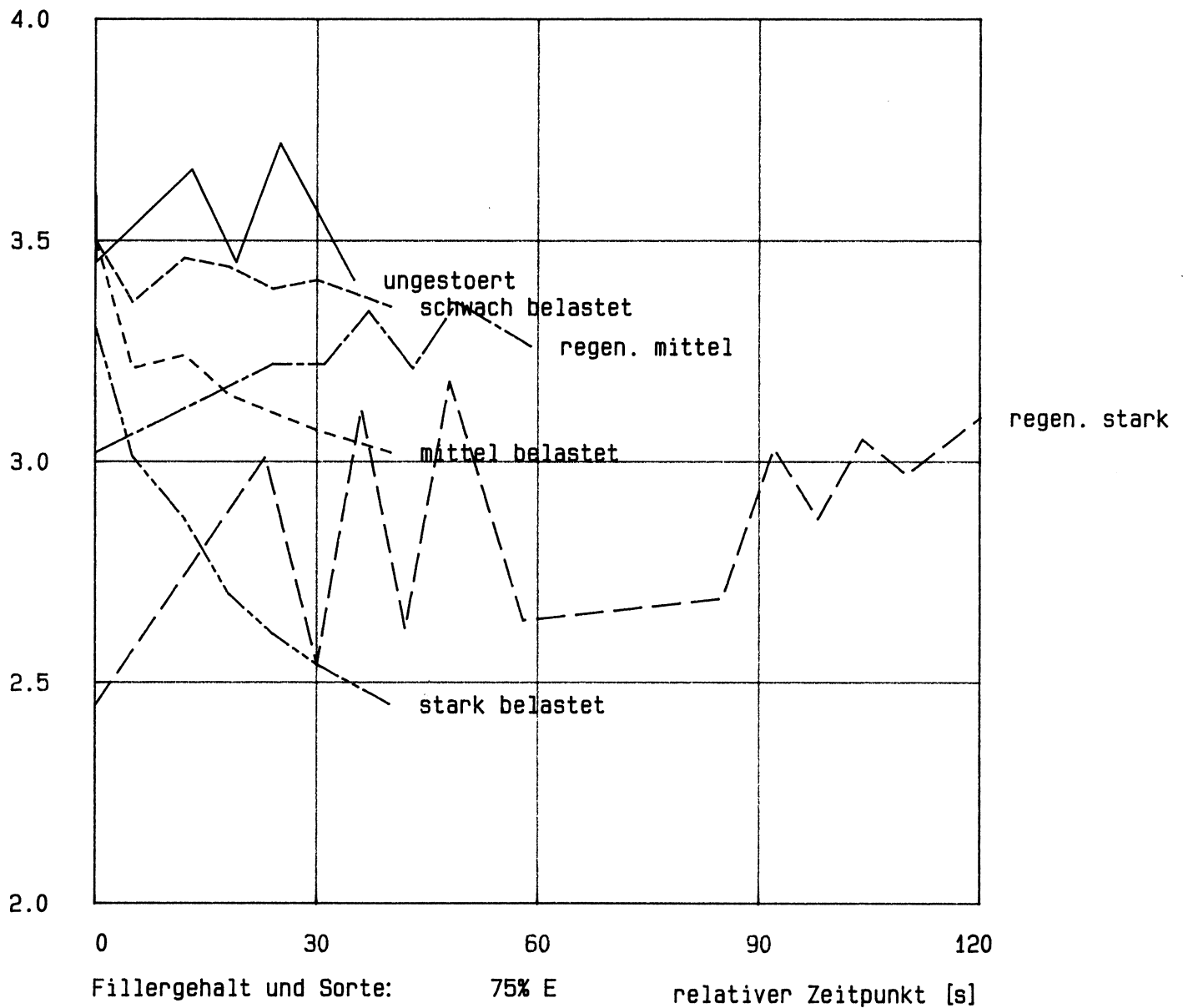
Belastungsempfindlichkeit

Modul [N/mm²], in Abhängigkeit der Belastung



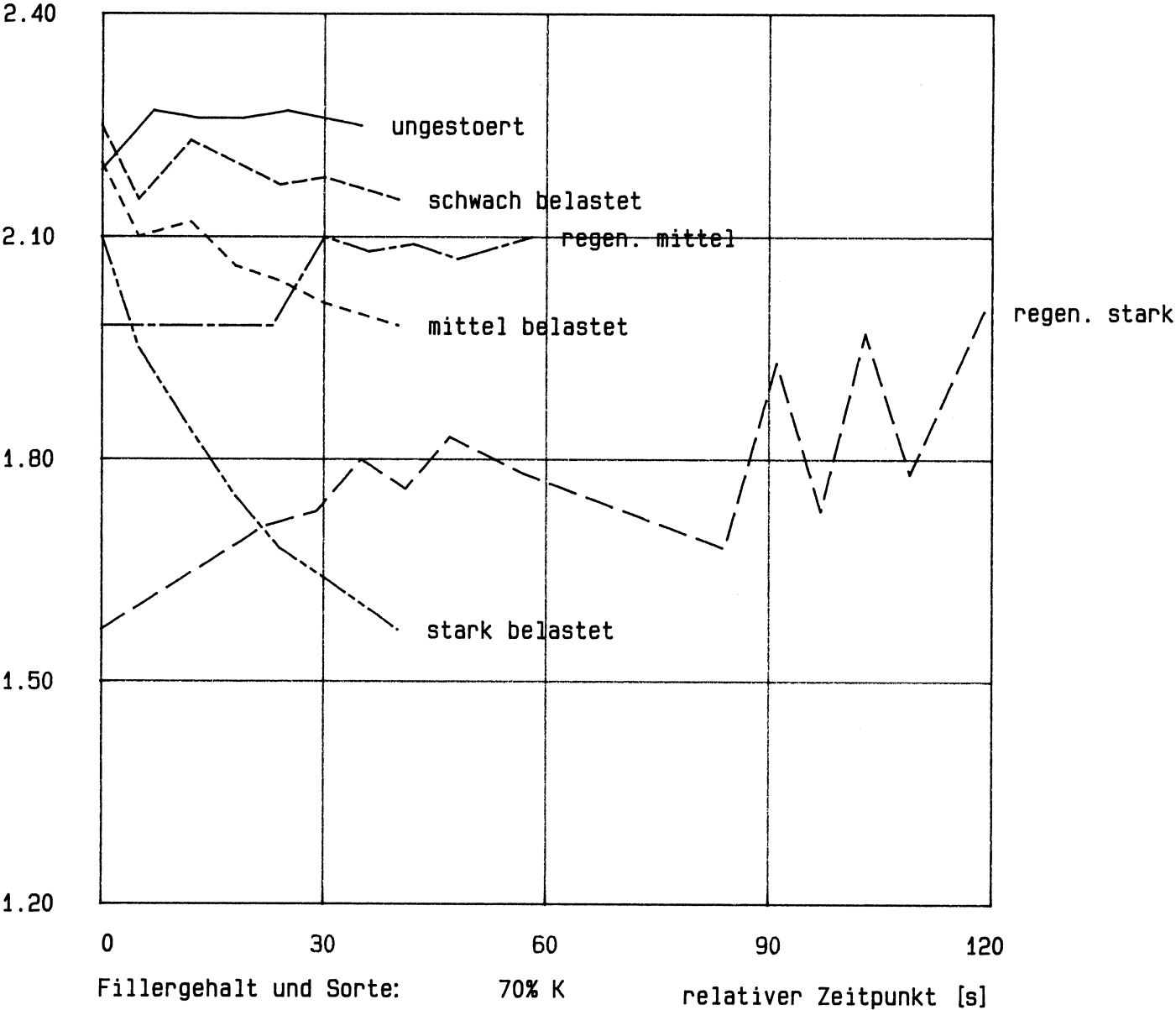
Belastungsempfindlichkeit

Modul [N/mm²], in Abhängigkeit der Belastung



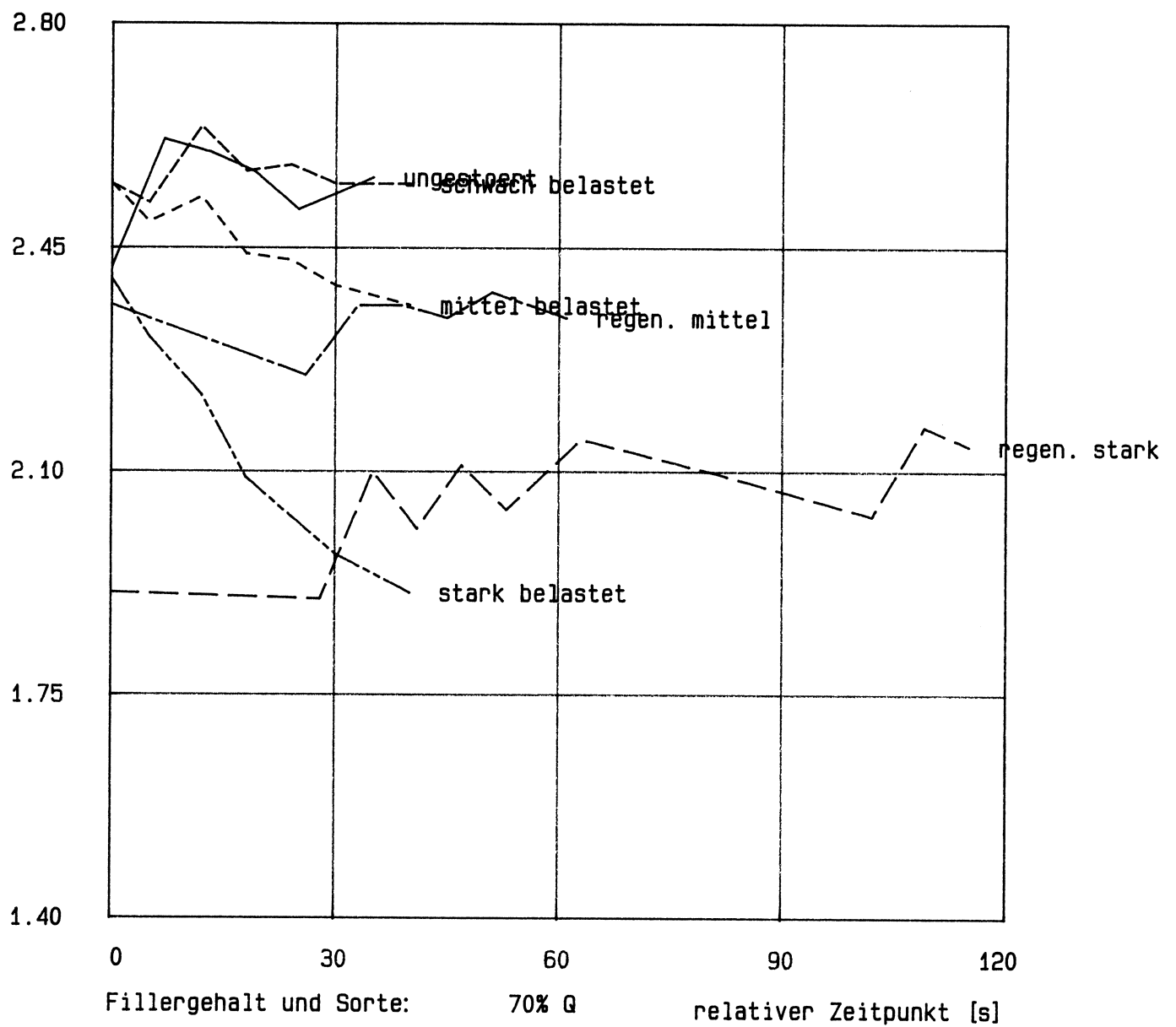
Belastungsempfindlichkeit

Modul [N/mm²], in Abhängigkeit der Belastung



Belastungsempfindlichkeit

Modul [N/mm²], in Abhängigkeit der Belastung



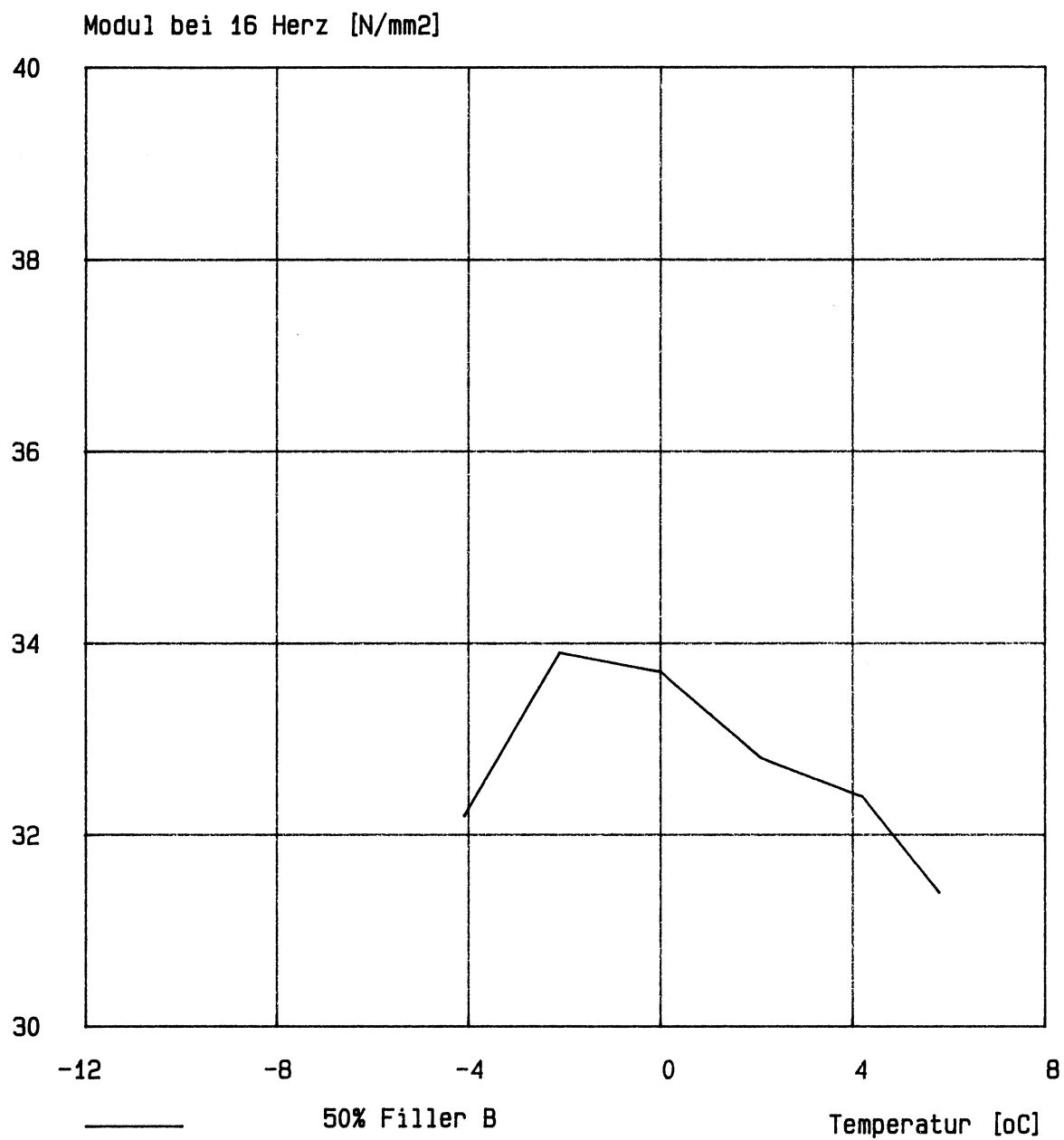
3. Tieftemperaturverhalten

Bestimmen der Temperatur des maximalen Modulwertes bei 16 Hertz

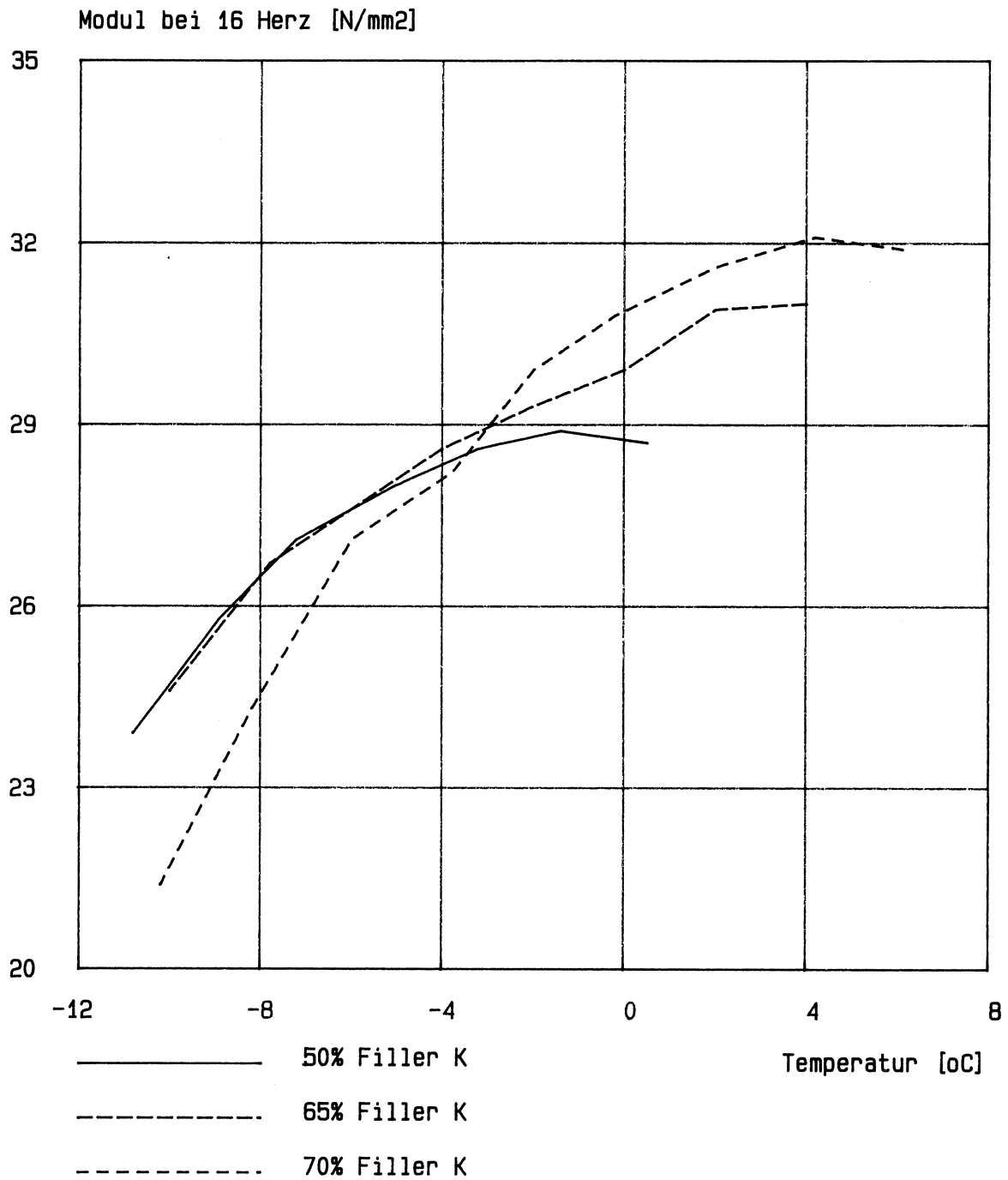
Filler	Gehalt Masse-%	Modul maximum N/mm ²	Tempera- tur bei °C
A	75	34	9
B	50	34	-2
	65		> 2
	70	40	4
E	70	44.5	<-3
E	75		> 8
K	65	31	3
K	70	32	4
K*	70	32	6
K	75	36	2
Q	50	32	0
Q	65	34	2
Q	70	35	2
Q	75	33	2

Die obige Tabelle zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Füllern und einen Einfluss des Filleranteils. Verdeutlicht werden die Zusammenhänge auch durch die Darstellungen auf den folgenden zwei Seiten.

Moduln in Abhaengigkeit der Temperatur



Moduln in Abhängigkeit der Temperatur



M Auswertung der mechanischen Kennwerte

1. Zusammenfassen der mechanischen Kennwerte zu Masterkurven

Beim Betrachten der Darstellung der komplexen Module in Abhängigkeit der Frequenz fällt auf, dass die Aeste für verschiedene Temperaturen ein sehr ähnliches Aussehen haben. Ihre Form hängt vor allem in ihrer Höhe in der Darstellung ab: Je höher sie liegen, umso flacher verlaufen sie. Betrachtet man die Kurven in einem bestimmten Modulbereich, so ist zu erkennen, dass sie einfach in horizontaler Richtung verschoben sind. Eine Verschiebung in horizontaler Richtung bedeutet wegen der logarithmischen Skala ein entsprechendes Multiplizieren der Frequenzskala, für die Verschiebungen wird deshalb im weiteren die Bezeichnung Frequenz-Verschiebungsfaktoren oder Frequenzverschiebung angewendet.

Dieses Phänomen ist von Untersuchungen an Kunststoffen seit langem bekannt. Konstruiert man rheologische Modelle, so ergibt sich dieses Verhalten genau dann, wenn im Modell alle viskosen Elemente die gleiche Temperaturabhängigkeit aufweisen. Untersuchungen an Bitumen zeigten, dass diese mit dem gleichen Formalismus beschrieben werden können, also ebenfalls nur viskose Glieder ähnlicher Temperaturabhängigkeit aufweisen. Um eine Masterkurve konstruieren zu können, müssen die Abstände der Kurvenäste miteinander verglichen werden, um entsprechende Frequenz-Verschiebungsfaktoren zu erhalten, dann sind diese mit einem Temperaturmodell zu vergleichen und dessen Koeffizienten zu bestimmen. Zuletzt sind die Kurvenäste gemäss Temperaturmodell zu korrigieren, und daraus resultiert eine Schar transformierter Kennwerte, welche nun nur noch eine Abhängigkeit der Module von der Frequenz beschreiben. Aus dieser Punkteschar wird eine Masterkurve nach Dobson gemäss folgender Formel berechnet:

$$b \cdot \log_{10}(\omega_r) = \log_{10}(Gr^{-b} - 1) + (20.5 - Gr^{-b}) / 230.3$$

ω_r und Gr sind dabei die reduzierten Werte, das heisst sie beschreiben die Masterkurve relativ zu deren Asymptoten.

Dobson postulierte eine linearisierbare Abhängigkeit des Verlustwinkels vom komplexen Modul, welche für die weitere Auswertung übernommen wird. Mit diesen mathematischen Hilfsmitteln lassen sich Kurven für den komplexen, elastischen Modul und für die Schwingungsviskosität berechnen und graphisch darstellen.

a) Bestimmen der Frequenzverschiebung zwischen zwei Kurvenästen

Die Frequenzverschiebung zwischen den Kurvenästen wird zweckmässigerweise zwischen Kurven benachbarter Temperaturen ermittelt, weil dabei die beste Ueberlagerung erreicht wird, d.h. für am meisten Punkte jedes Kurvenastes Punkte des anderen im gleichen Modulbereich vorliegen. Für jeden Punkt des ersten Kurvenastes, bei dem auf dem anderen ein kleinerer und grösserer vorliegt, kann der horizontale Abstand zur Verbindungsgeraden dieser beiden Punkte leicht berechnet werden. Die Abbildung 3 zeigt das mathematische Verfahren deutlich.

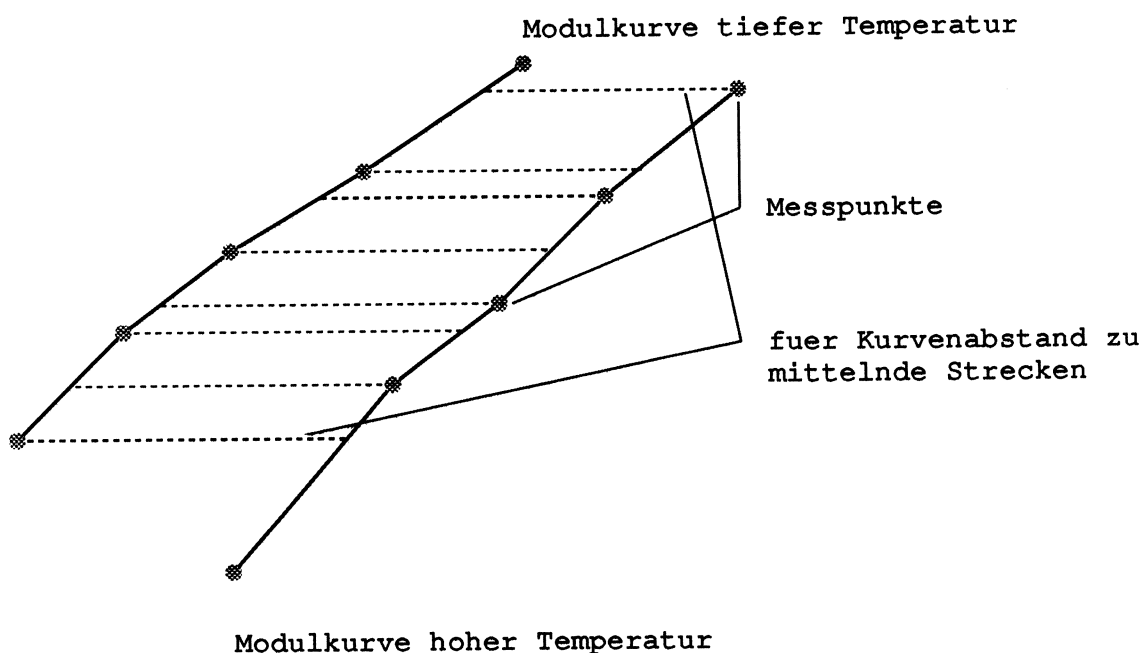


Abbildung 3: Ermittlung des Kurvenabstandes

Für alle Kennwertpunkte im Vergleichsbereich werden so Einzelwerte für den Abstand der beiden Kurvenäste berechnet. Das Mittel aus diesen Einzelwerten ergibt den geltenden Abstand für die beiden Kurvenäste. Durch Ermittlung der Frequenz-Verschiebungsfaktoren

zwischen den benachbarten Kurven sind alle möglichen Frequenz-Verschiebungsfaktoren zwischen den Kurven ermittelt, denn Verschiebungen zwischen nicht benachbarten Kurven ergeben sich durch einfache Addition.

b) Modell für die Temperaturabhängigkeit

Für die Temperaturabhängigkeit von Bitumen wurde auf einen Vorschlag von William, Landels und Ferry zurückgegriffen. Für die Verschiebungsfaktoren V_f ergibt das die Formel:

$$\log(V_f) = C_1 \cdot (T - T_R) / (C_2 + T - T_R)$$

In linearisierter Form lässt sich diese Gleichung wie folgt schreiben:

$$\Delta T / \log(V_f) = \Delta T / C_1 + C_2 / C_1 \quad \Delta T = T - T_R$$

Eine linearisierte Form ist bequem, weil die Auswertung mit ihr einfach durchgeführt werden kann. Allerdings wurde bereits von anderen Autoren festgestellt, dass diese lineare Darstellung nicht ausreicht, um Bitumen genügend genau zu beschreiben. Es wurden beispielsweise zwei unterschiedliche Modelle für die Temperaturabhängigkeit unter- und oberhalb einer Referenztemperatur gewählt. Der Knick in der Kurve ist nicht logisch, in dieser Arbeit wurde deshalb eine quadratische Form der Annäherung an die Messwerte gewählt:

$$\Delta T / \log(V_f) = a \cdot \Delta T^2 + b \cdot \Delta T + c$$

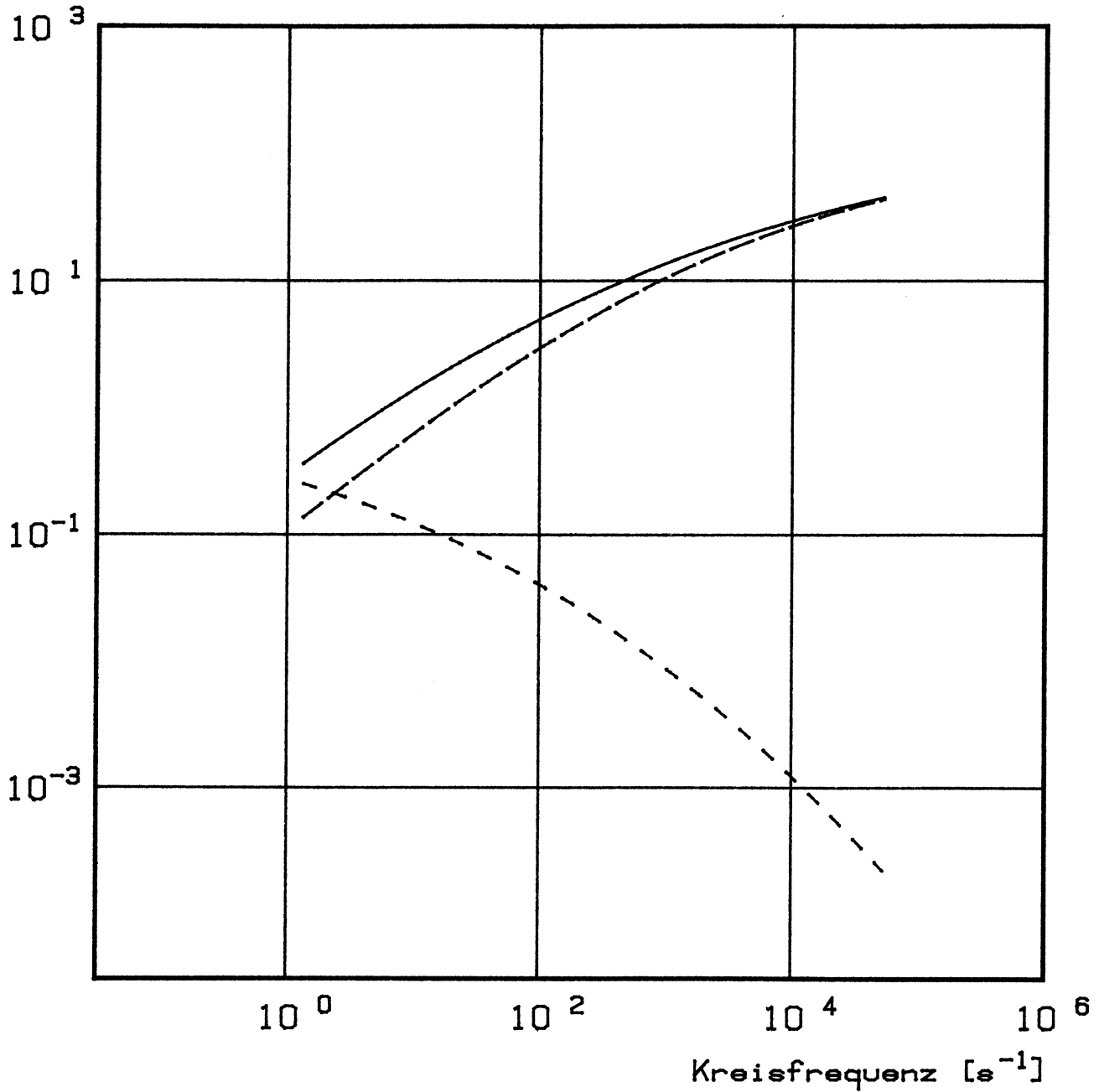
Interessant an einer solchen quadratischen Form ist, dass sich ein Punkt maximaler Temperaturempfindlichkeit ergeben kann, also eine Temperatur, an der eine bestimmte minimale Änderung der Temperatur die grösste Veränderung in der nötigen Korrektur der Frequenzen ergibt, um die Module beizubehalten.

Die graphische Darstellung der Masterkurven ist auf den folgenden Seiten einzusehen.

50% Filler A

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

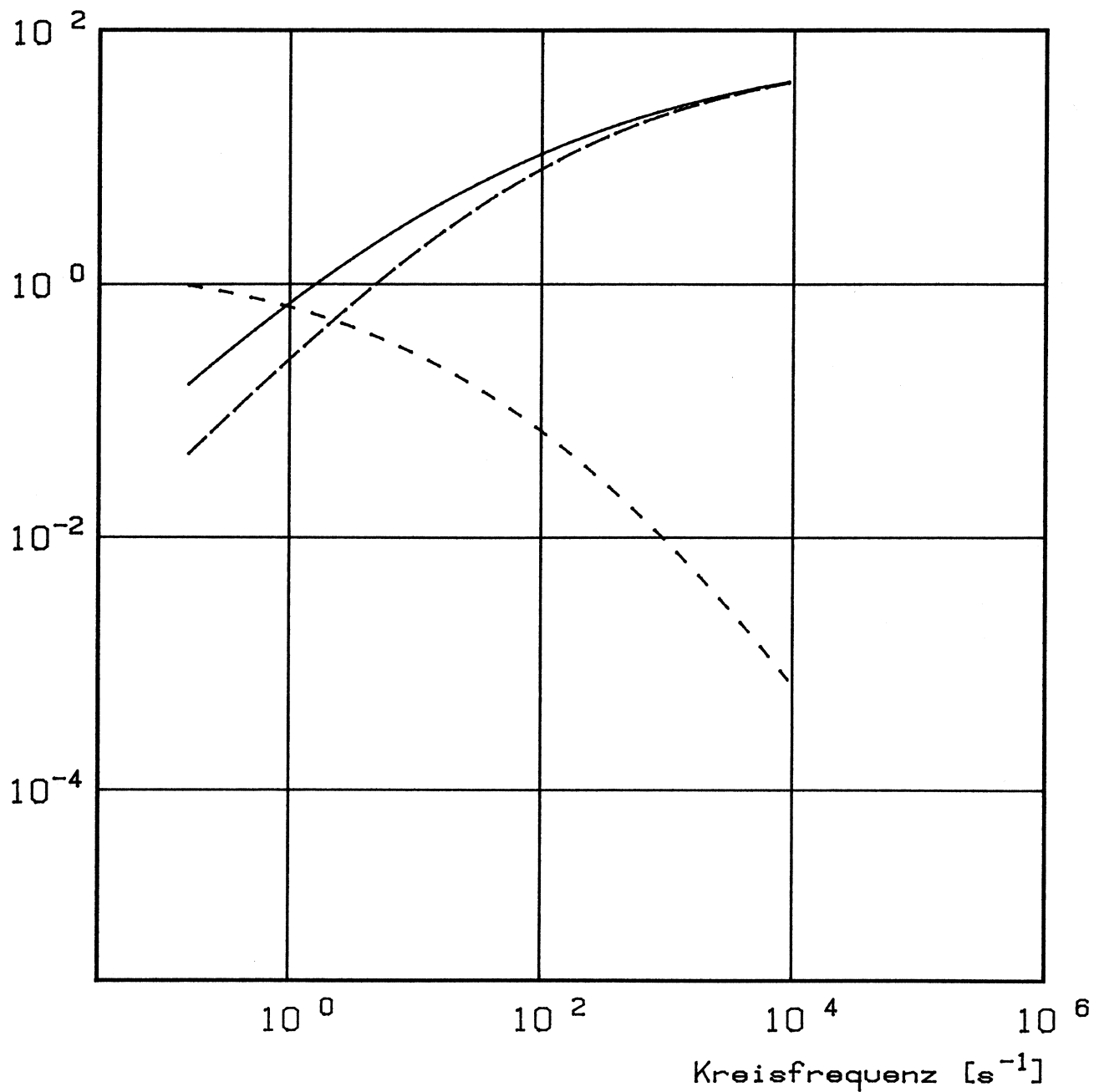
----- G' : Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 1.676E 02 Scherempf.: 0.194 Visk.: 7.238E-01

65% Filler A

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

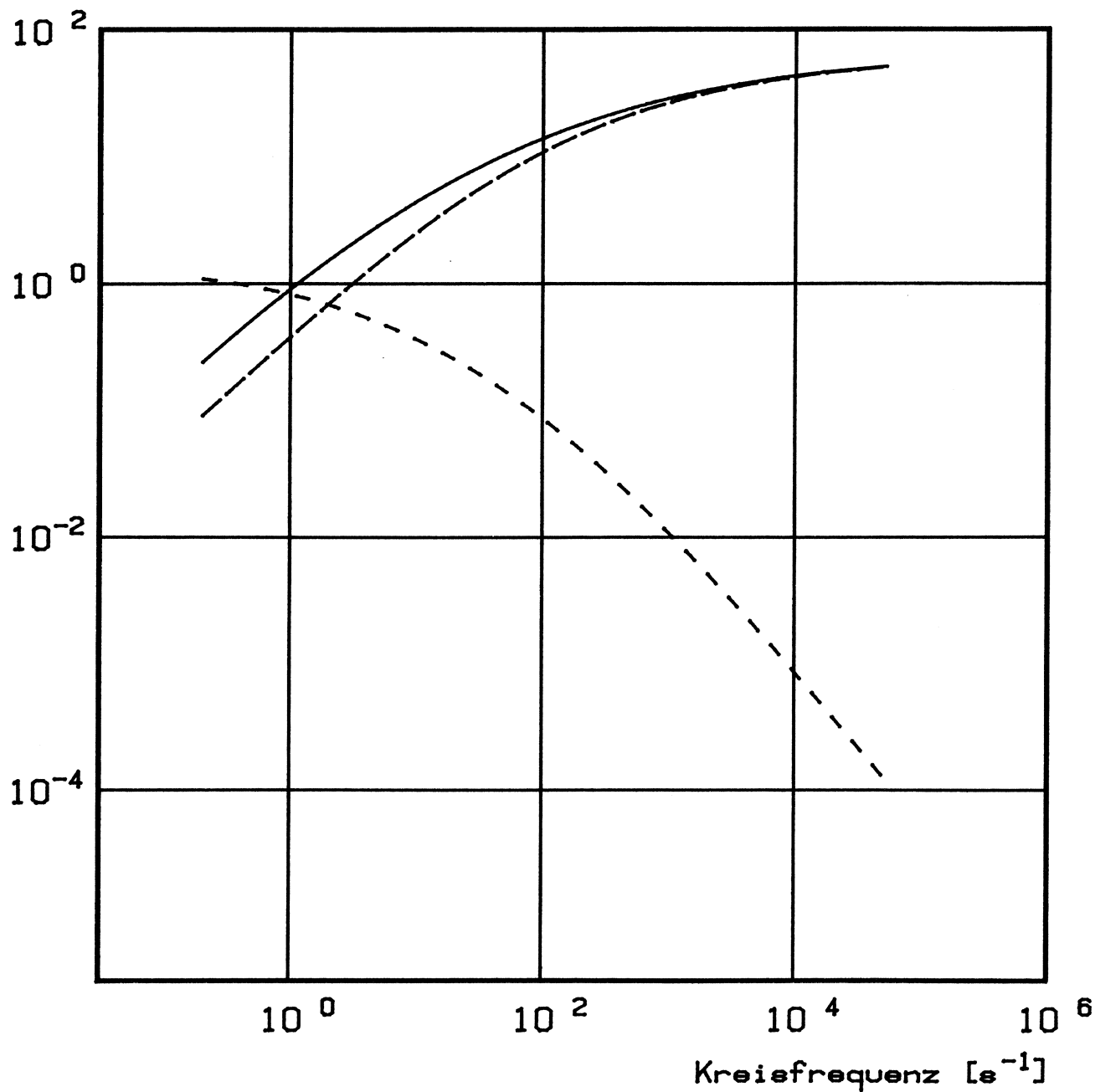
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 7.853E 01 Scherempf.: 0.277 Visk.: 6.516E-01

70% Filler A

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



————— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G' : Speichermodul

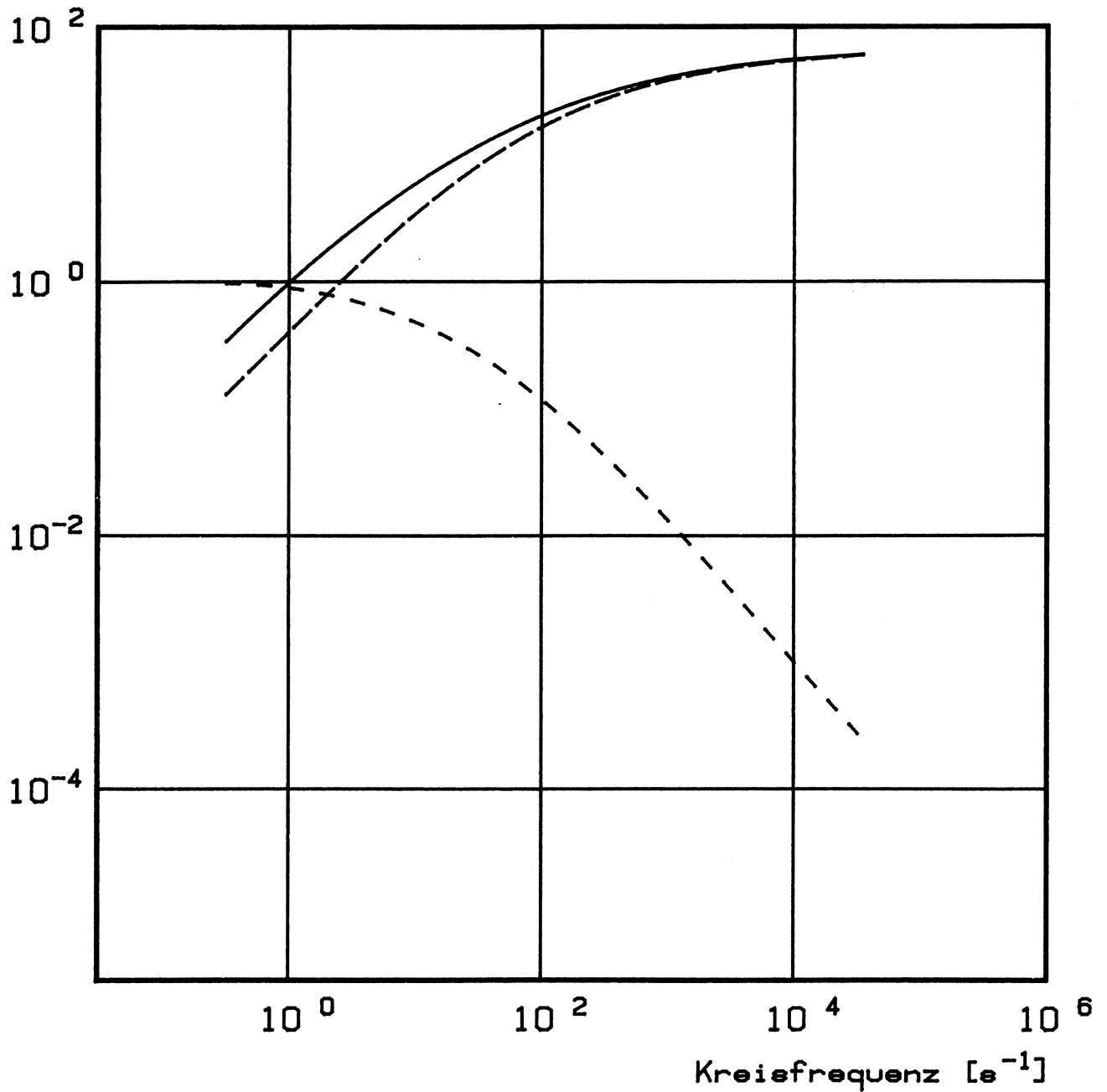
- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 6.619E 01 Scherempf.: 0.328 Visk.: 8.126E-01

75% Filler A

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

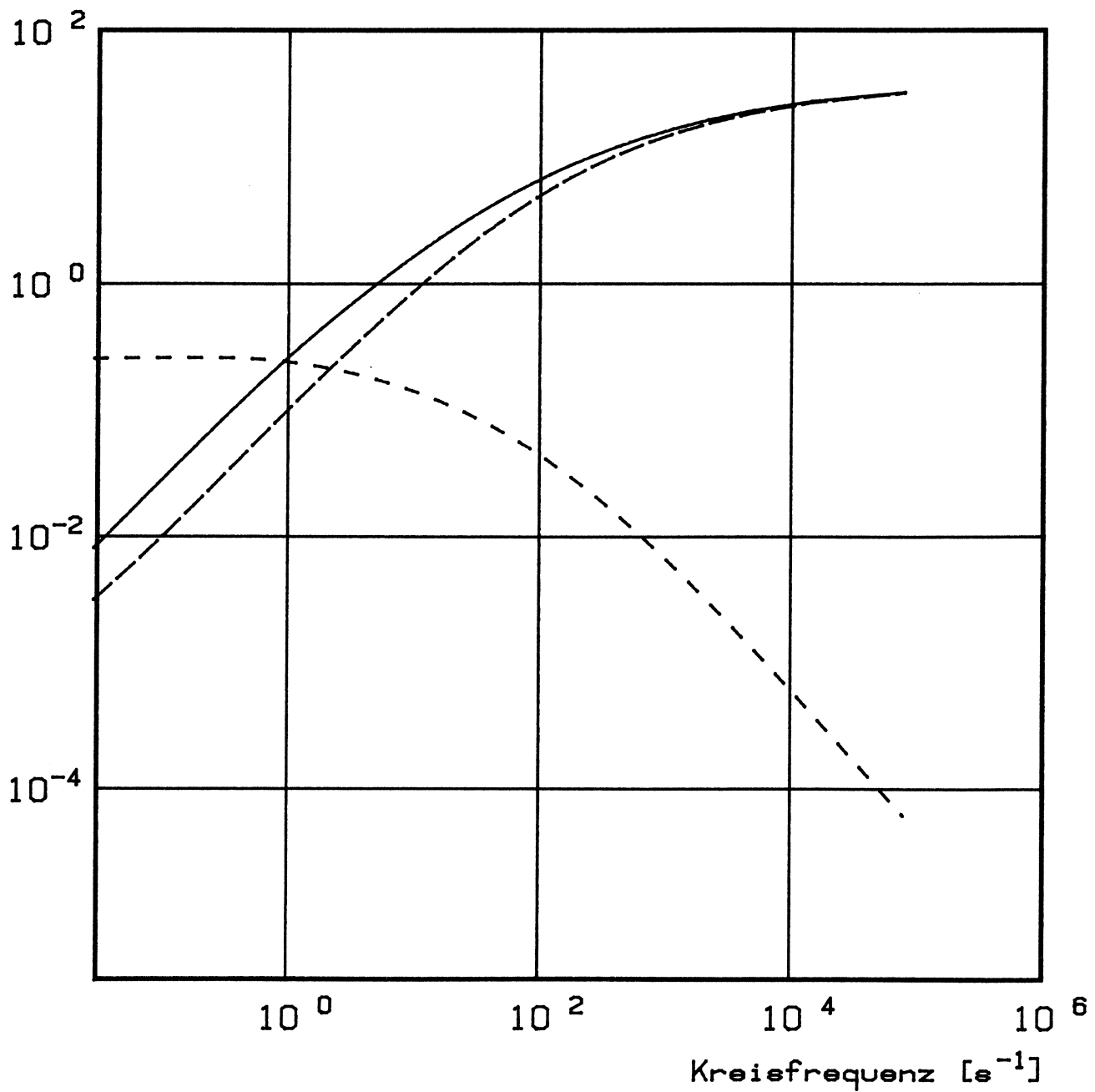
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 6.965E 01 Scherempf.: 0.428 Visk.: 8.897E-01

50% Filler B

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

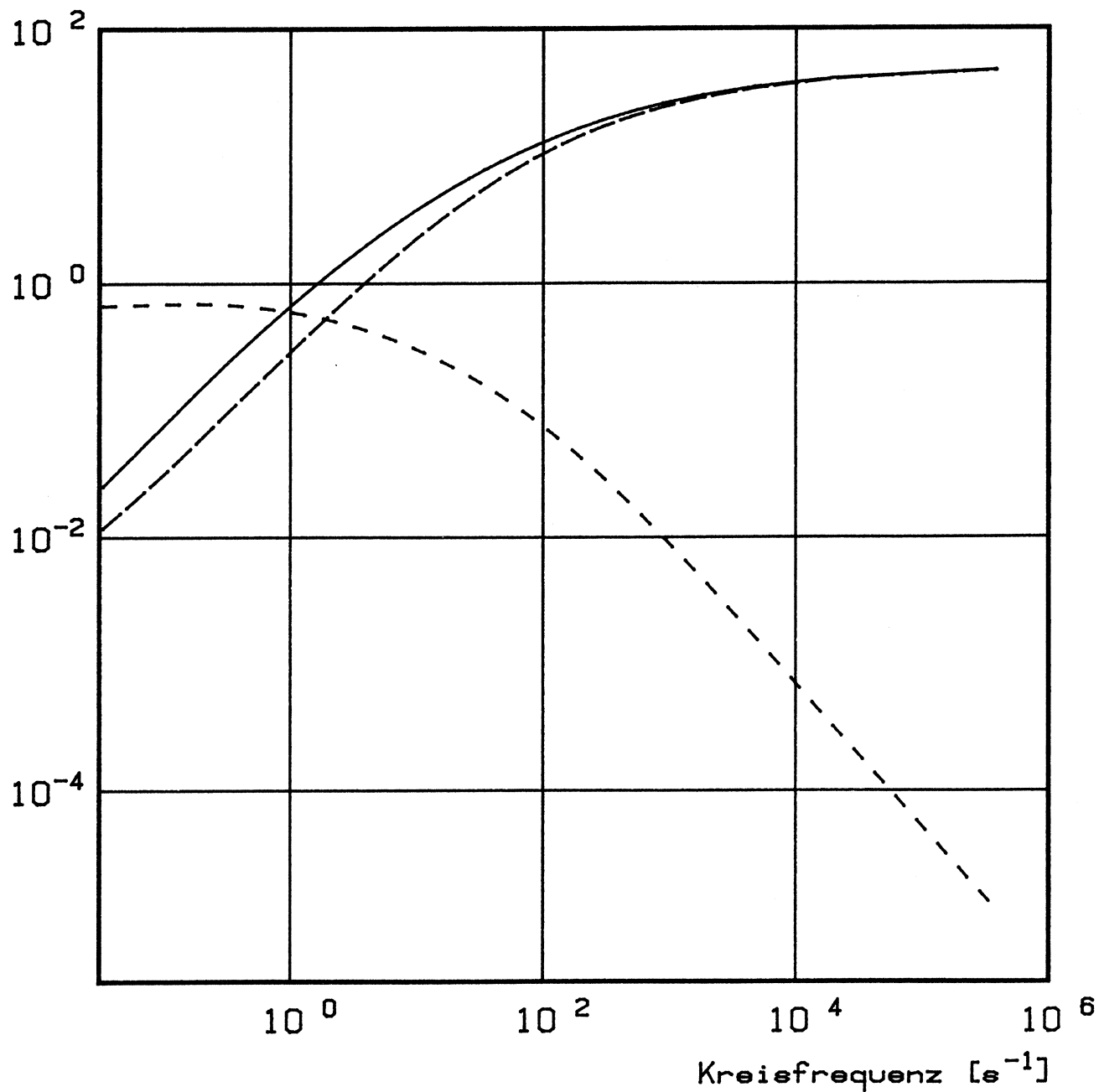
----- G' : Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 3.985E 01 Scherempf.: 0.375 Visk.: 2.398E-01

65% Filler B

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

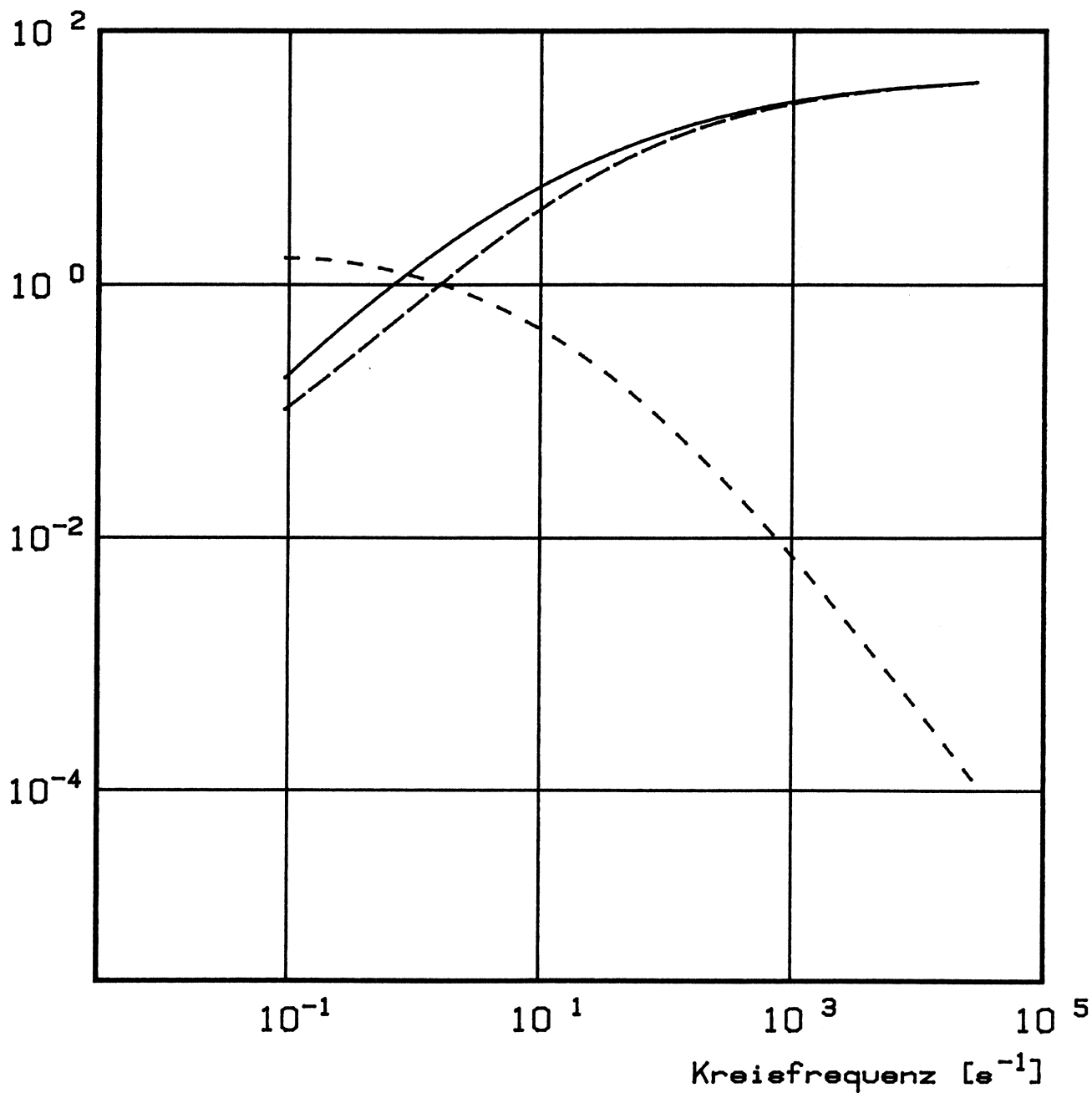
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 5.112E 01 Scherempf.: 0.391 Visk.: 5.917E-01

70% Filler B

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

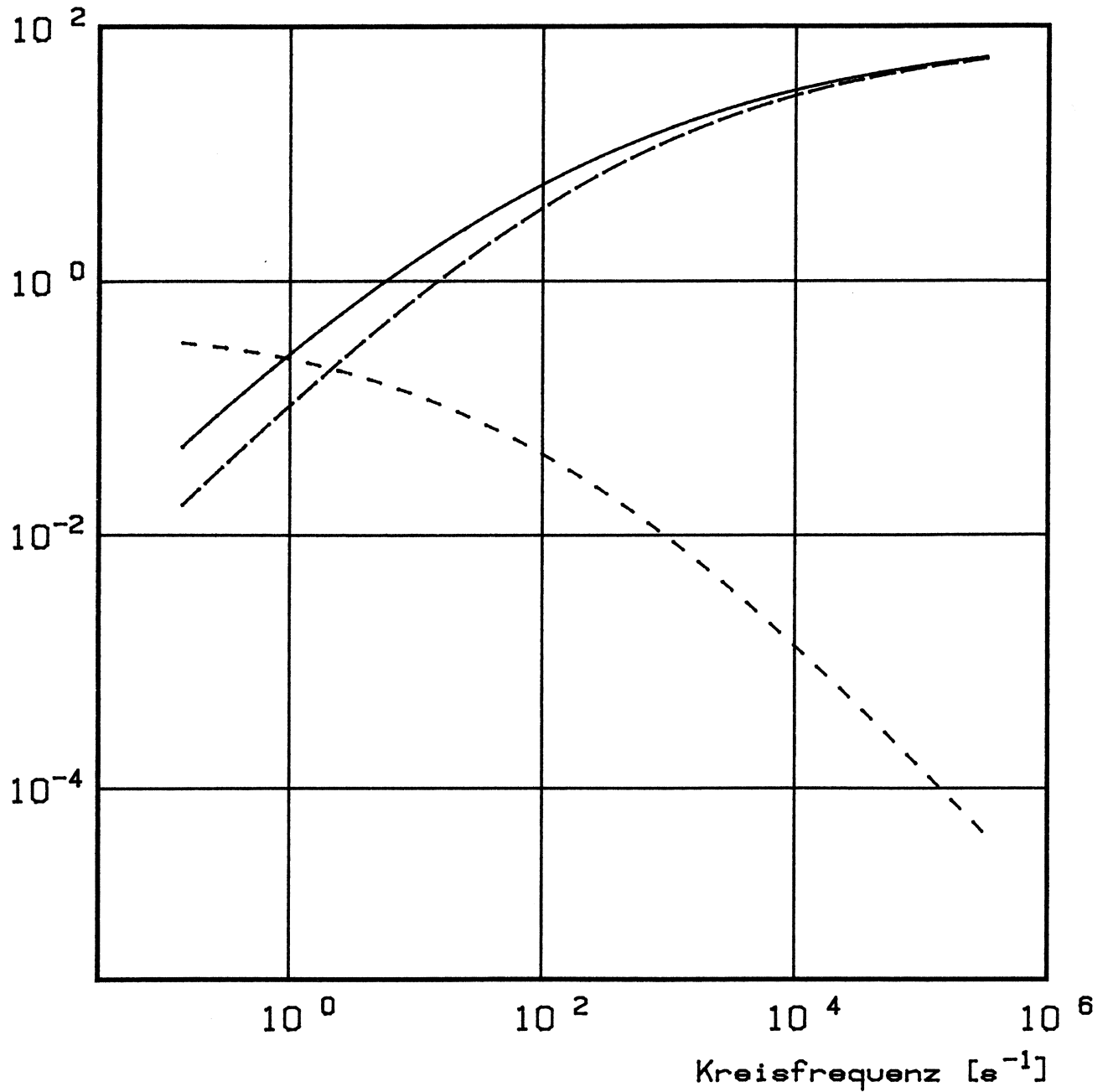
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.654E 01 Scherempf.: 0.369 Visk.: 1.152E 00

50% Filler C

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

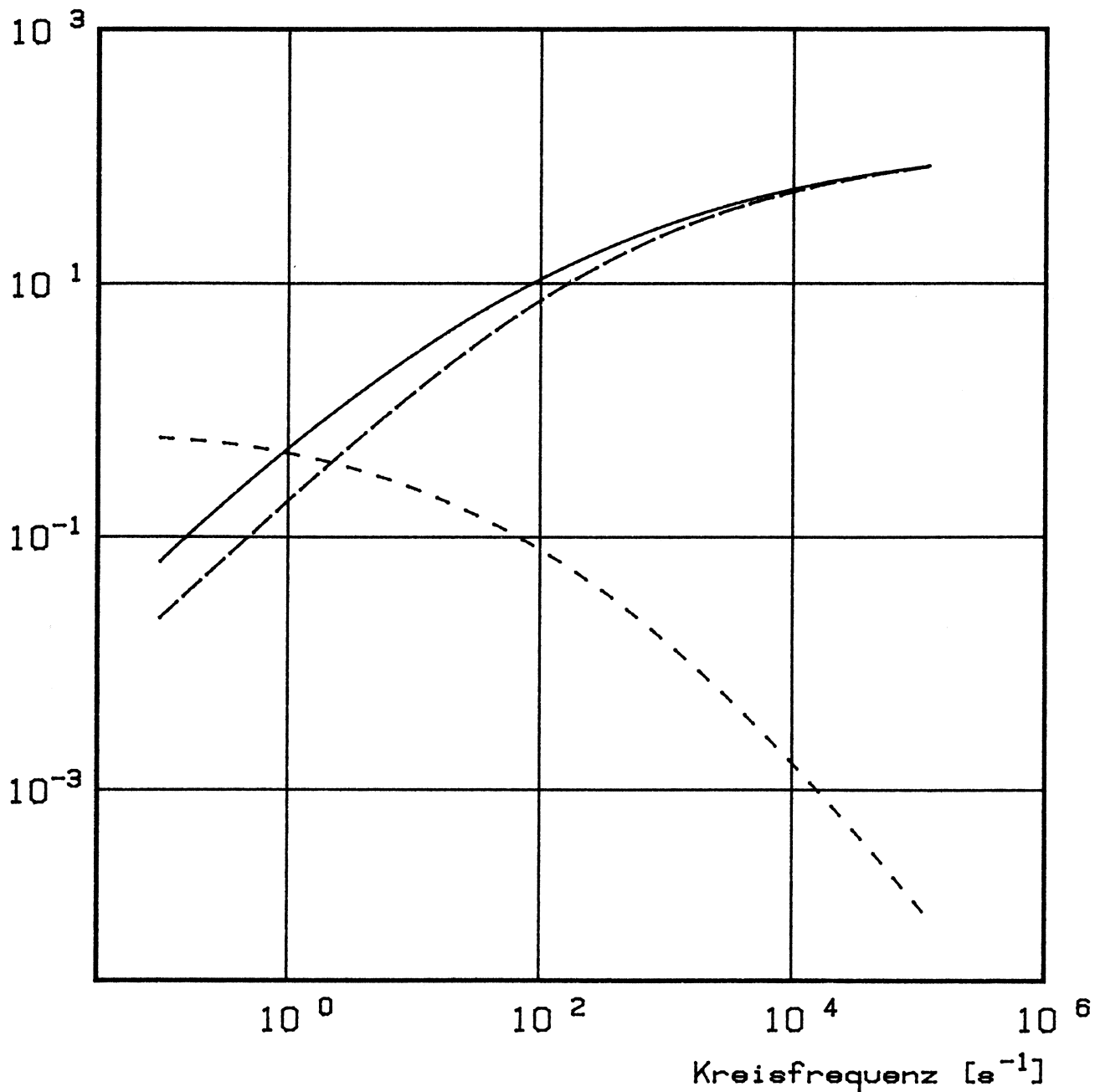
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 9.255E 01 Scherempf.: 0.258 Visk.: 2.454E-01

65% Filler C

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls- - - G' : Speichermodul

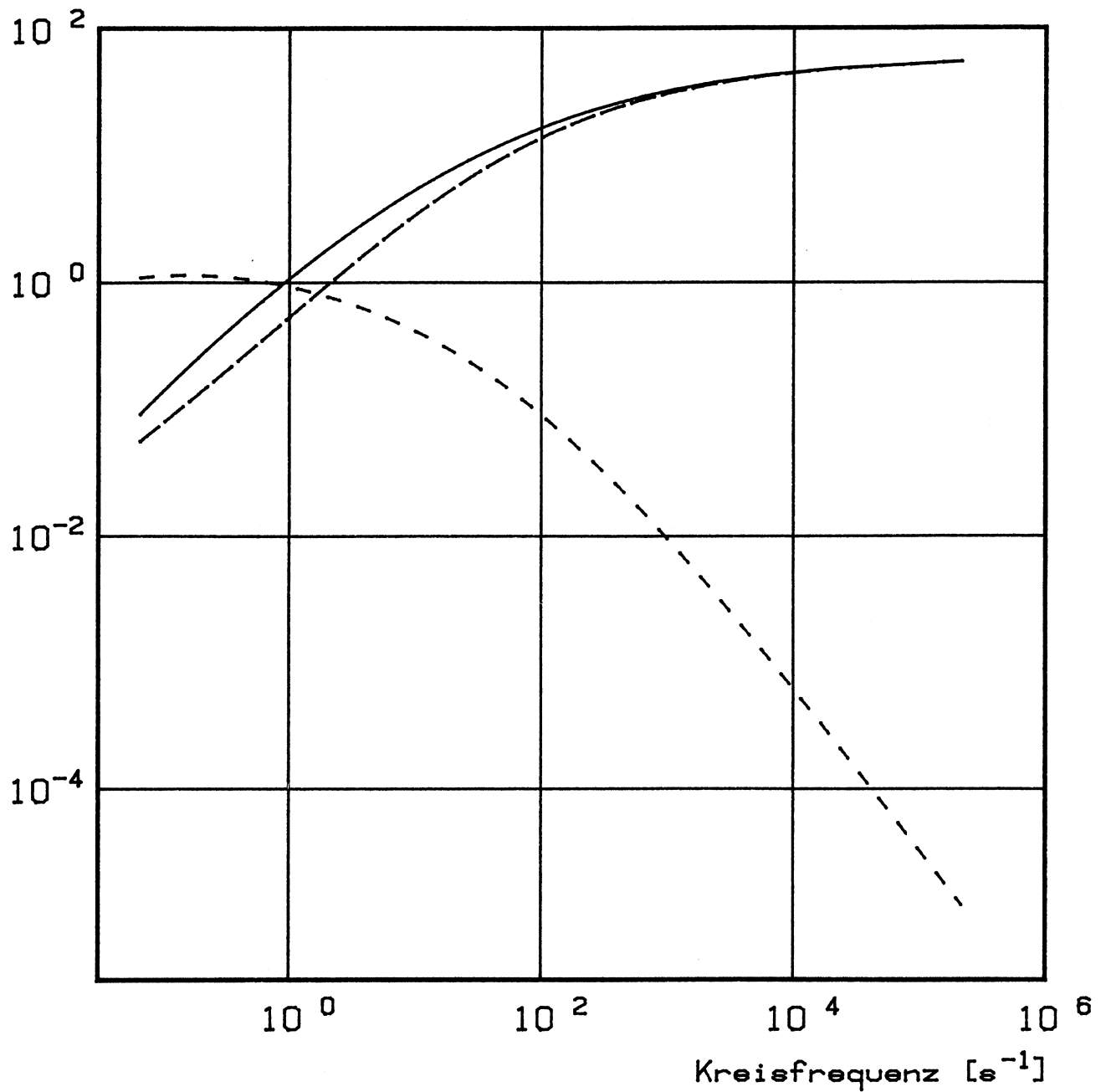
- . - . - . Schwingungsviskosität

G-un.: 1.378E 02 Scherempf.: 0.276 Visk.: 4.486E-01

70% Filler C

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

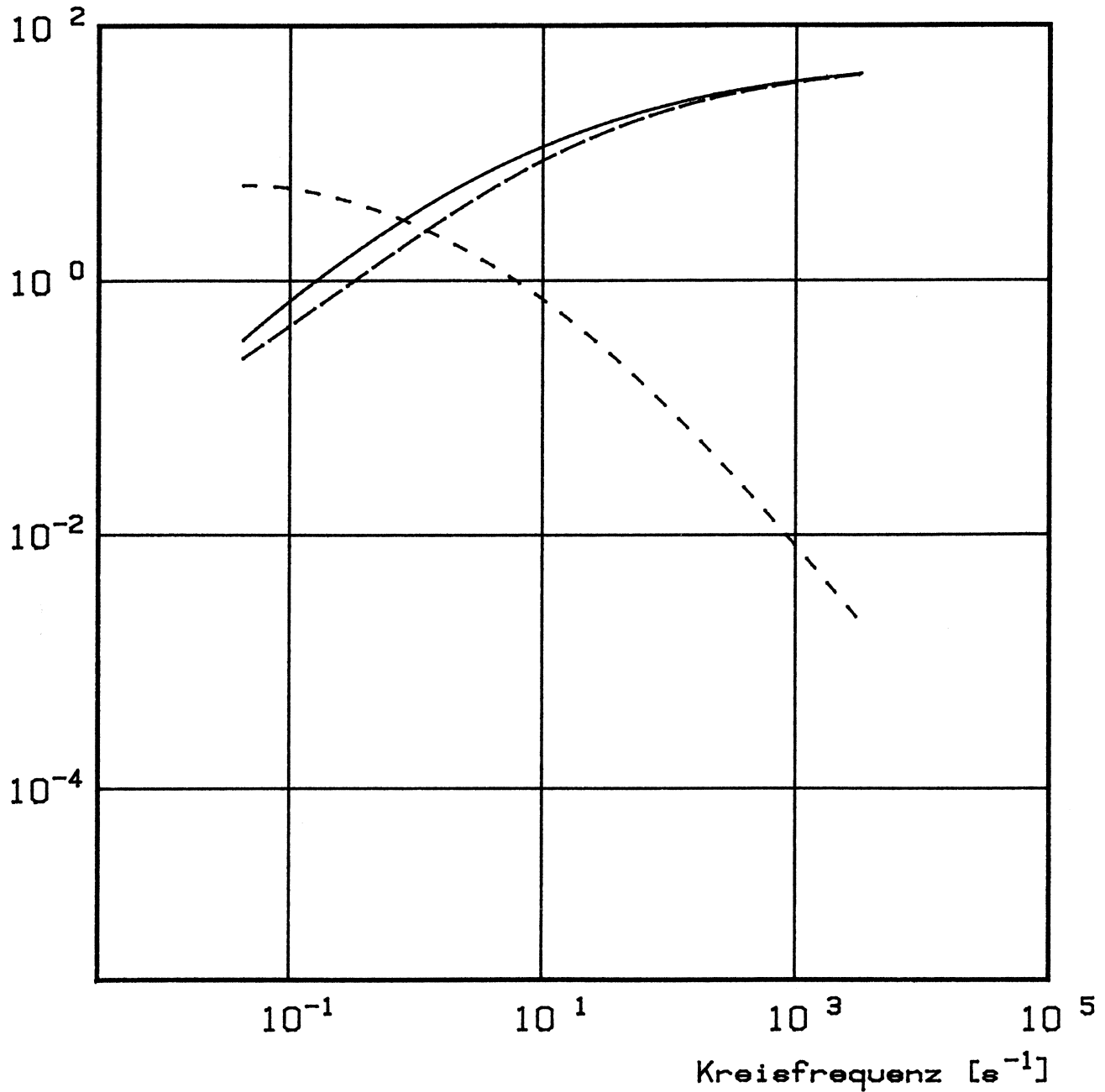
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 6.107E 01 Scherempf.: 0.366 Visk.: 9.002E-01

75% Filler C

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

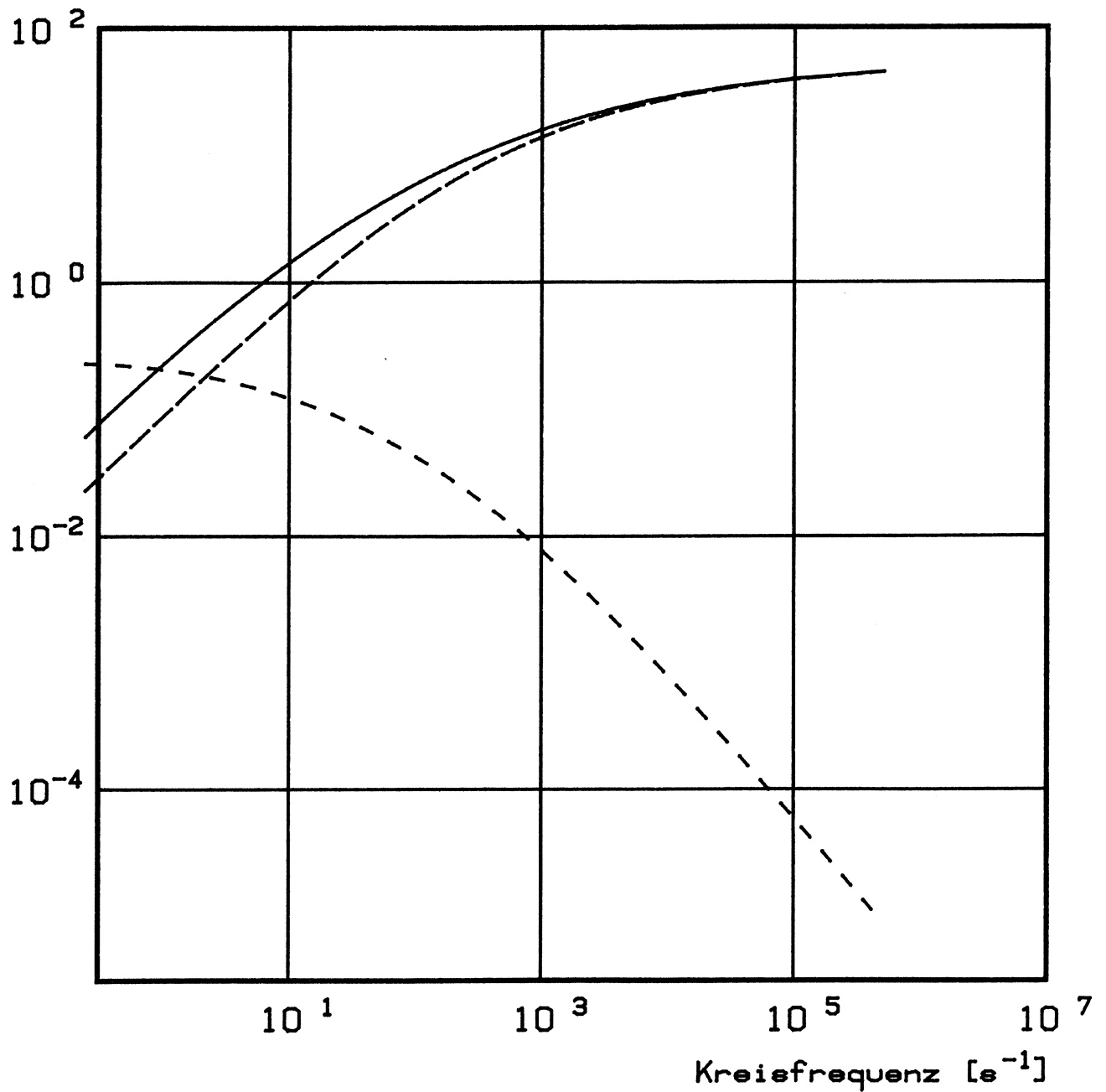
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 5.733E 01 Scherempf.: 0.327 Visk.: 2.532E 00

50% Filler D

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

- - - G': Speichermodul

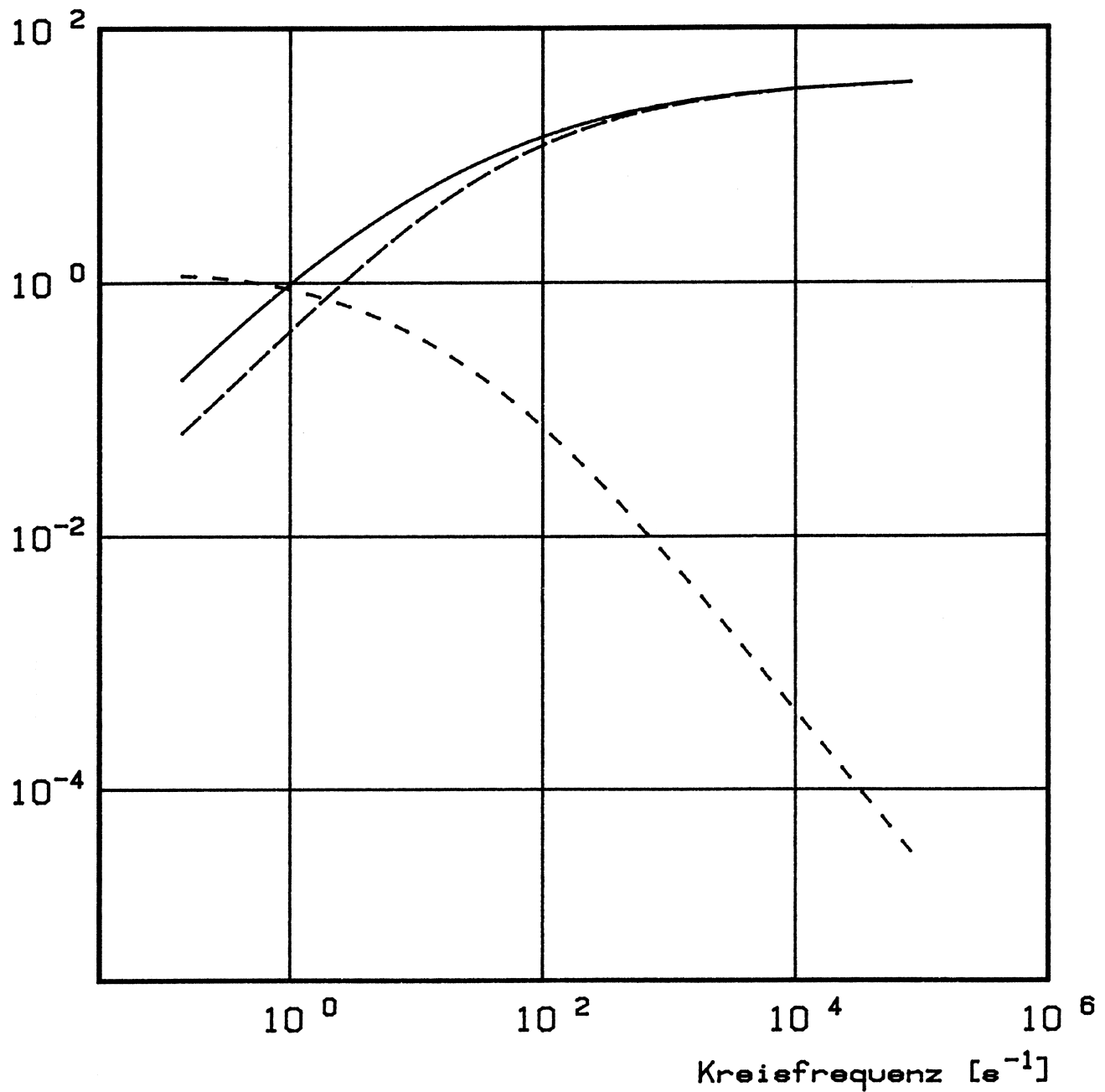
- . - . - . Schwingungsviskosität

G-un.: 5.459E 01 Scherempf.: 0.330 Visk.: 2.055E-01

70% Filler D

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



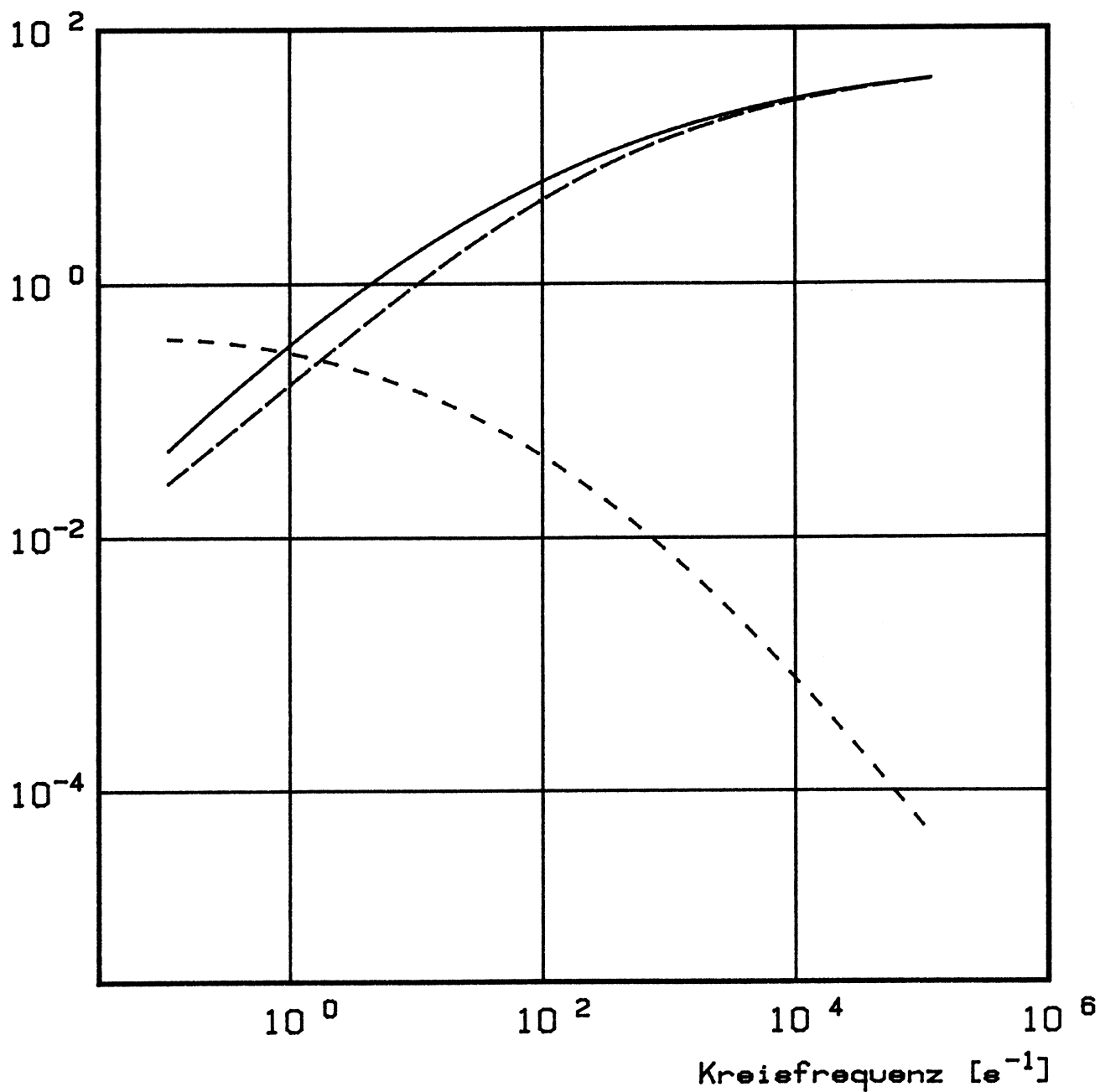
————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls
 - - - - - G': Speichermodul
 - . - . - . Schwingungviskosität

G-un.: 4.124E 01 Scherempf.: 0.400 Visk.: 8.641E-01

50% Filler E

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

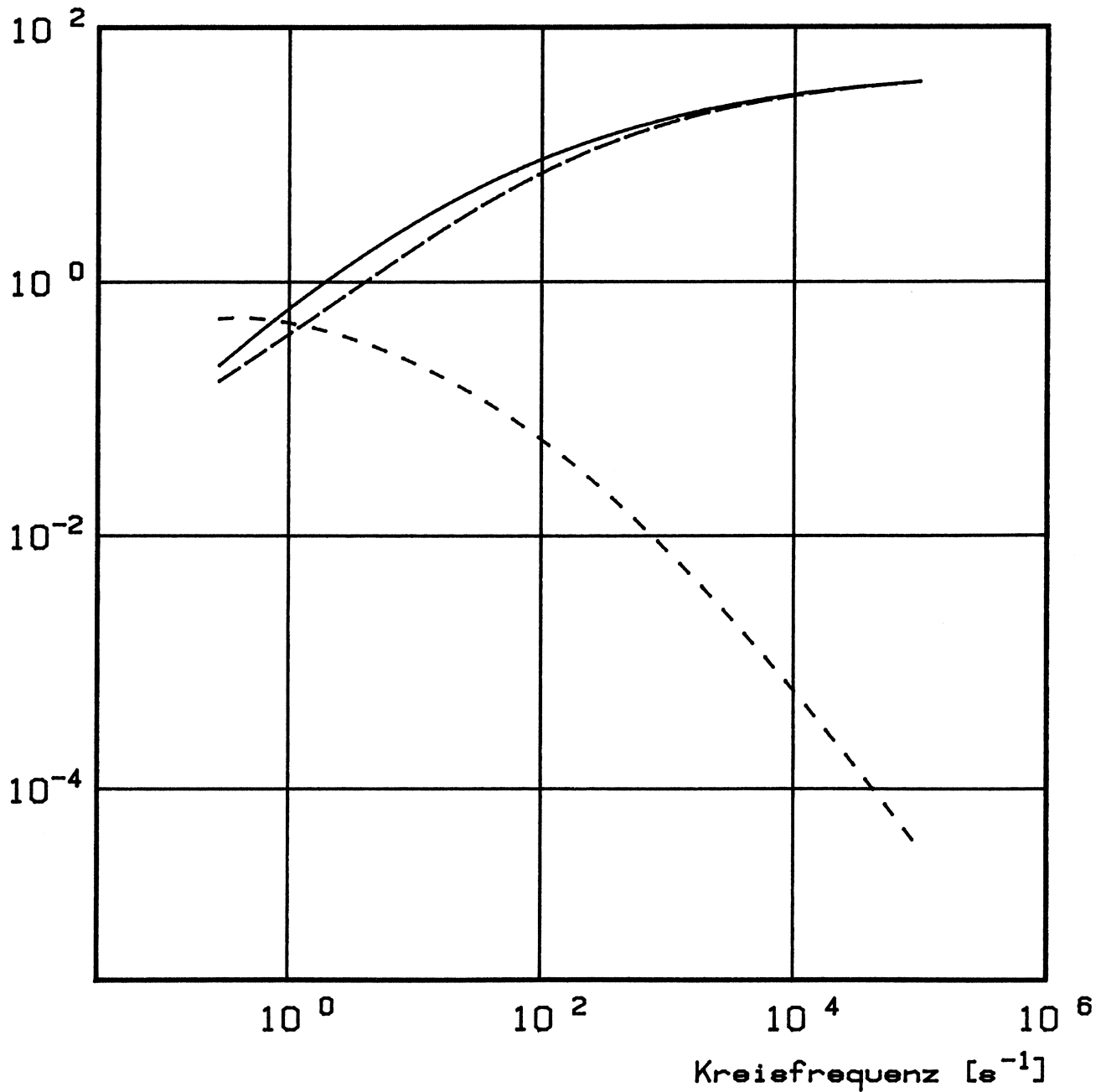
- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 6.089E 01 Scherempf.: 0.284 Visk.: 2.808E-01

65% Filler E/r

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

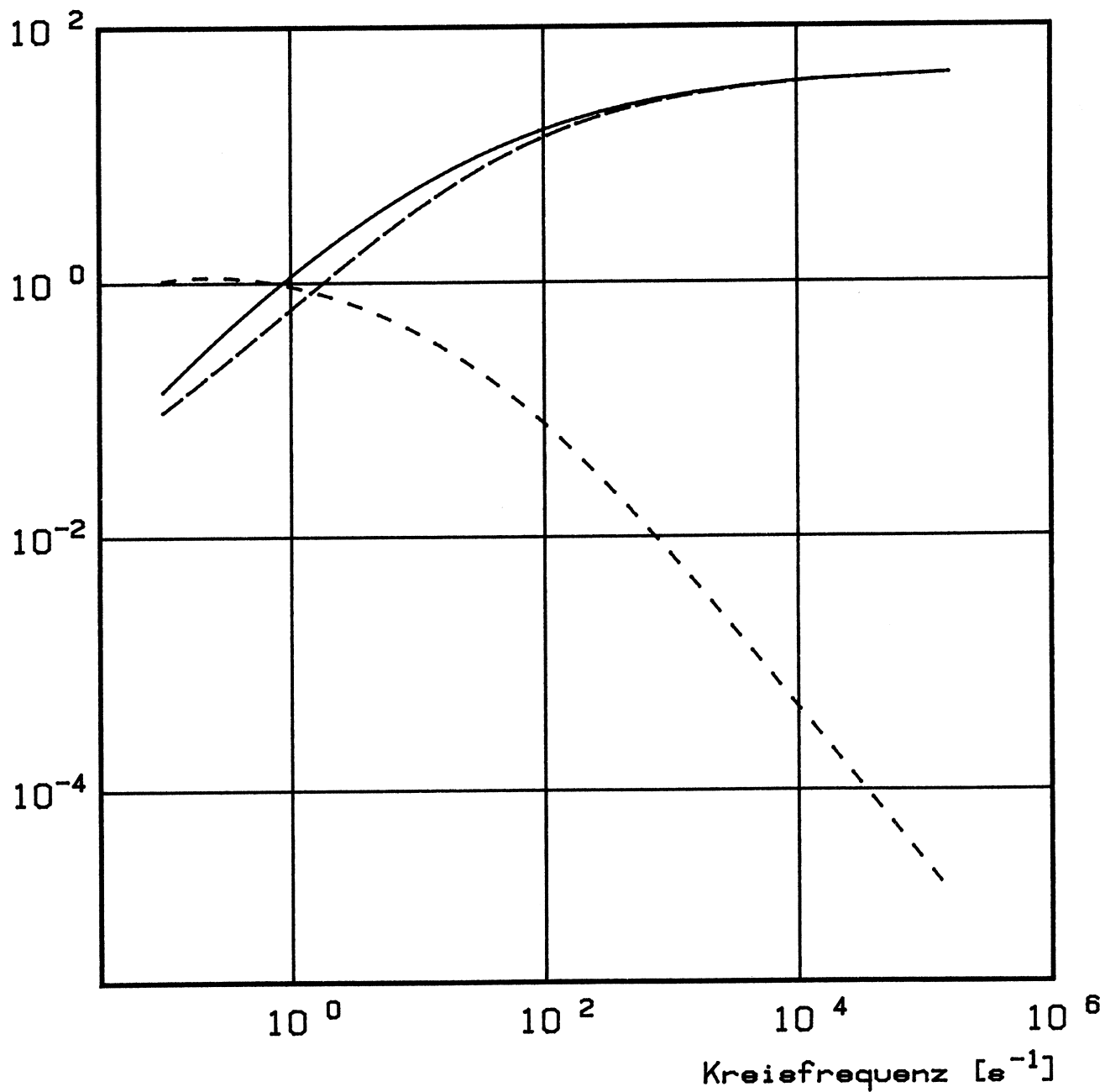
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.772E 01 Scherempf.: 0.313 Visk.: 4.781E-01

70% Filler E

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls----- G' : Speichermodul

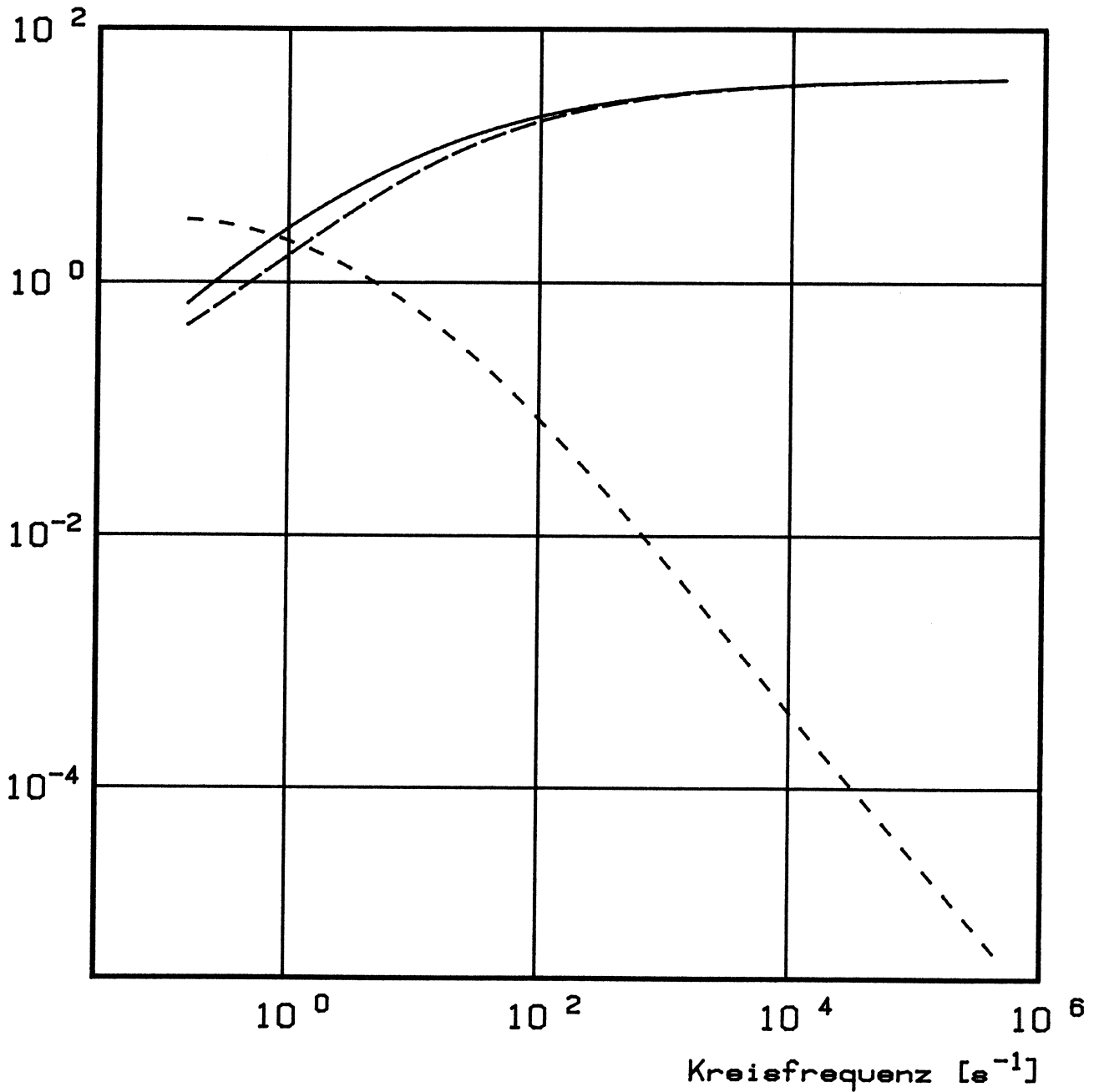
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.622E 01 Scherempf.: 0.396 Visk.: 9.103E-01

75% Filler E

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

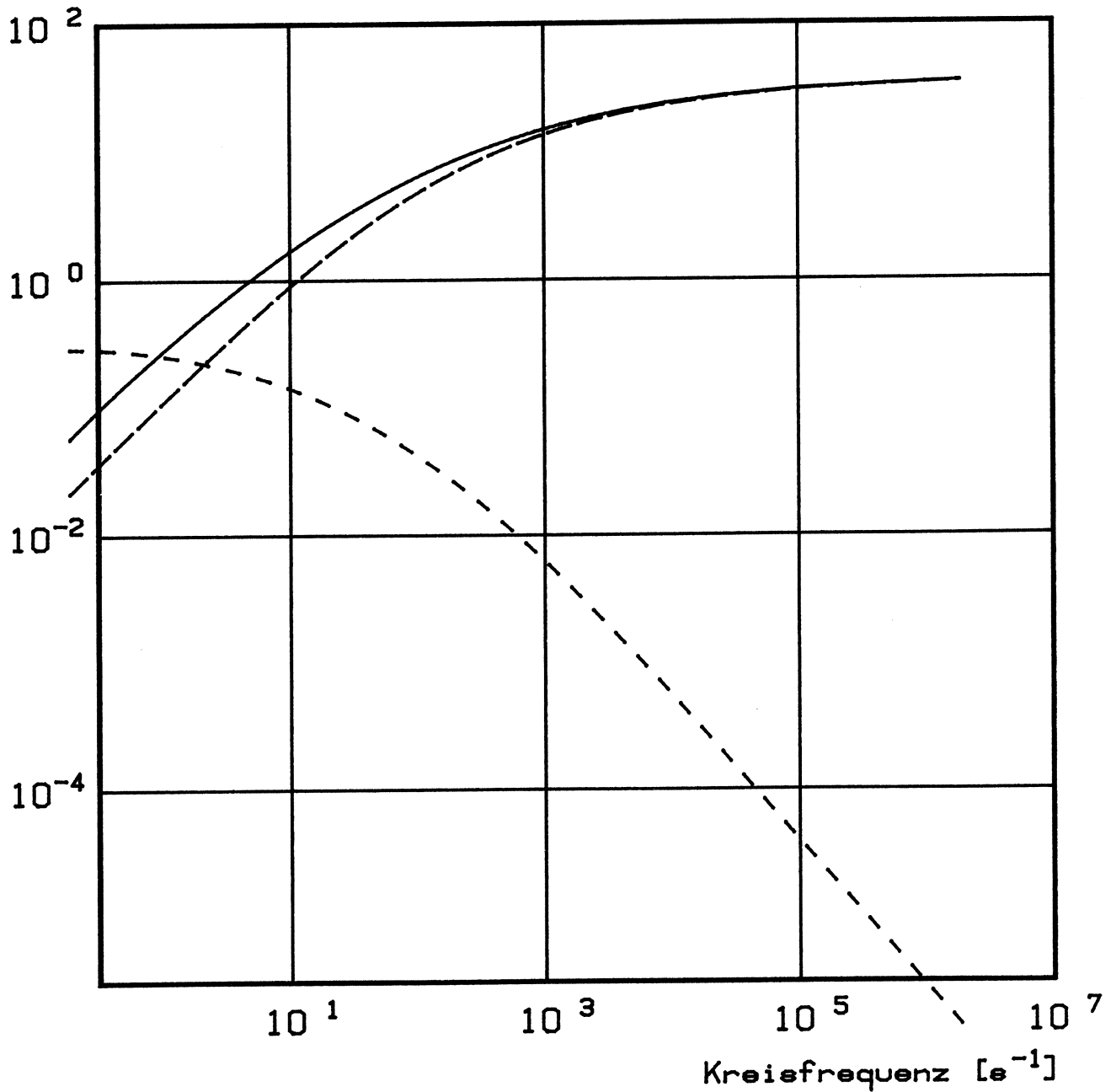
- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.208E 01 Scherempf.: 0.388 Visk.: 2.109E 00

50% Filler F

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

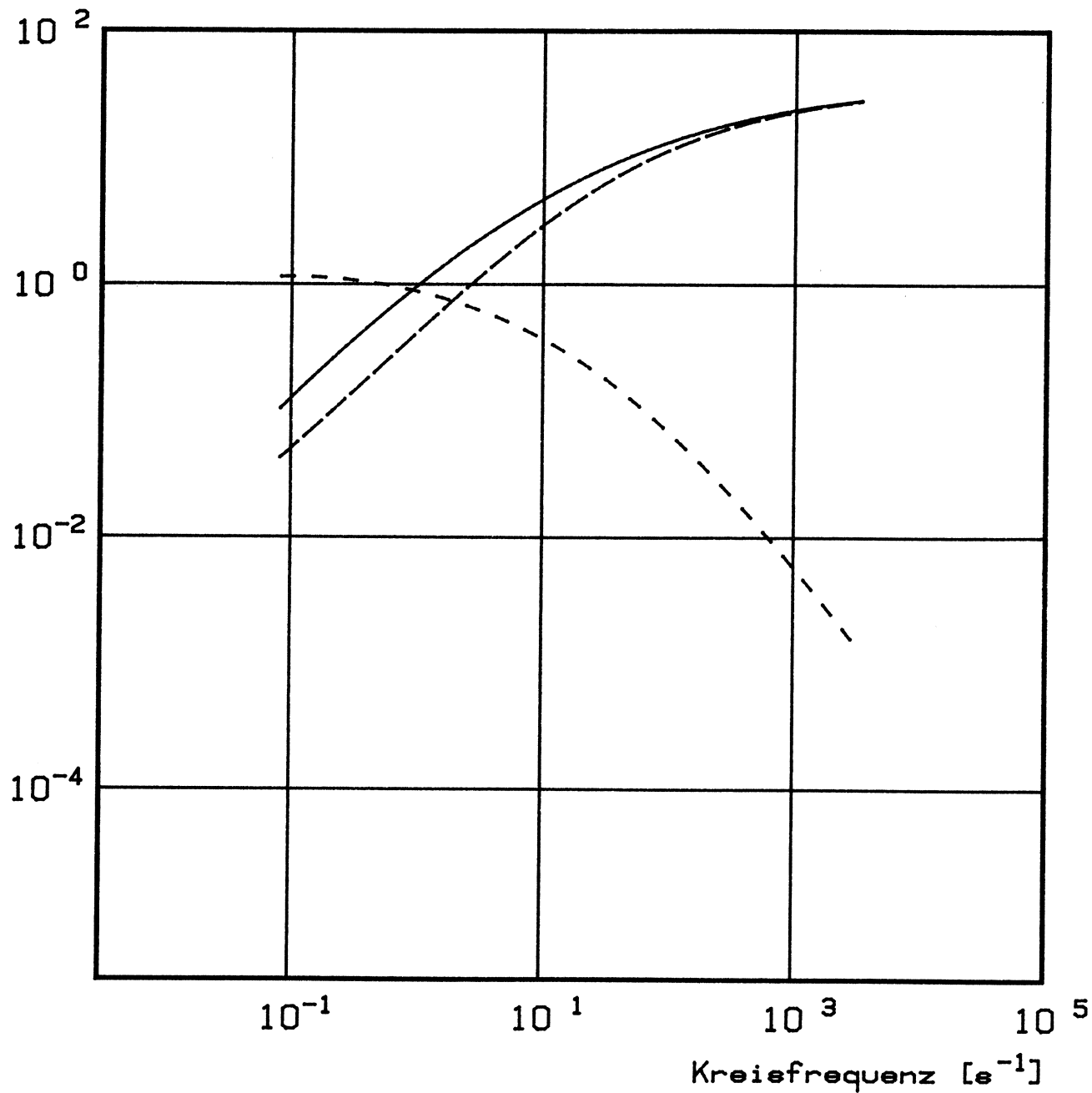
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 3.800E 01 Scherempf.: 0.355 Visk.: 2.532E-01

70% Filler F

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

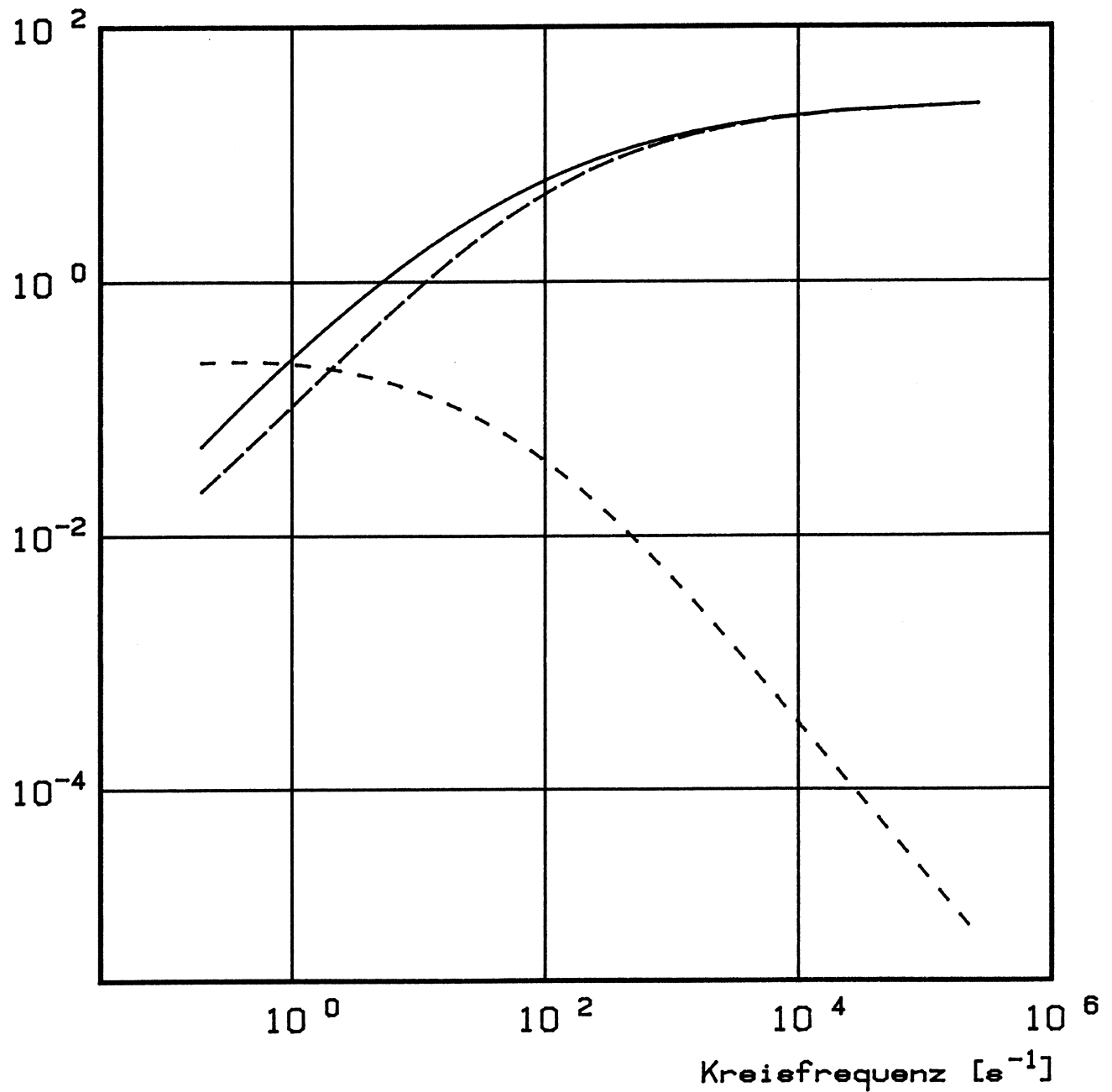
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 3.886E 01 Scherempf.: 0.396 Visk.: 8.792E-01

50% Filler G

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

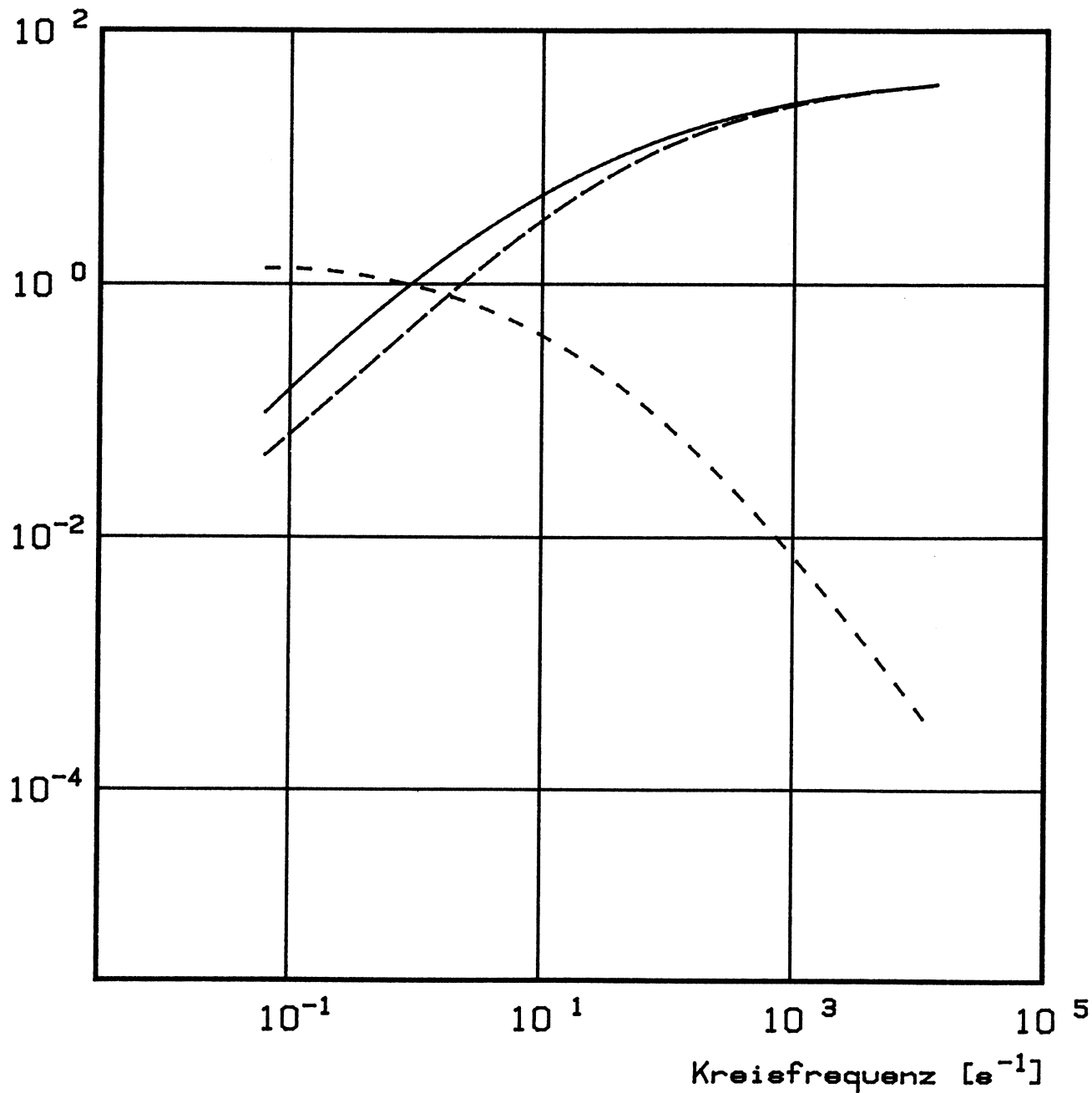
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 2.674E 01 Scherempf.: 0.420 Visk.: 2.274E-01

70% Filler G

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G' : Speichermodul

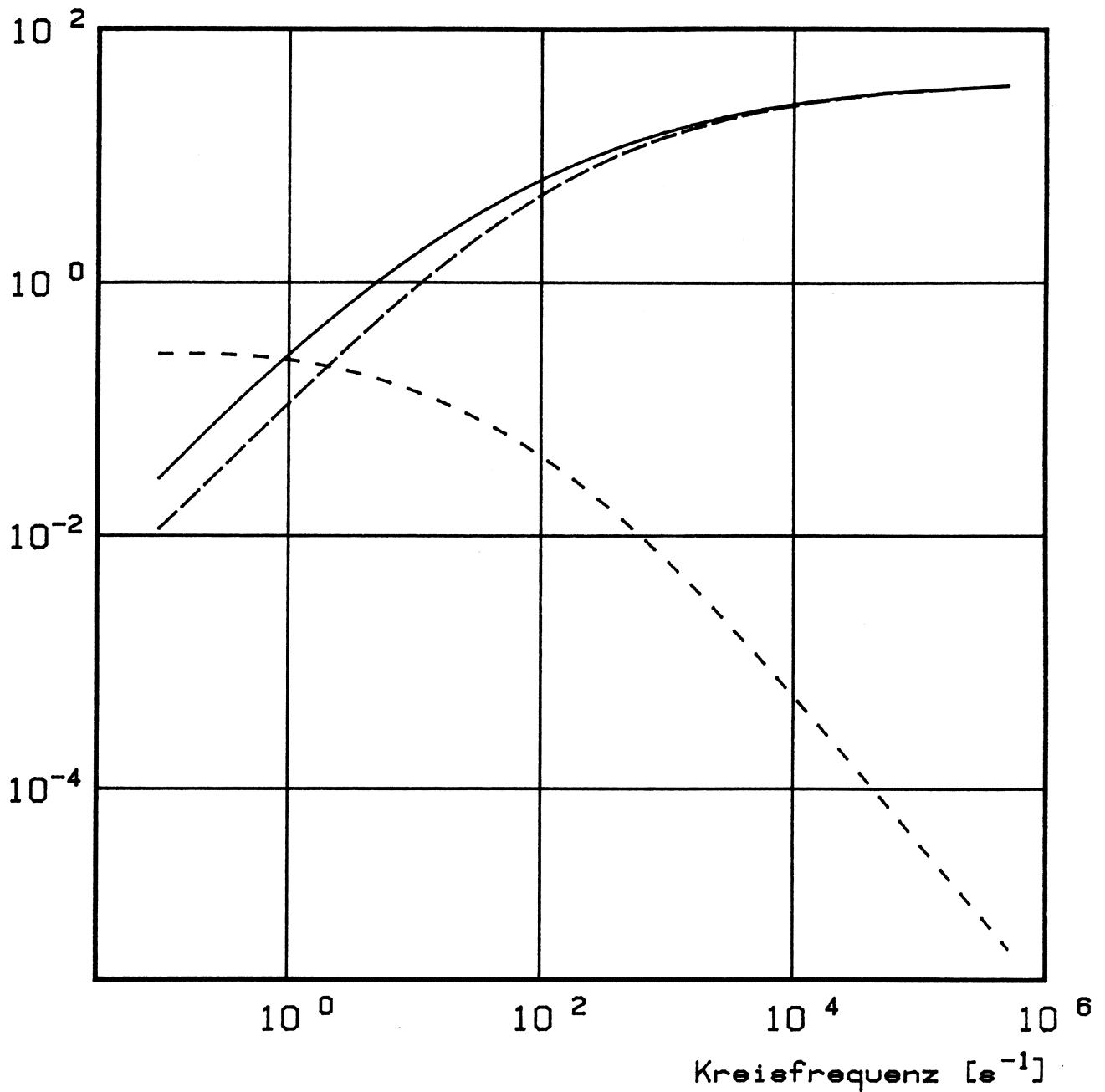
- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.827E 01 Scherempf.: 0.365 Visk.: 9.318E-01

50% Filler H

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

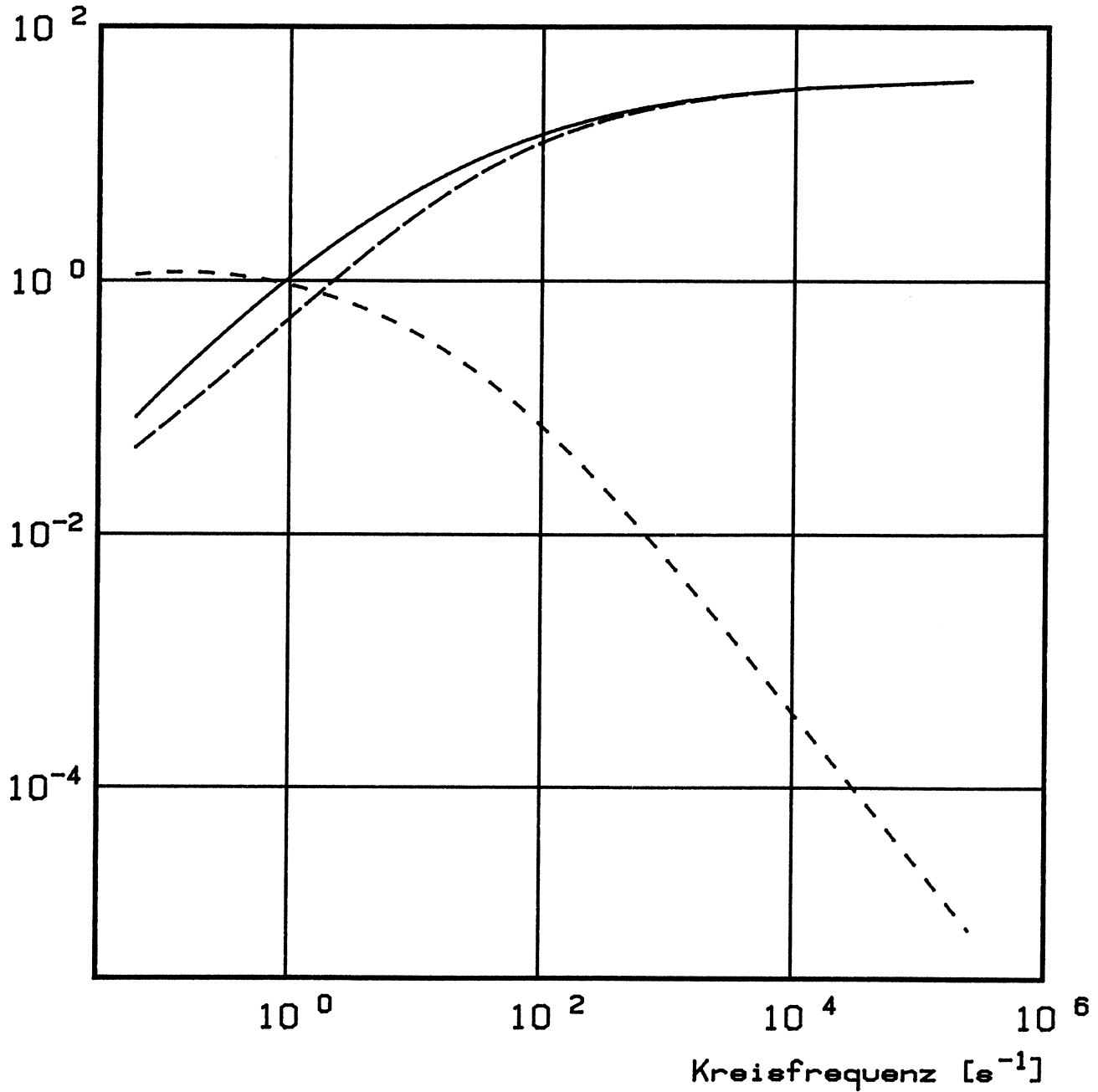
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.089E 01 Scherempf.: 0.358 Visk.: 2.449E-01

70% Filler H

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

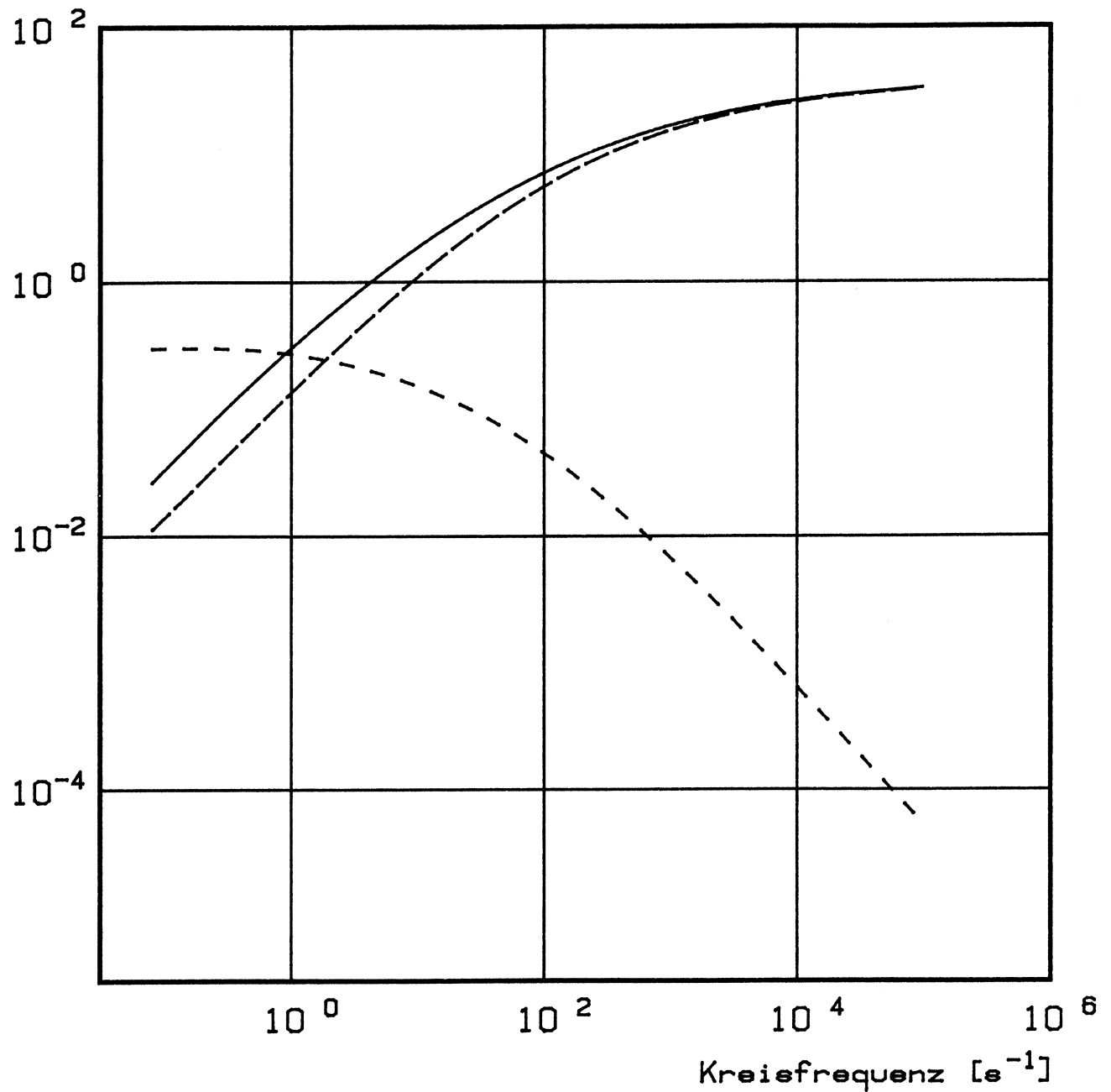
- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.004E 01 Scherempf.: 0.400 Visk.: 9.187E-01

50% Filler K

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

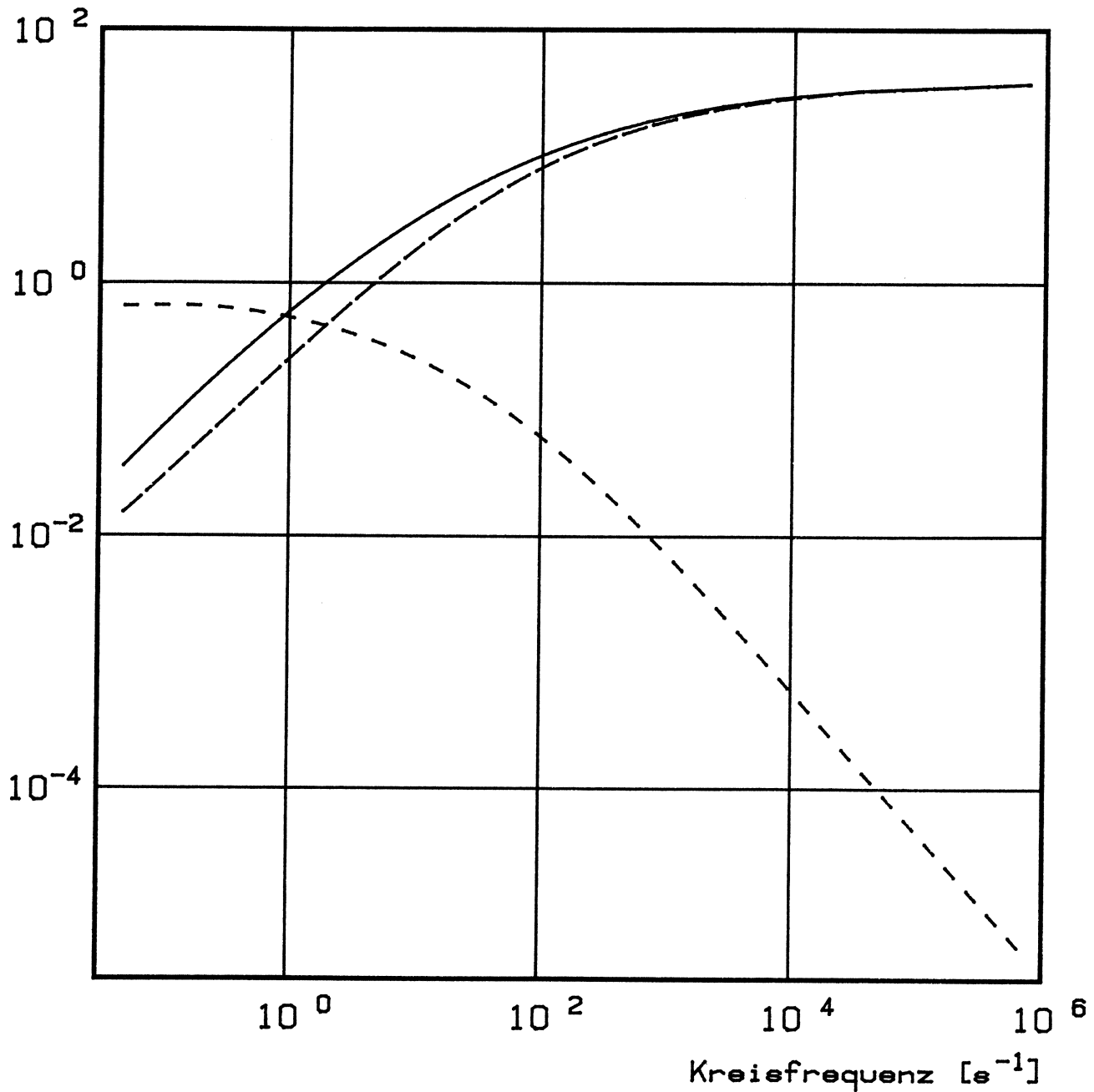
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.004E 01 Scherempf.: 0.371 Visk.: 2.652E-01

65% Filler K

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



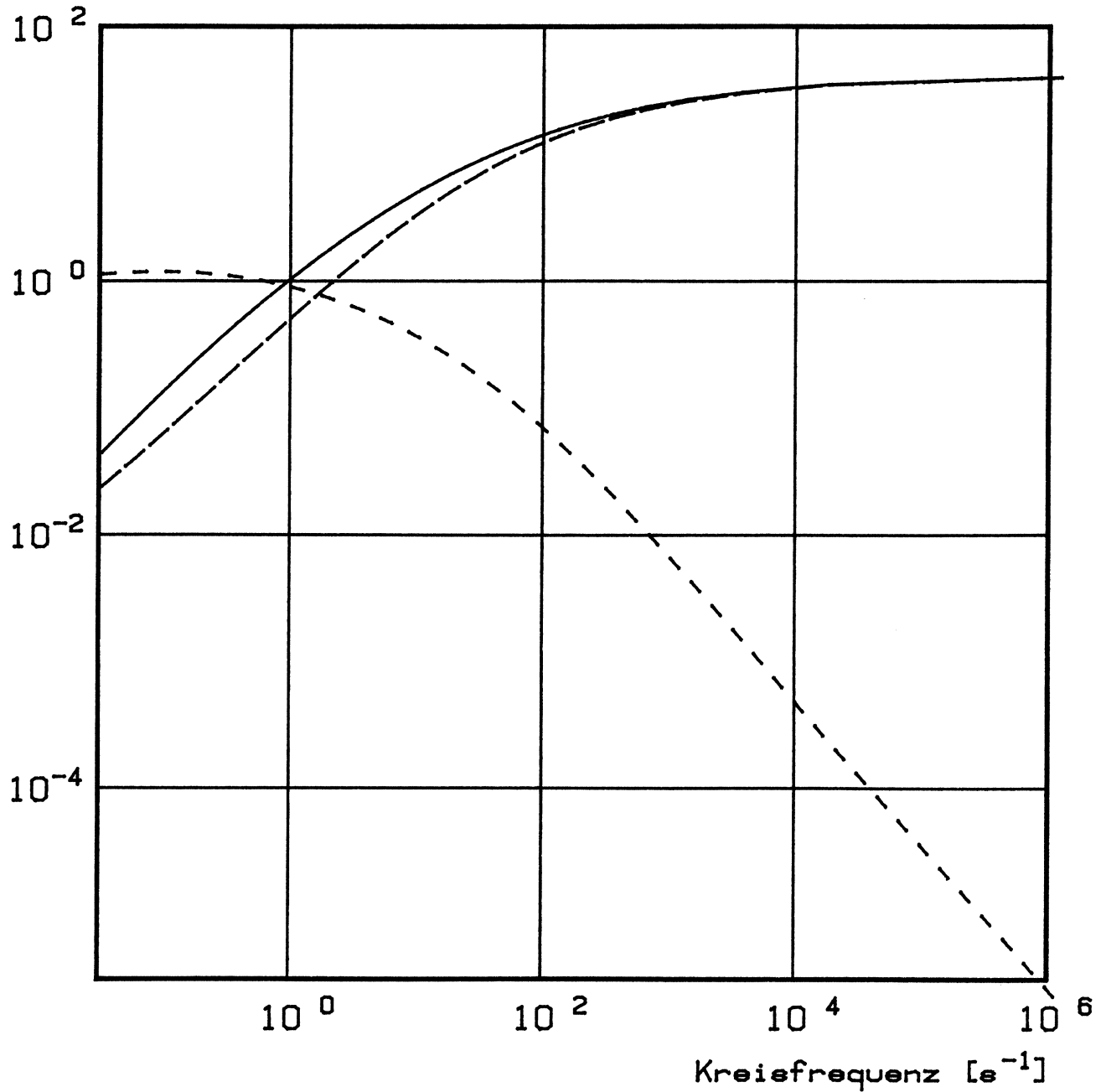
————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls
 - - - - - G': Speichermodul
 - . - . - . Schwingungviskosität

G-un.: 4.079E 01 Scherempf.: 0.371 Visk.: 5.186E-01

70% Filler K

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

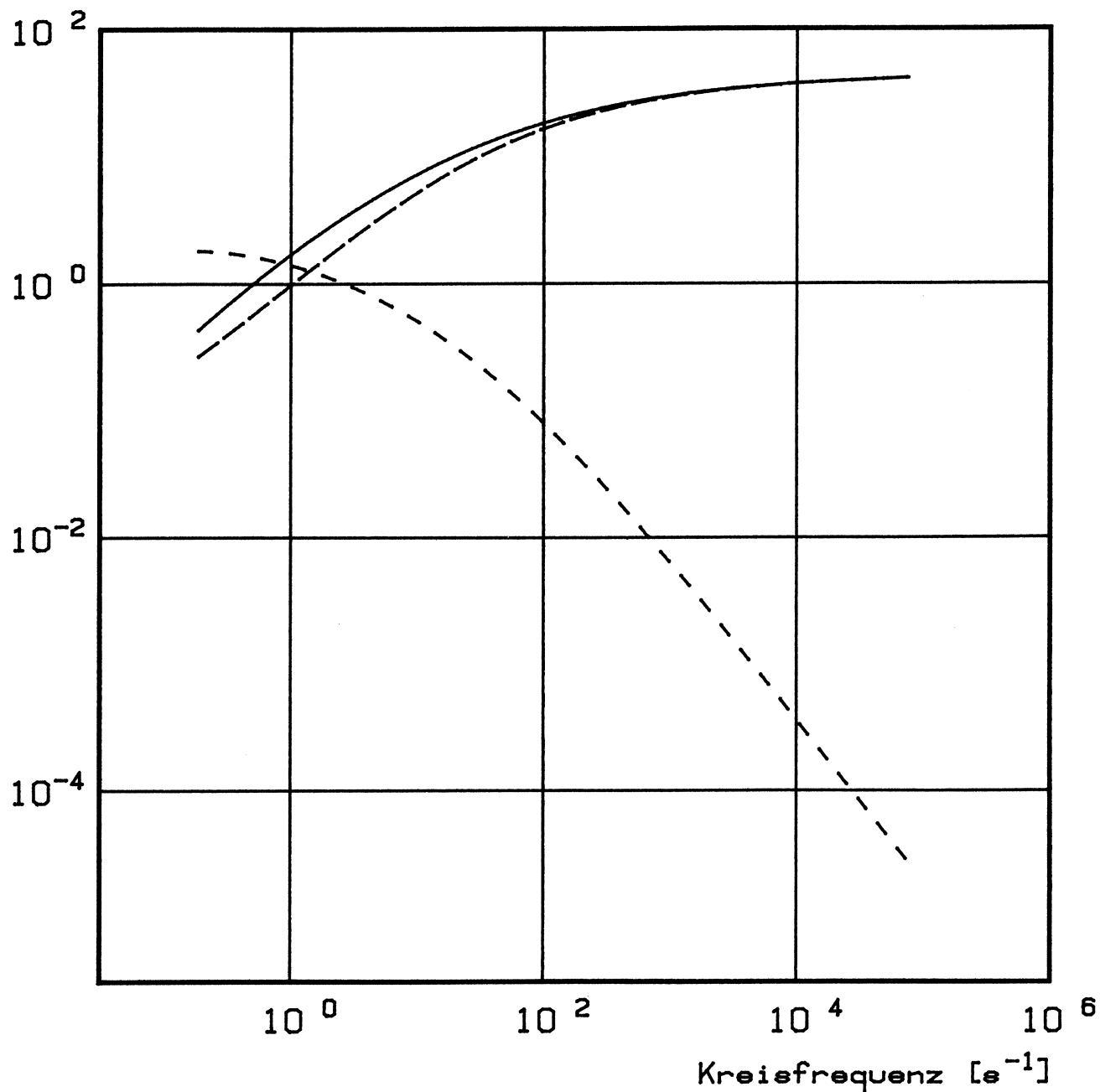
----- G' : Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.195E 01 Scherempf.: 0.390 Visk.: 8.608E-01

75% Filler K

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

- - - G': Speichermodul

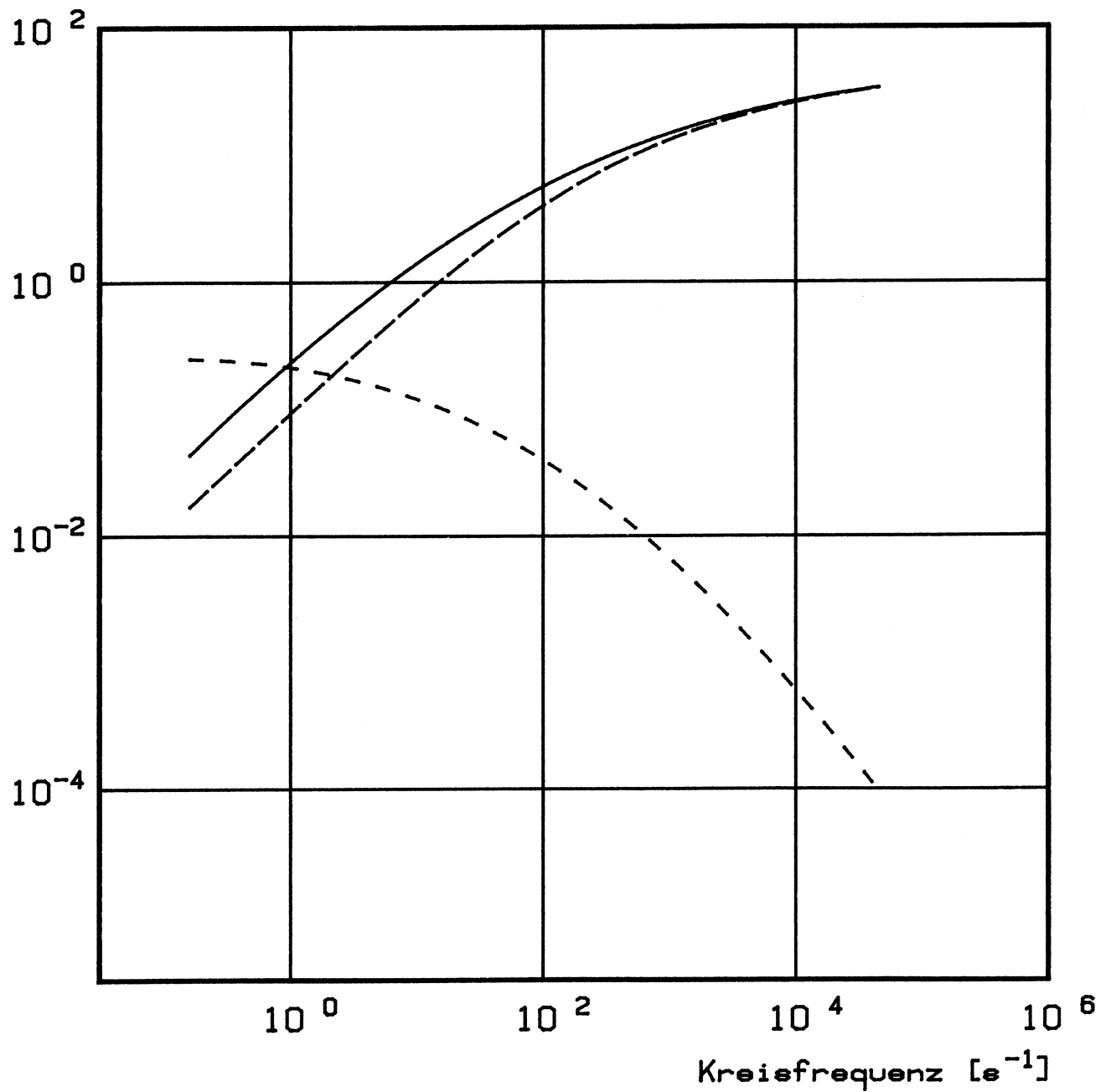
- . - . - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.479E 01 Scherempf.: 0.395 Visk.: 1.399E 00

50% Filler M

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

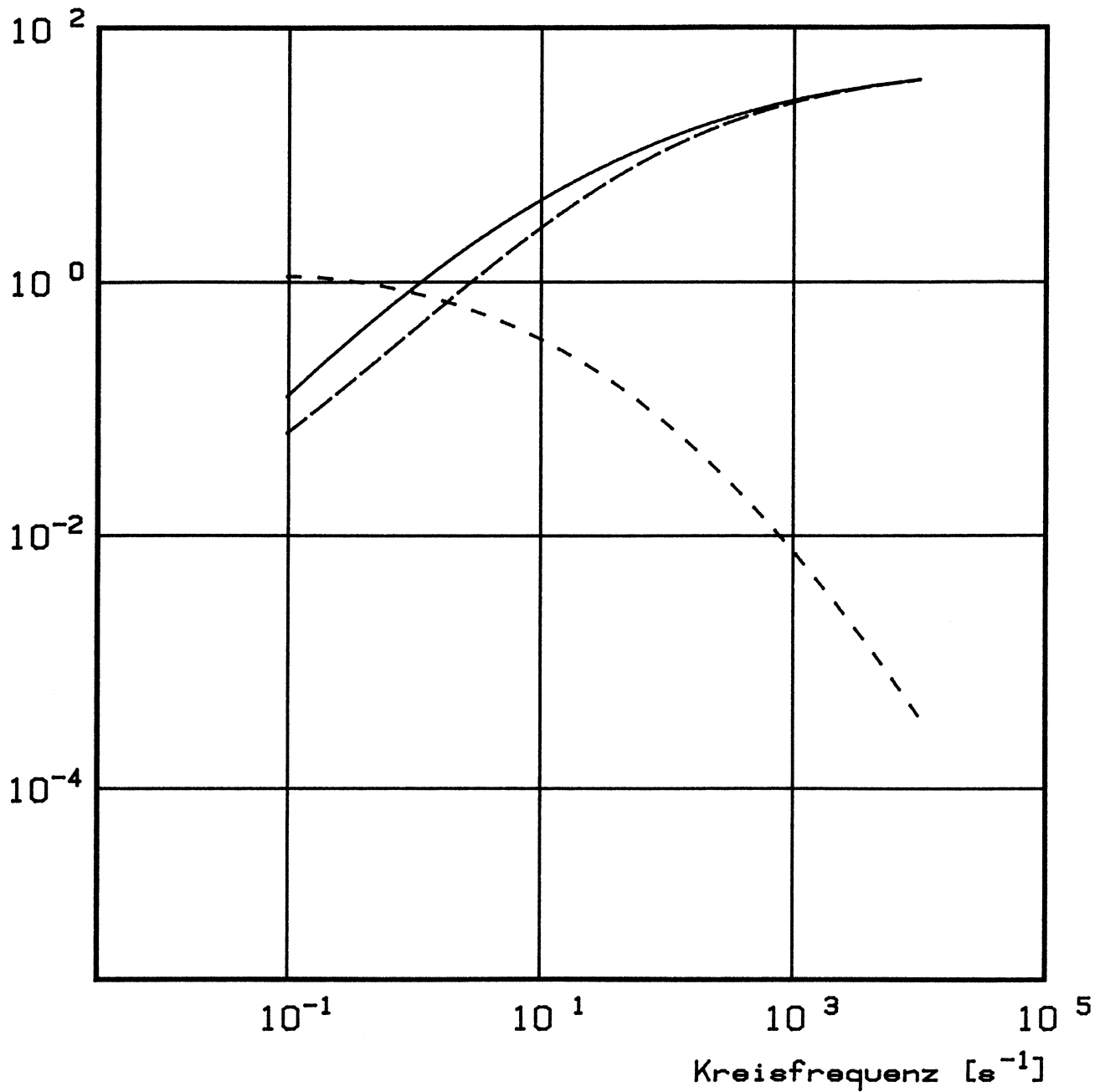
- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 5.179E 01 Scherempf.: 0.317 Visk.: 2.124E-01

70% Filler M

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

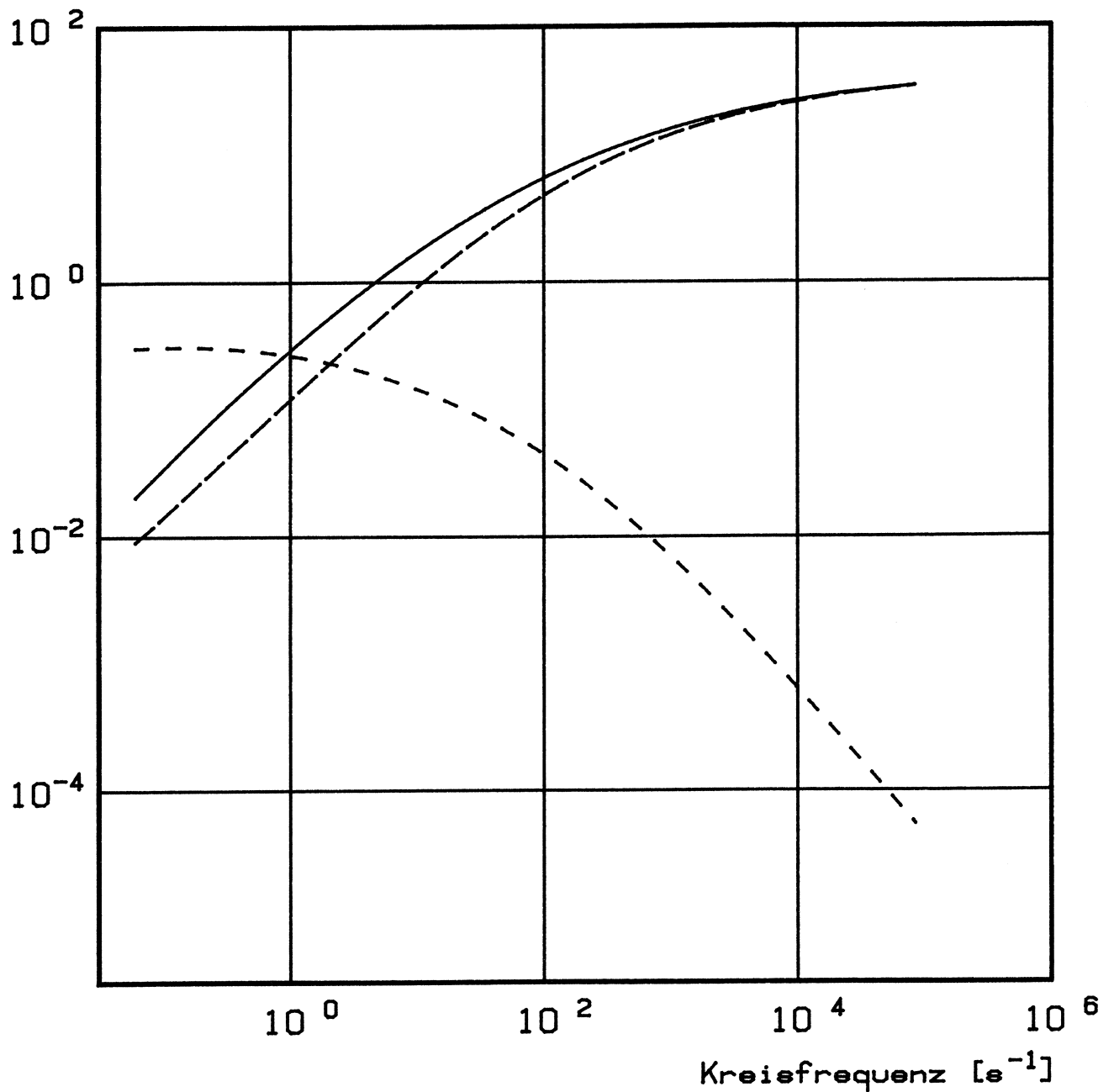
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 5.655E 01 Scherempf.: 0.338 Visk.: 8.054E-01

50% Filler N

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G' : Speichermodul

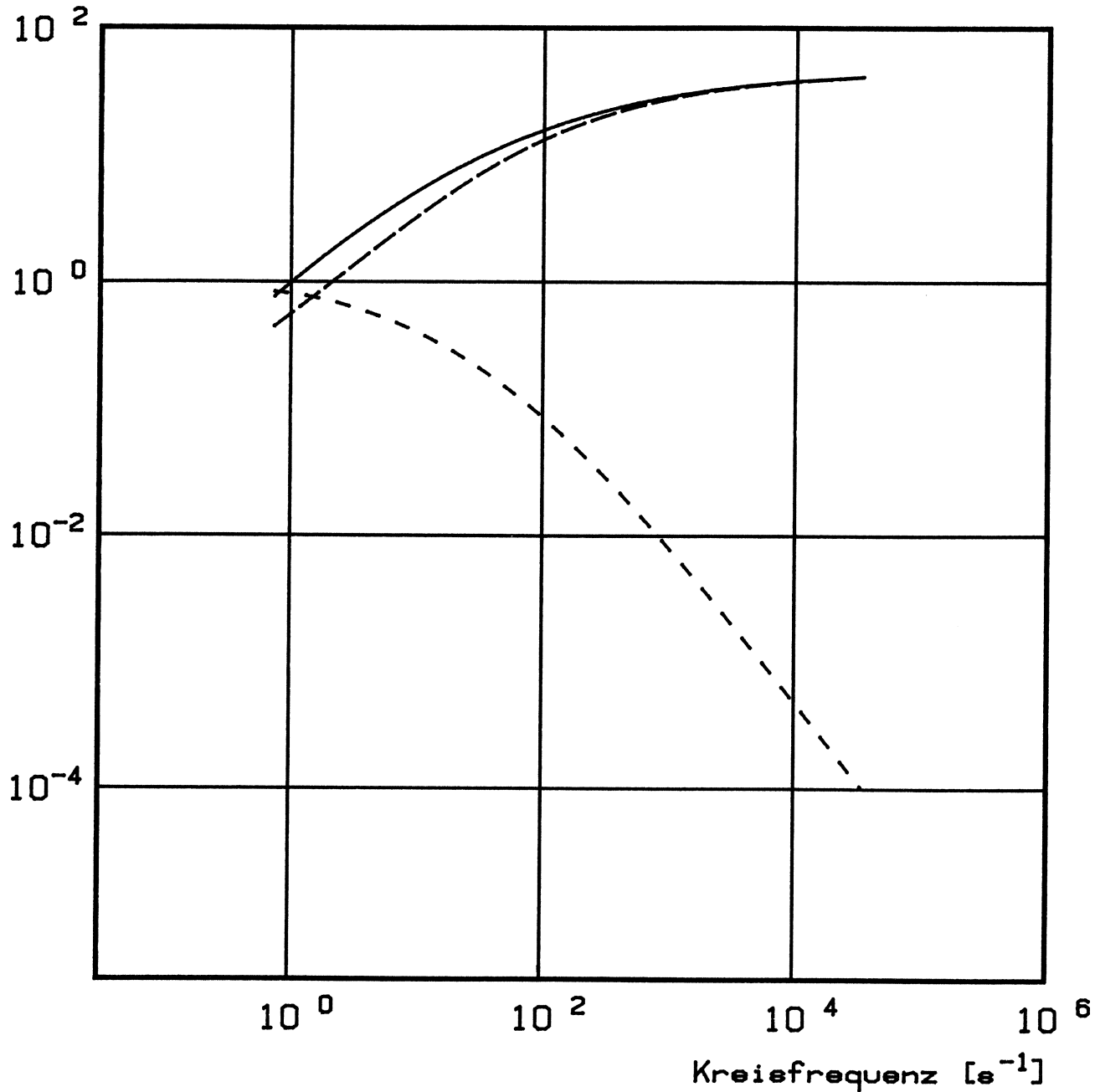
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.505E 01 Scherempf.: 0.336 Visk.: 2.656E-01

70% Filler N

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls

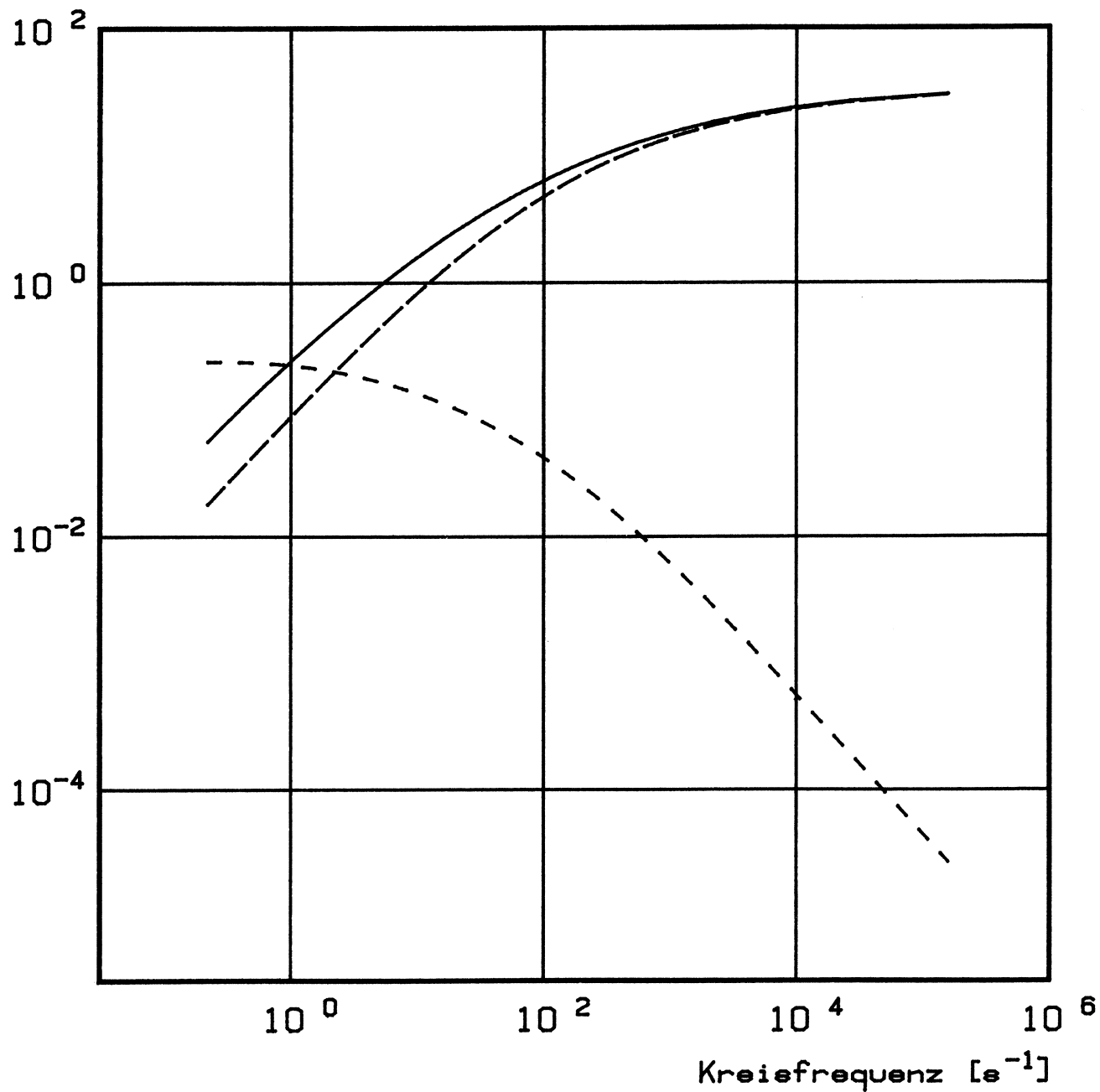
----- G' : Speichermodul

- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.704E 01 Scherempf.: 0.414 Visk.: 8.016E-01

50% Filler 0

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

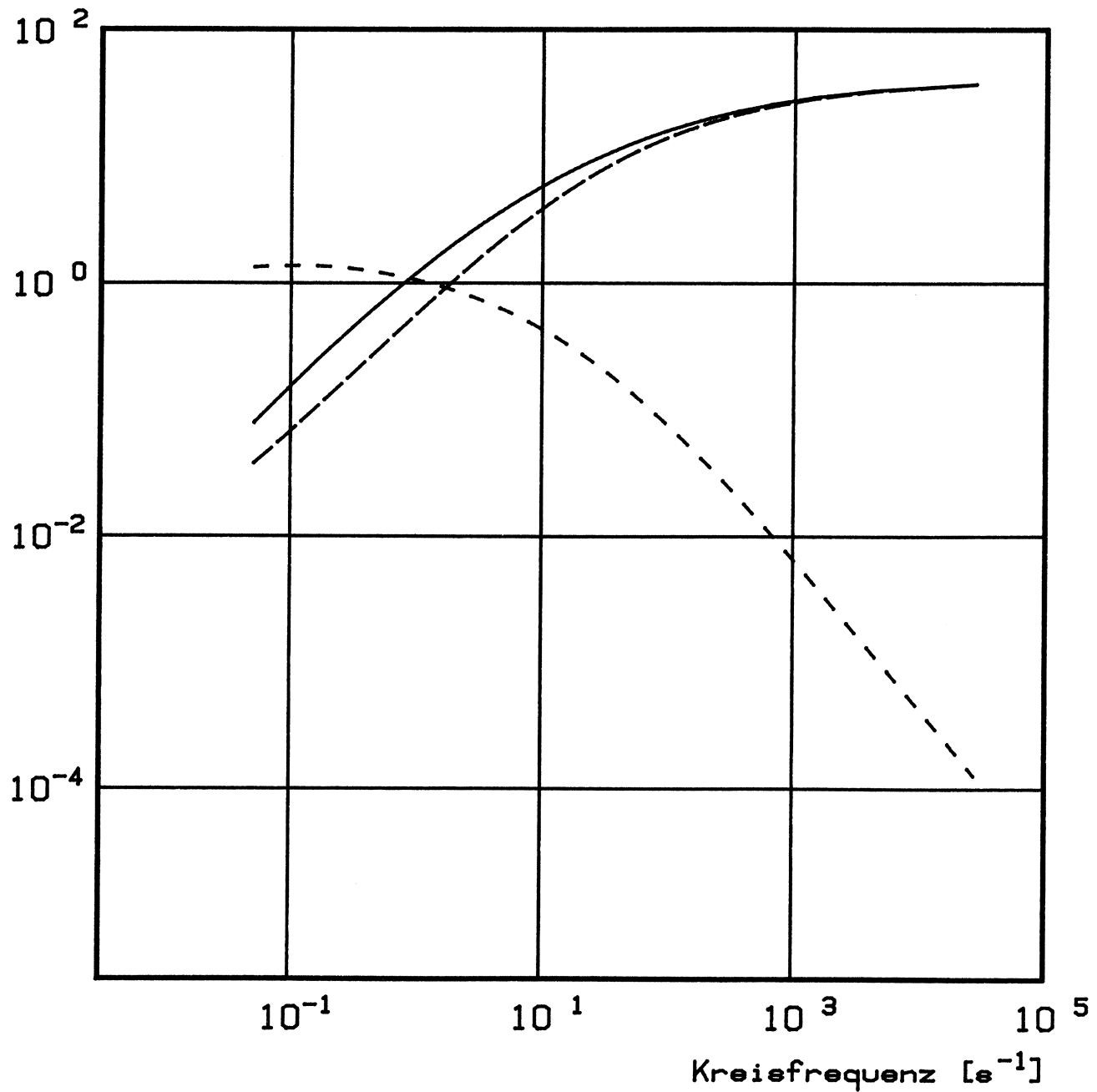
- - - G': Speichermodul

- . - . - Schwingungviskosität

G-un.: 3.472E 01 Scherempf.: 0.390 Visk.: 2.242E-01

70% Filler 0

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

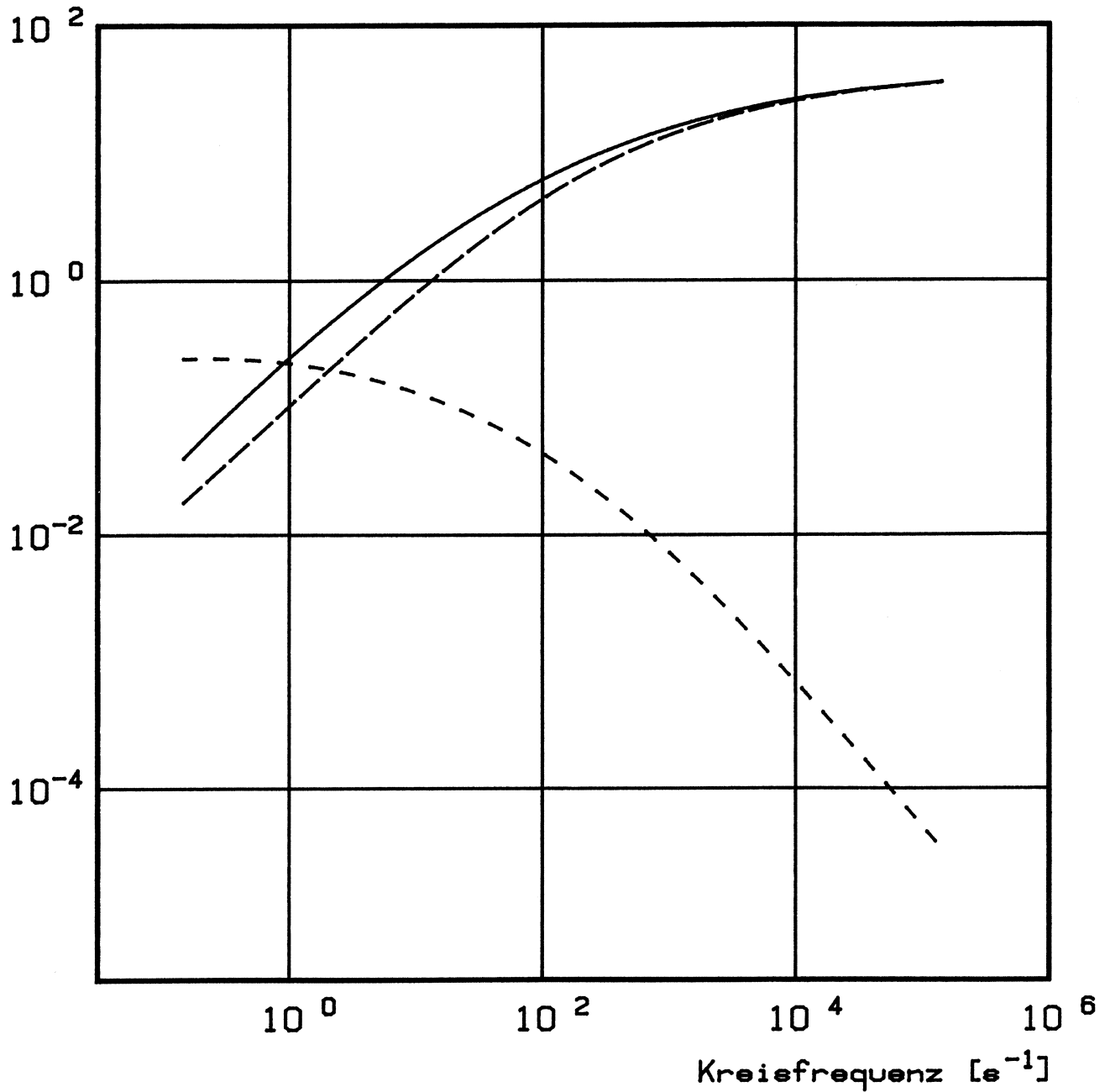
————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls
 - - - - - G': Speichermodul
 - . - . - . Schwingungsviskosität

G-un.: 4.187E 01 Scherempf.: 0.416 Visk.: 1.033E 00

50% Filler Q

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

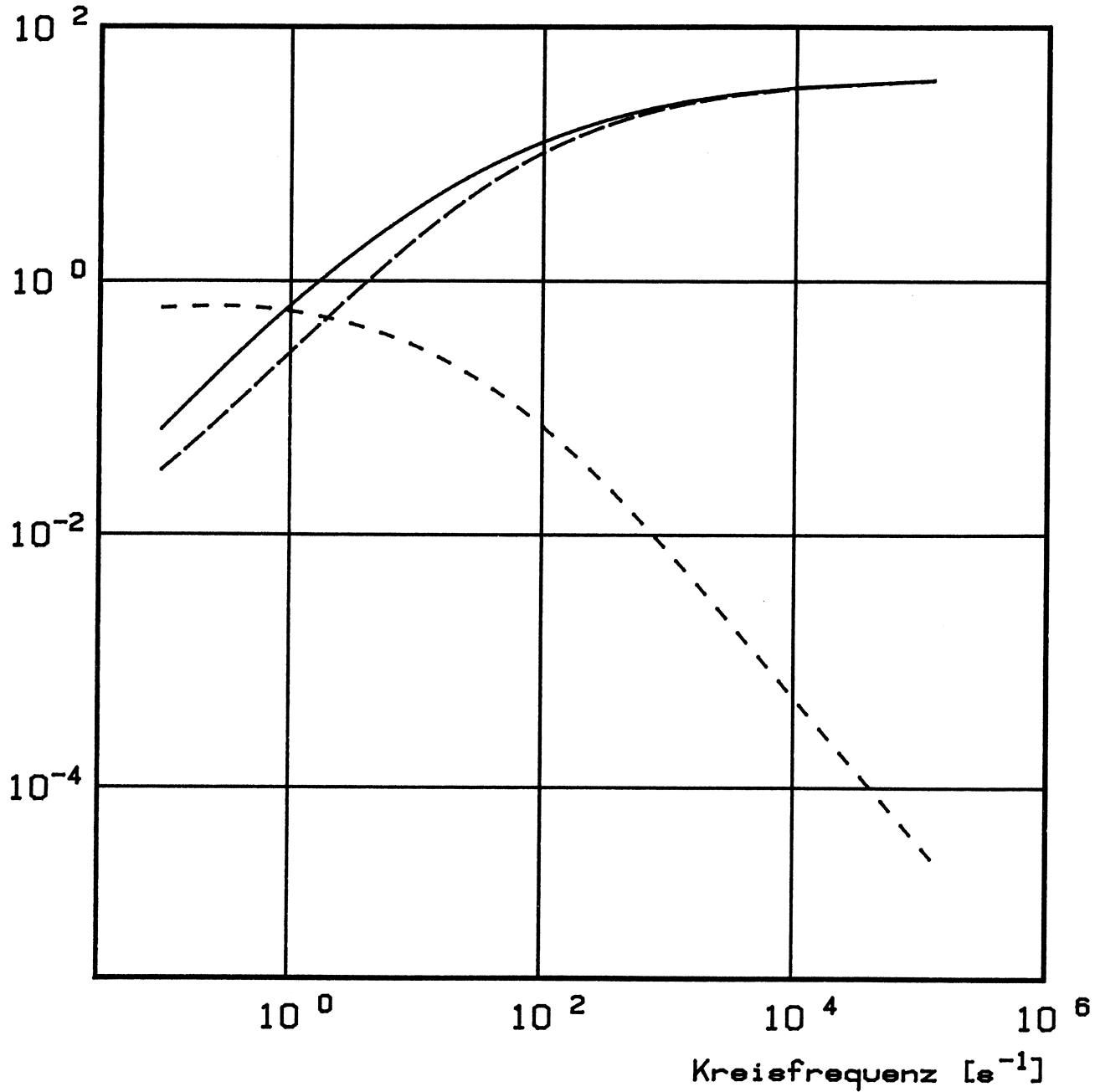


————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls
 - - - - - G': Speichermodul
 - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.481E 01 Scherempf.: 0.348 Visk.: 2.217E-01

65% Filler Q

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]————— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls----- G' : Speichermodul

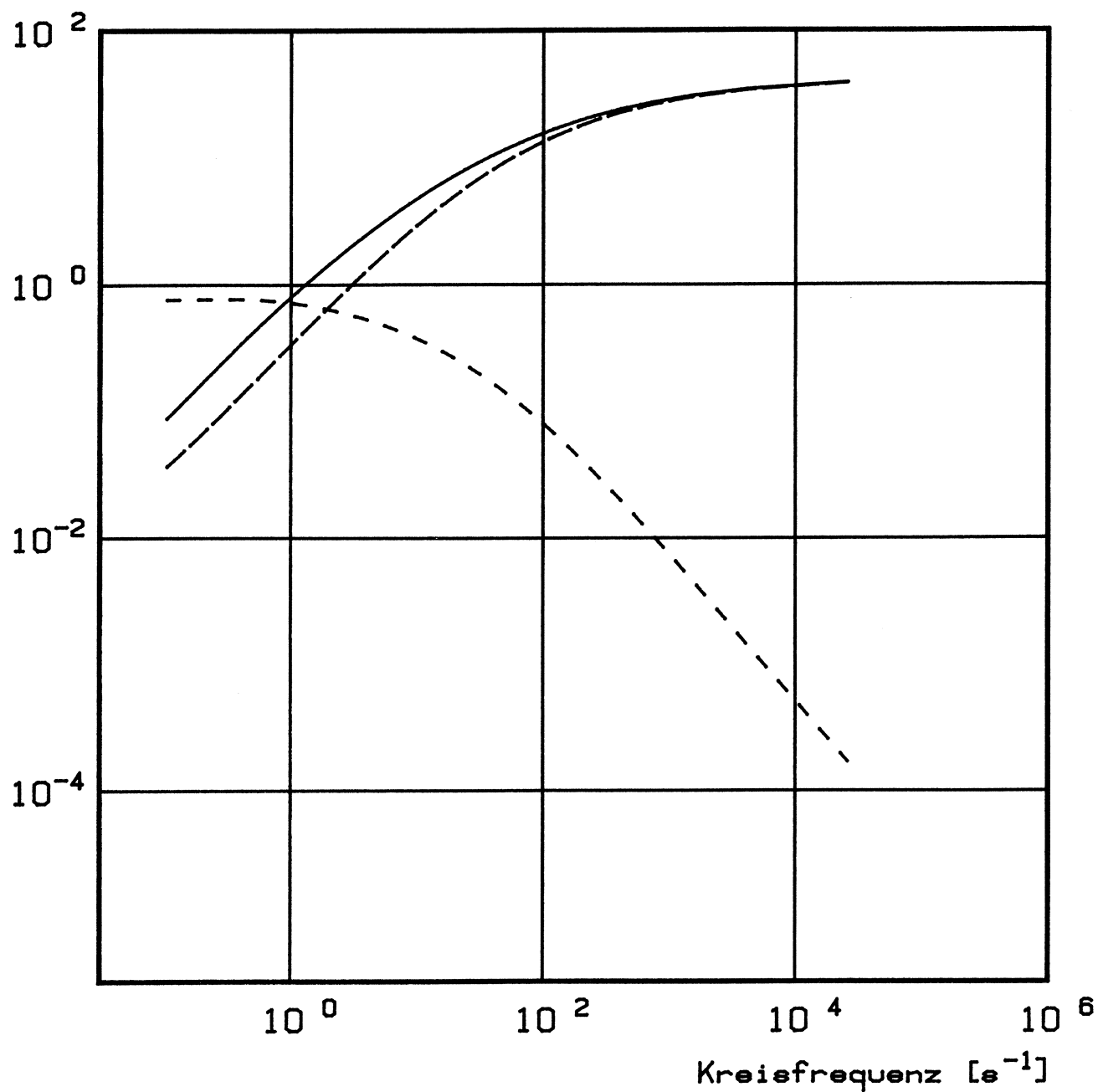
- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.155E 01 Scherempf.: 0.427 Visk.: 5.773E-01

70% Filler Q

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

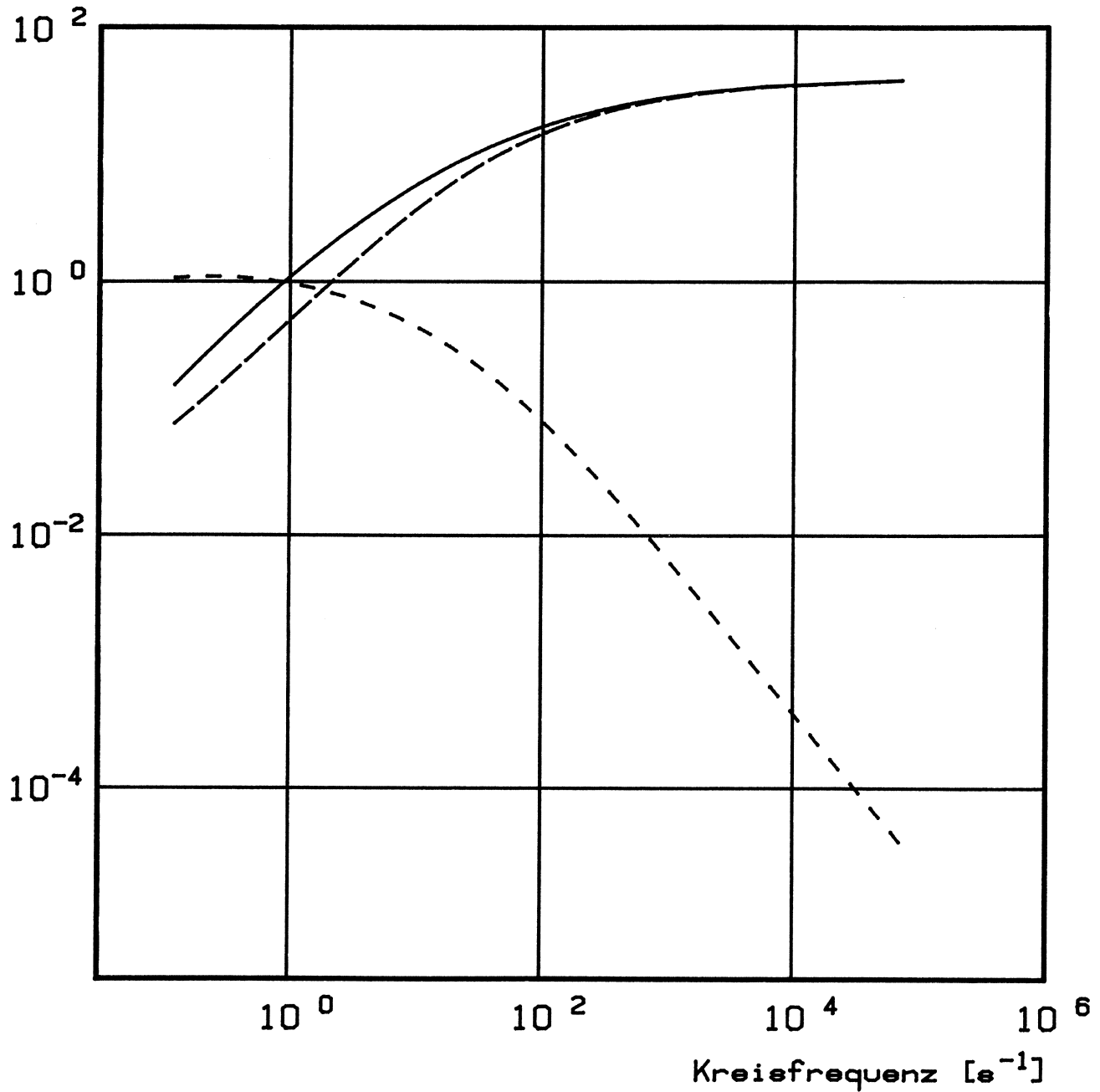
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungviskosität

G-un.: 4.322E 01 Scherempf.: 0.467 Visk.: 7.196E-01

75% Filler Q

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]— G^* : Betrag des komplexen Schubmoduls- - - G' : Speichermodul

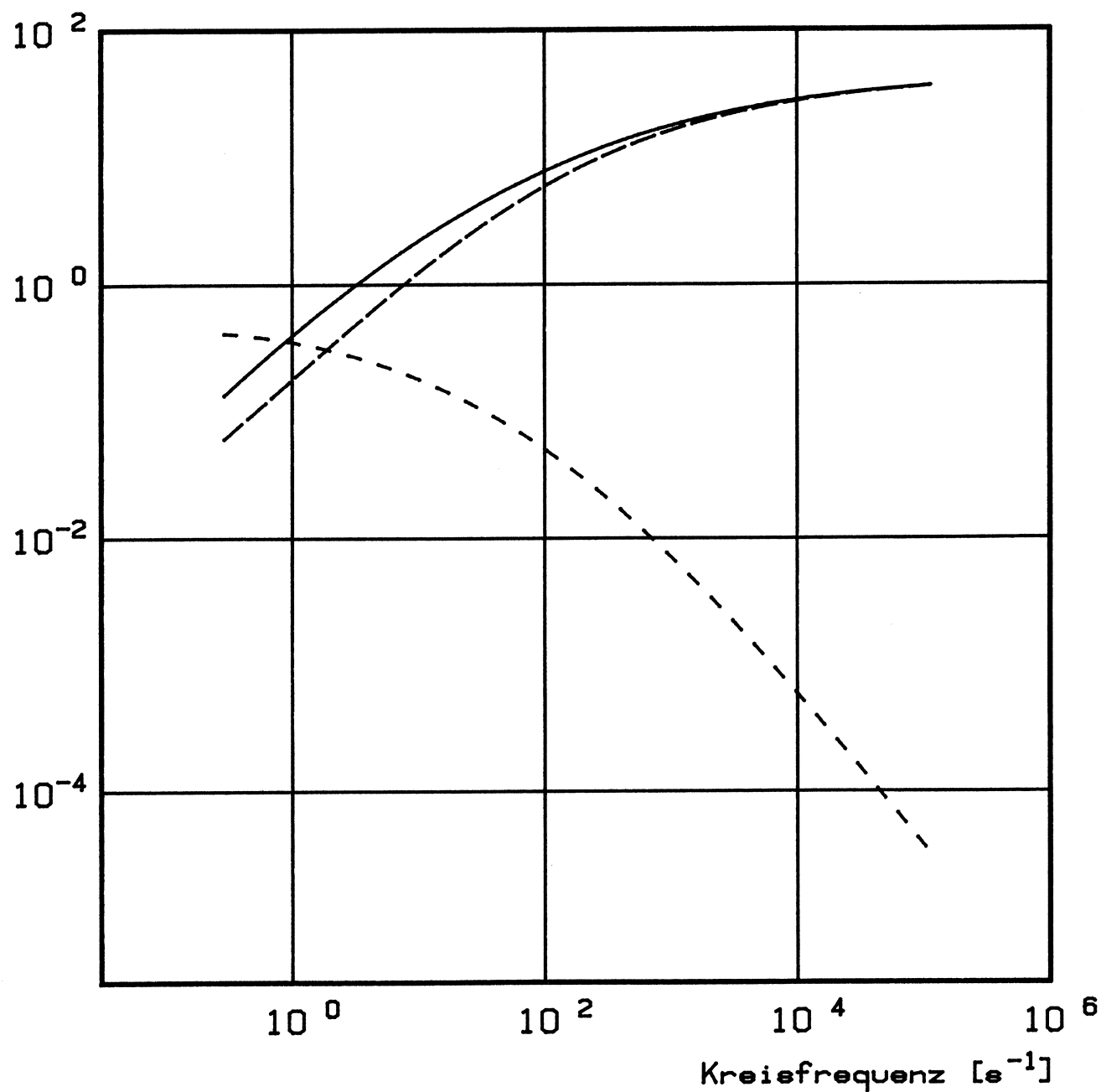
- . - . - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.100E 01 Scherempf.: 0.456 Visk.: 9.664E-01

50% Filler T

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]



———— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

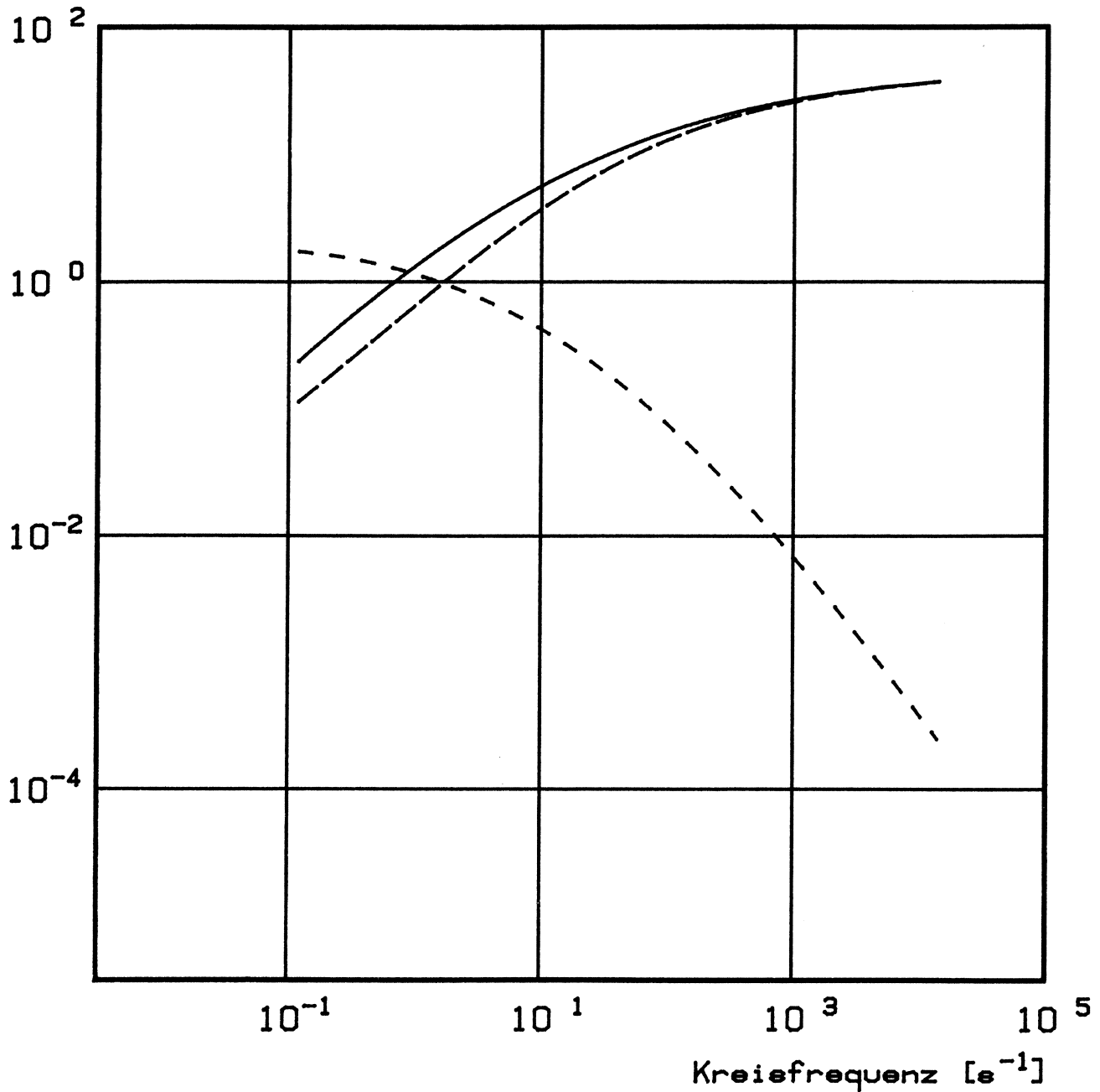
----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.544E 01 Scherempf.: 0.336 Visk.: 3.519E-01

65% Filler T

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

Modul [N/mm²], Visk. [MPa*s]

————— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

----- G': Speichermodul

- - - - - Schwingungsviskosität

G-un.: 4.827E 01 Scherempf.: 0.346 Visk.: 1.158E 00

2. Auswerten der Temperaturabhängigkeit

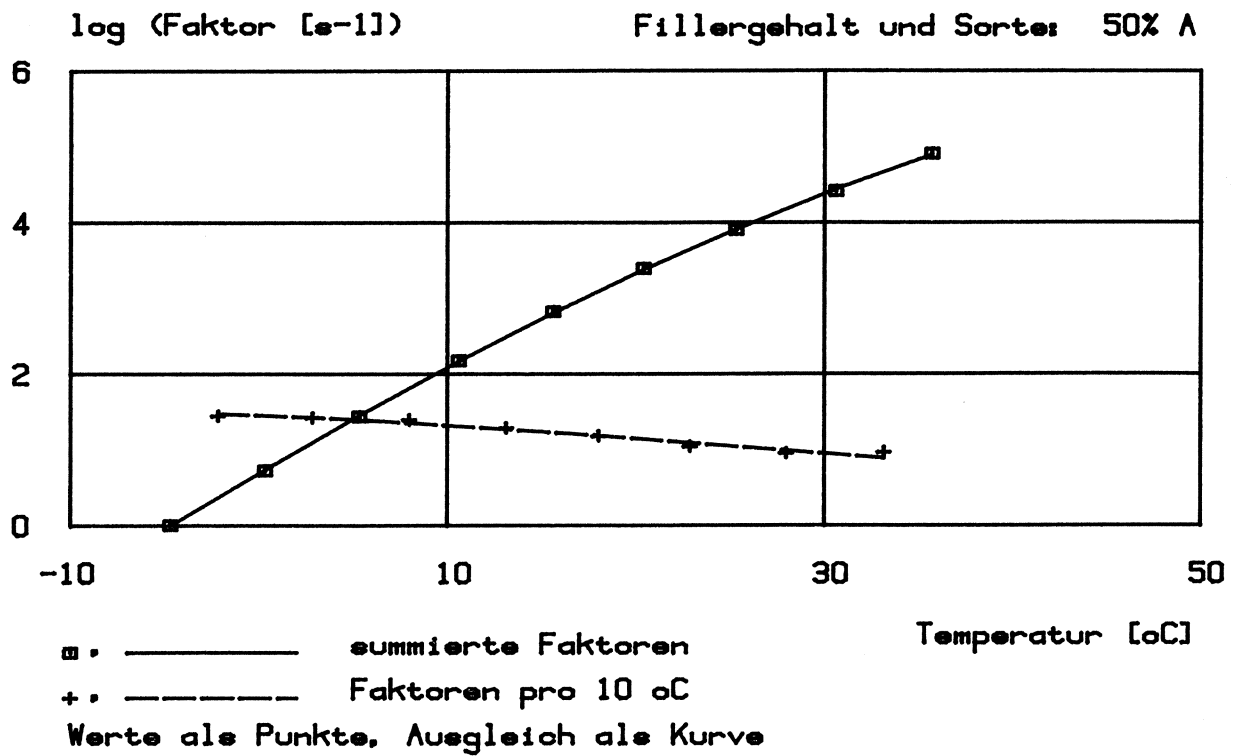
Um eine Masterkurve zu konstruieren, muss der Temperatureinfluss durch eine Frequenzkorrektur aufgehoben werden. Die notwendige Frequenzkorrektur kann deshalb als Mass für die Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verhaltens verstanden werden. Da die Frequenzkorrektur zwischen benachbarten Messtemperaturen erfolgt, ist sie selber eine Funktion der Temperatur. Die Korrektur wurde durch quadratische Regression beschrieben. Somit kann eine Temperatur maximal nötiger Frequenzkorrektur ermittelt werden. Als Mass für das Abweichen vom linearen Verhalten wurde die Nichtlinearität definiert als Verhältnis des quadratischen zum linearen Koeffizienten aus der quadratischen Regression. Die beiden Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Normalerweise existiert eine Temperatur maximal nötiger Frequenzkorrektur, wenn aber die Nichtlinearität nahezu 0 oder positiv ist, kann es kein solches Maximum geben. Die grösste nötige Korrektur tritt dann bei der tiefsten Messtemperatur auf.

Die Frequenzverschiebungsfaktoren sind nachfolgend graphisch dargestellt. Es sind dabei für die verschiedenen Mischungen die Faktoren, die zwischen zwei benachbarten Kurvenästen ermittelt wurden, und die summierten Faktoren aufgetragen. Damit die Faktoren zwischen zwei Kurvenästen in der Darstellung deutlich genug sichtbar werden, wurden sie in logarithmischer Skala verdoppelt. Es sind dann nicht mehr Faktoren pro 5 °C Temperaturänderung, sondern solche pro 10 °C Temperaturänderung, welche in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt sind.

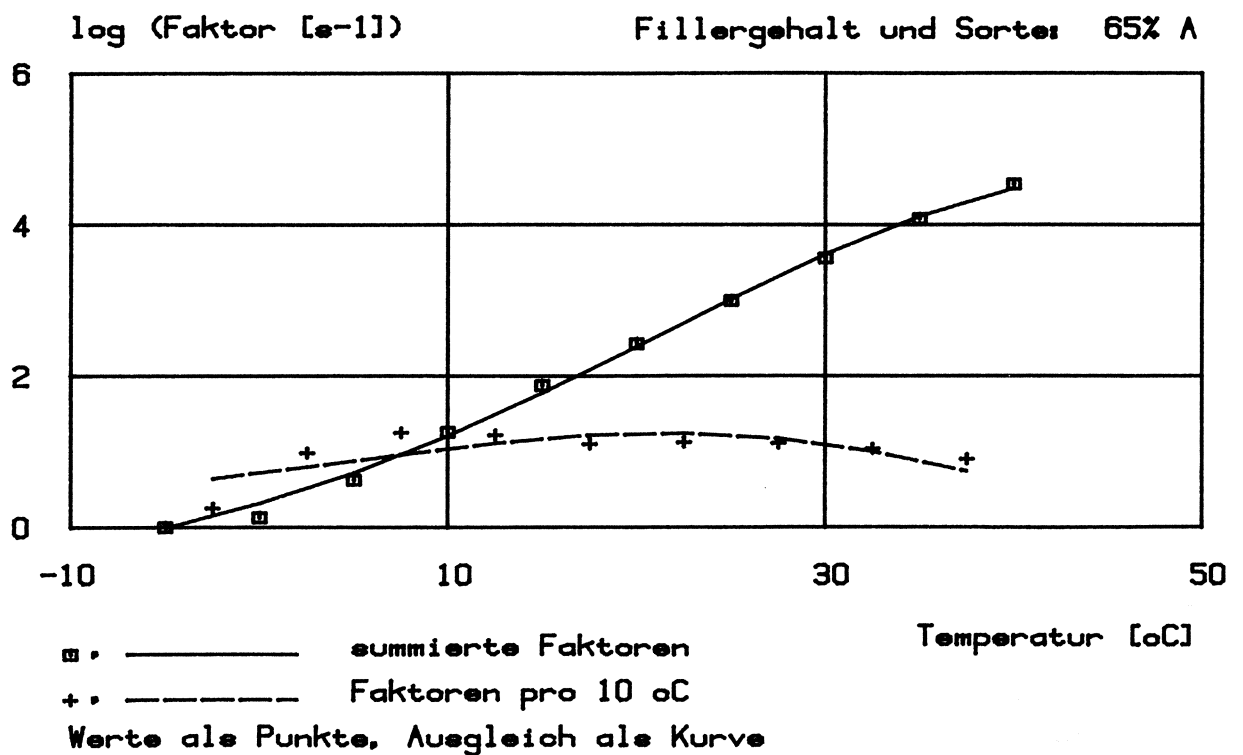
Temperatur maximaler Frequenzkorrektur

Filler	Gehalt Masse-%	T _{max} °C	Nicht- linearität
A	50	-10	0.004
	65	22	-0.01
	70	15	-0.02
	75	19	-0.02
B	50	7	-0.03
	65	2	-0.04
	70	18	-0.02
C	50	-10	-0.002
	65	1	-0.06
	70	12	-0.02
	75	-10	-0.02
D	50	8	-0.02
	70	19	-0.01
E	50	-10	0.04
	65	-10	0.01
	70	15	-0.02
	75	-10	-0.01
F	50	-10	-0.004
	70	25	-0.02
G	50	15	-0.01
	70	21	-0.01
H	50	9	-0.02
	70	18	-0.01
K	50	-10	0.02
	65	0	-0.07
	70	-10	-0.01
	75	-10	-0.01
M	50	16	-0.01
	70	23	-0.01
N	50	1	-0.06
	70	17	-0.02
O	50	6	-0.03
	70	21	-0.01
Q	50	5	-0.03
	65	14	-0.02
	70	19	-0.015
	75	17	-0.015
T	50	-10	0.07
	65	22	--

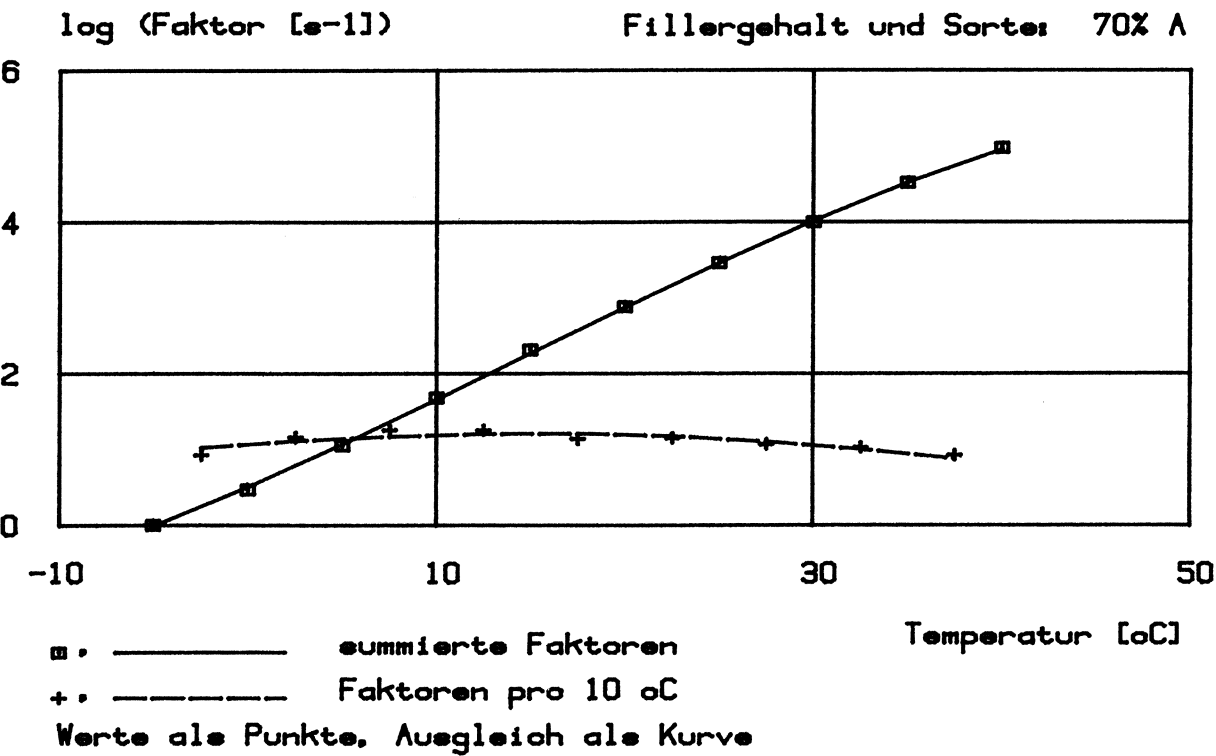
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



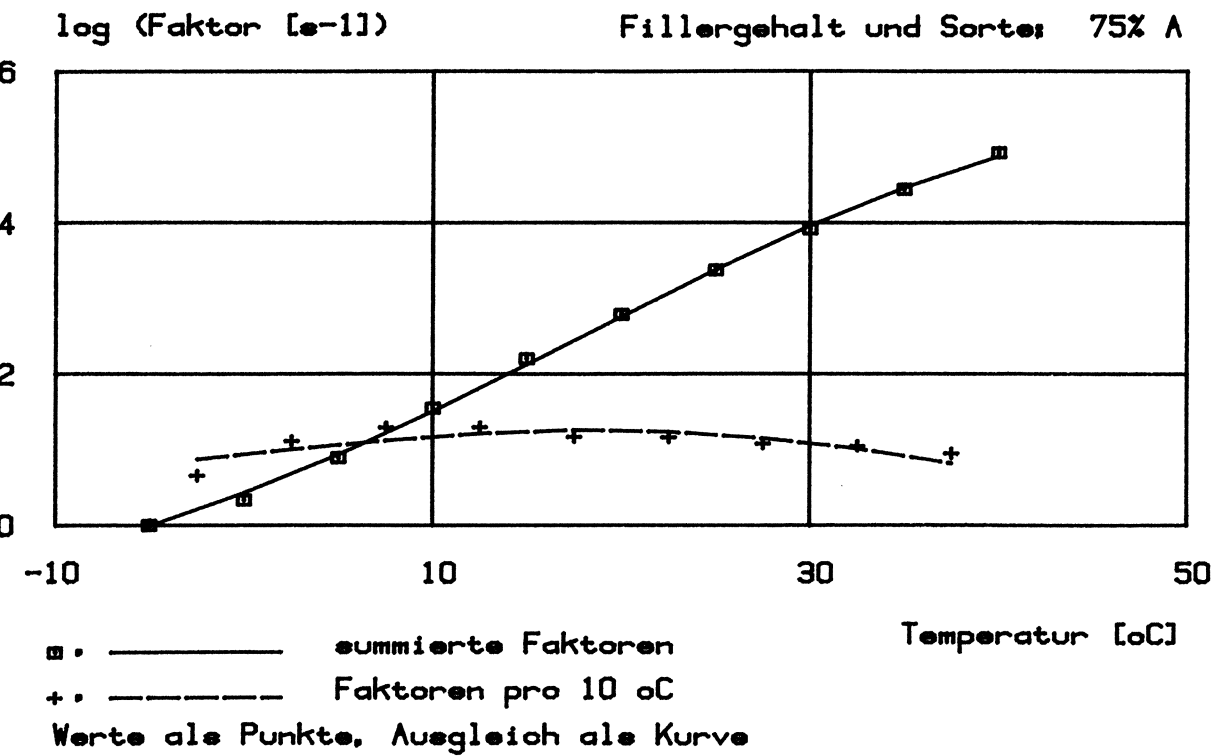
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



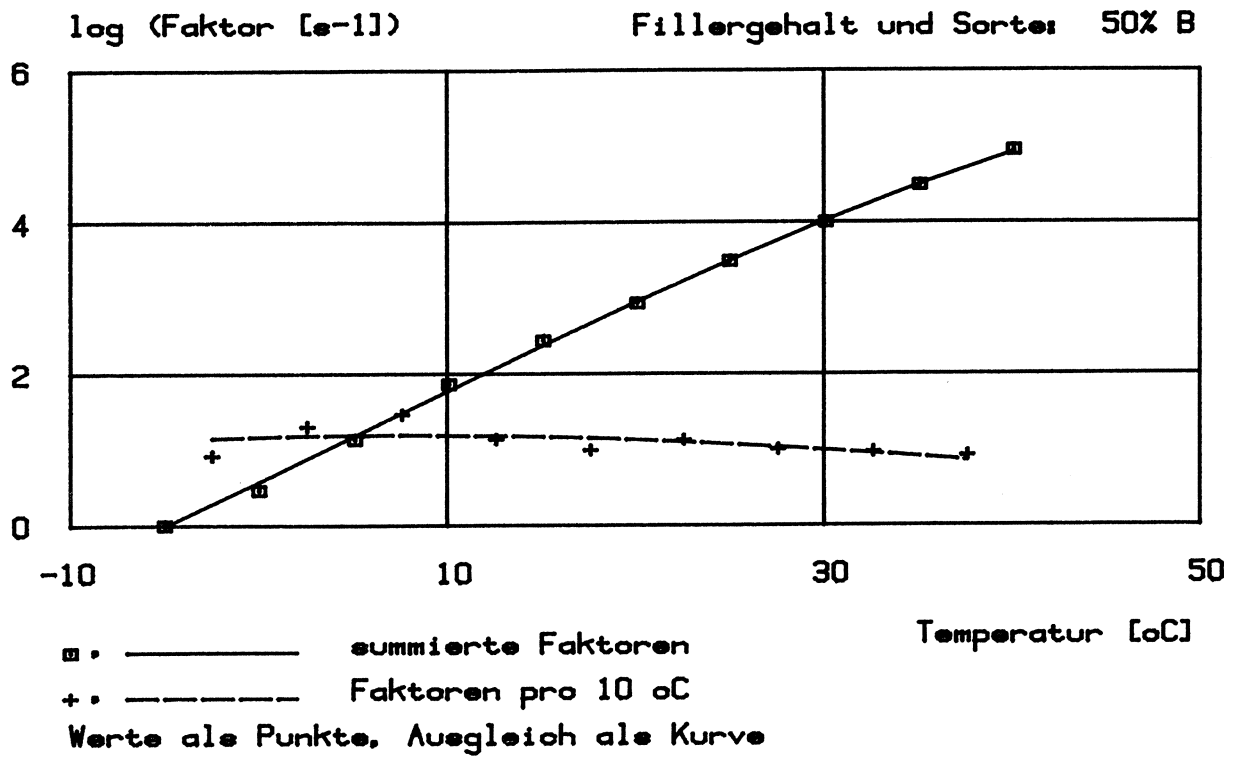
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



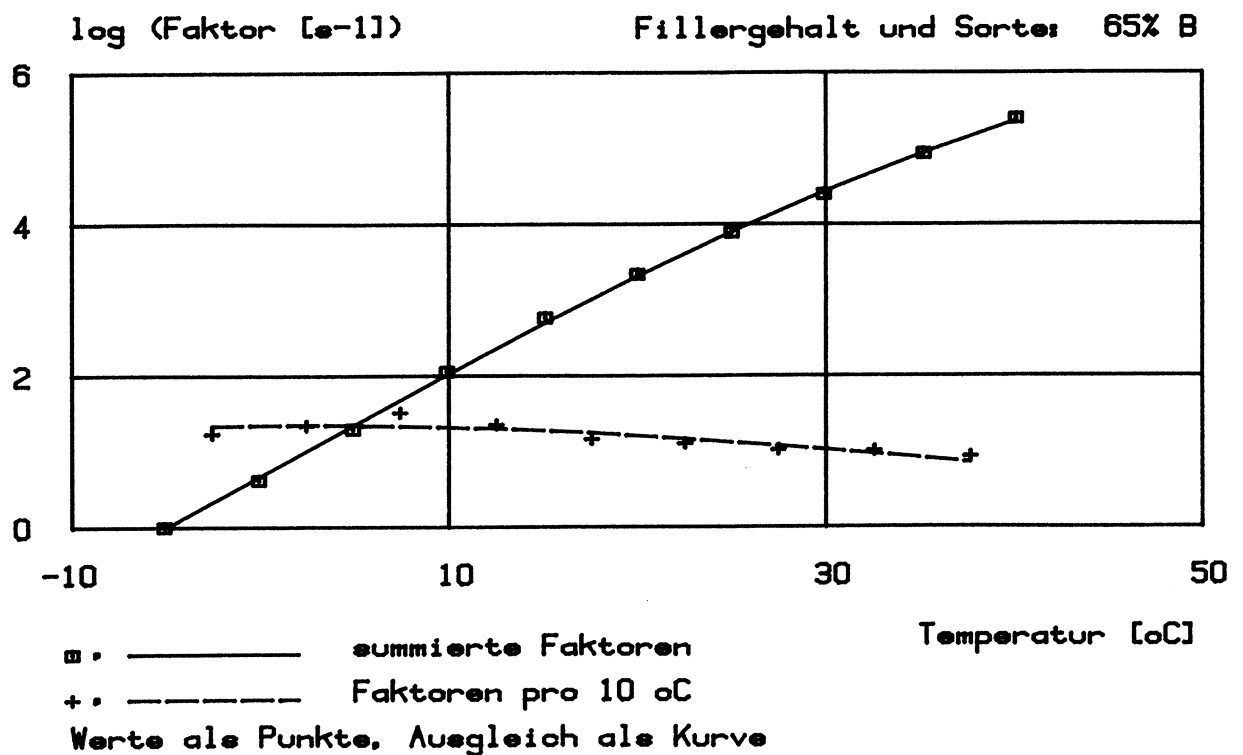
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



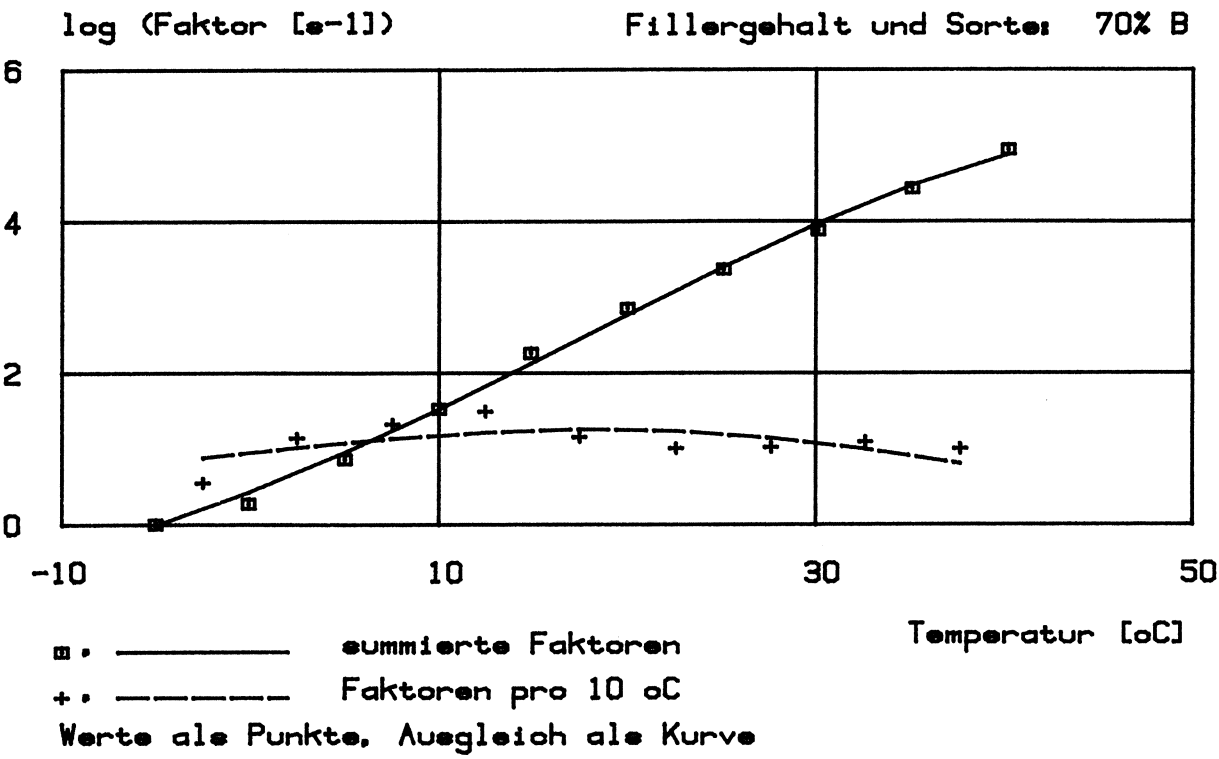
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



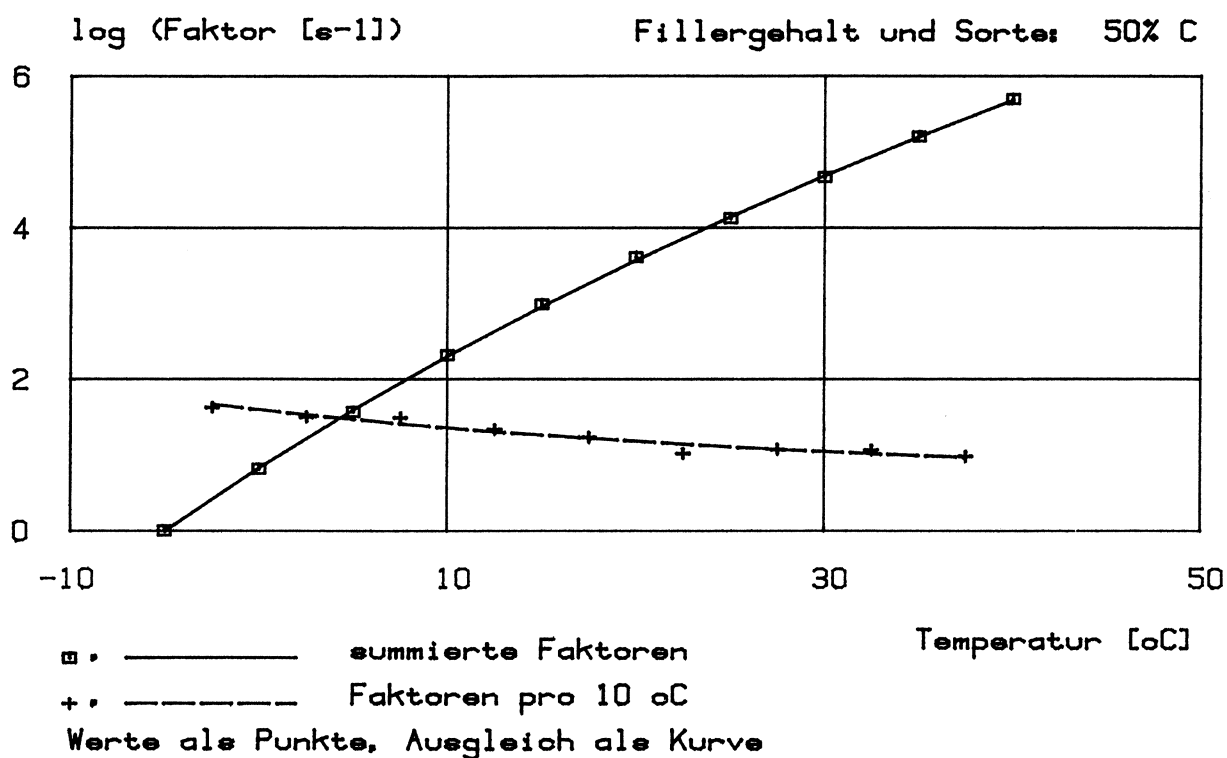
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



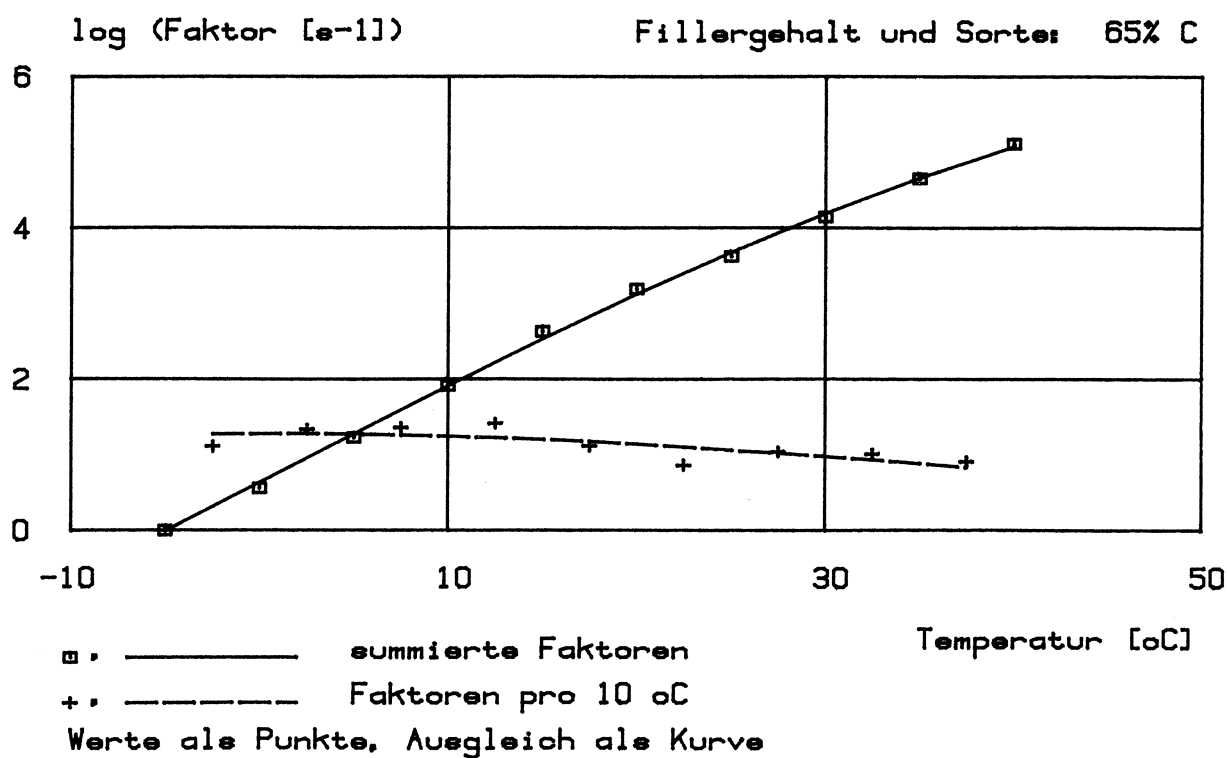
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



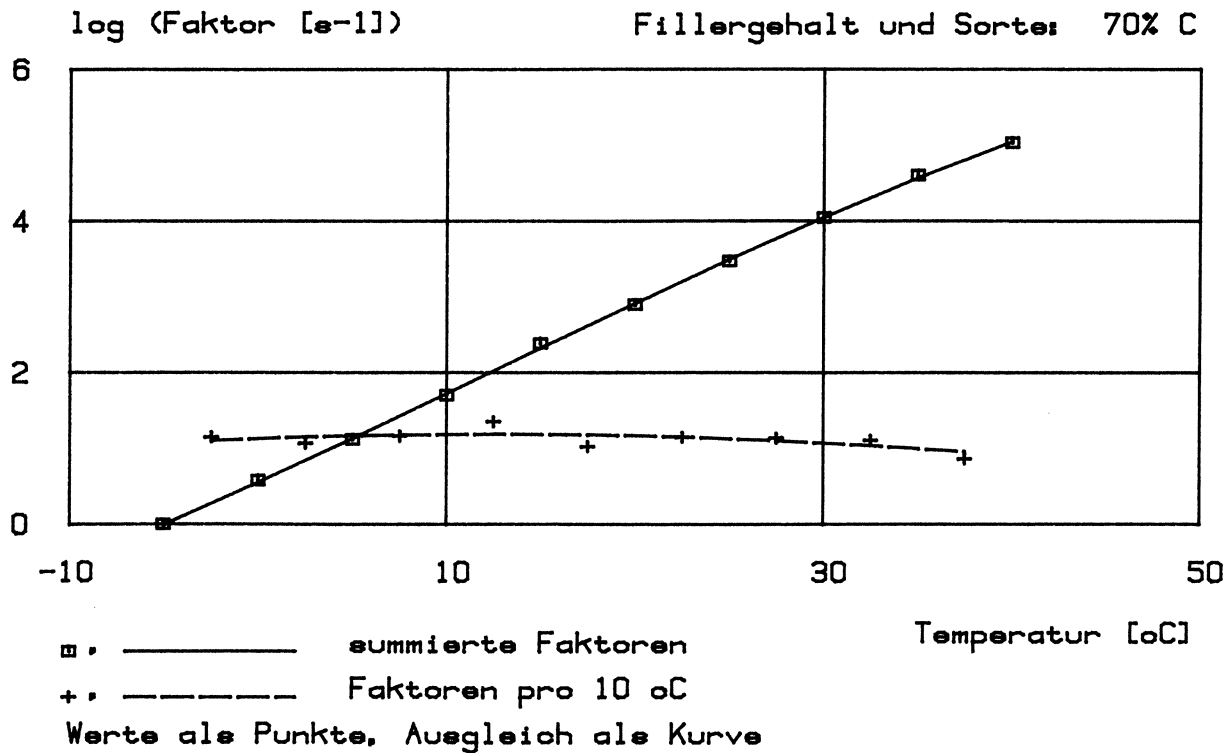
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



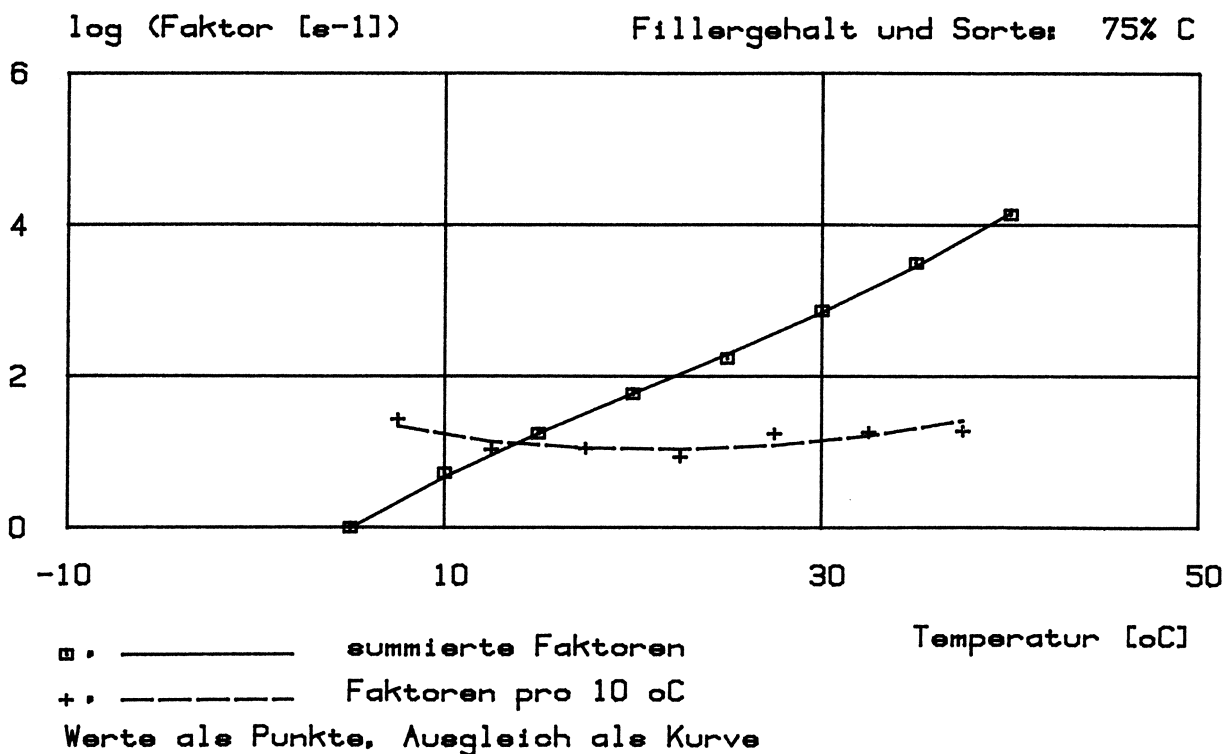
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



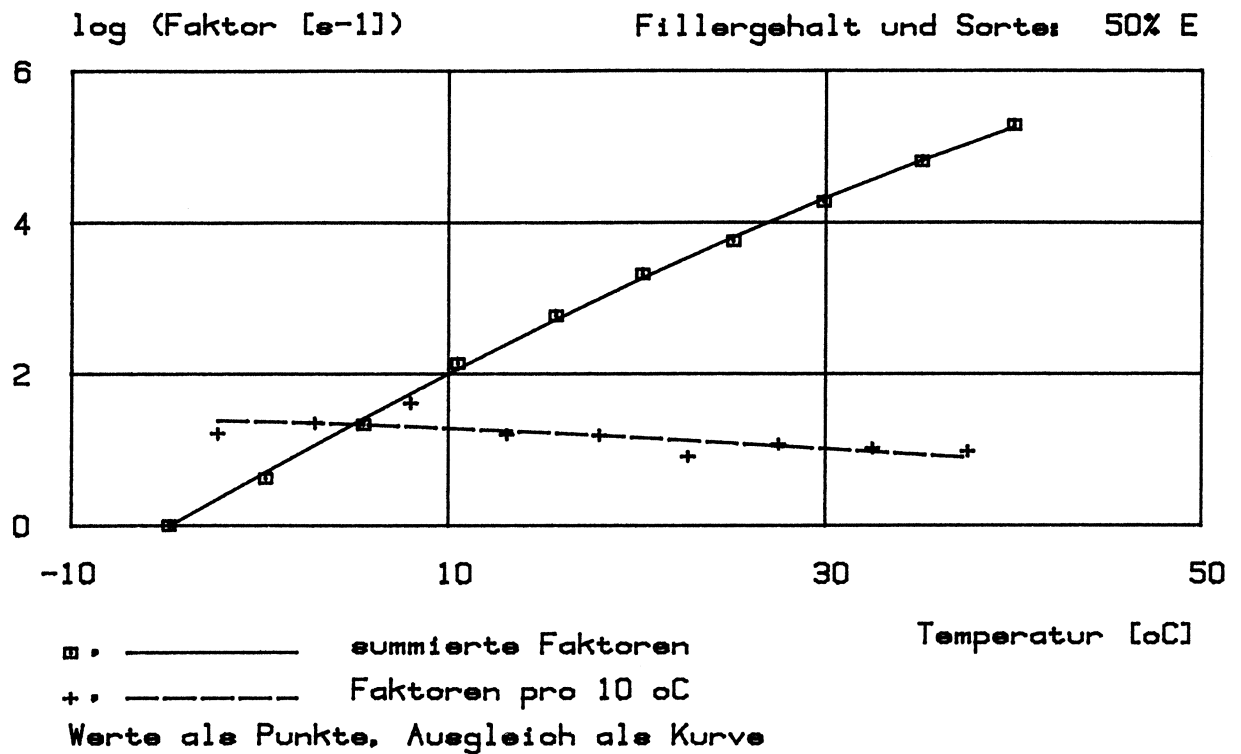
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



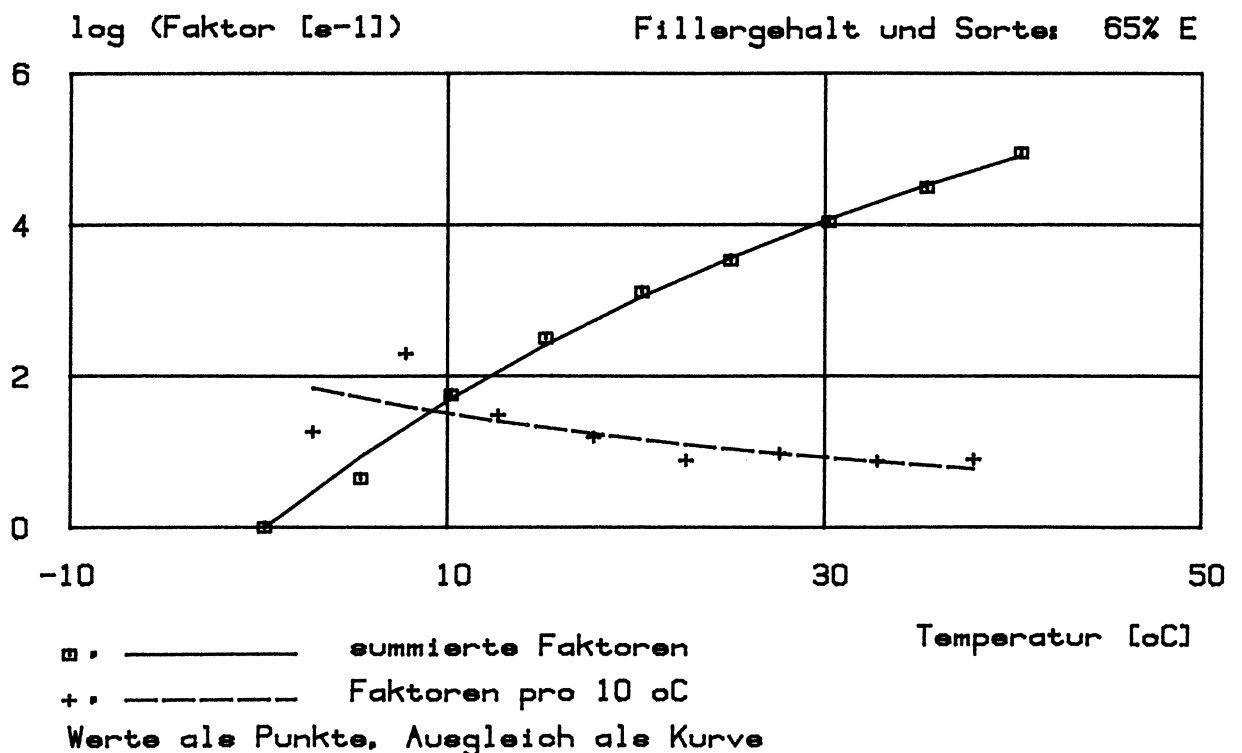
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



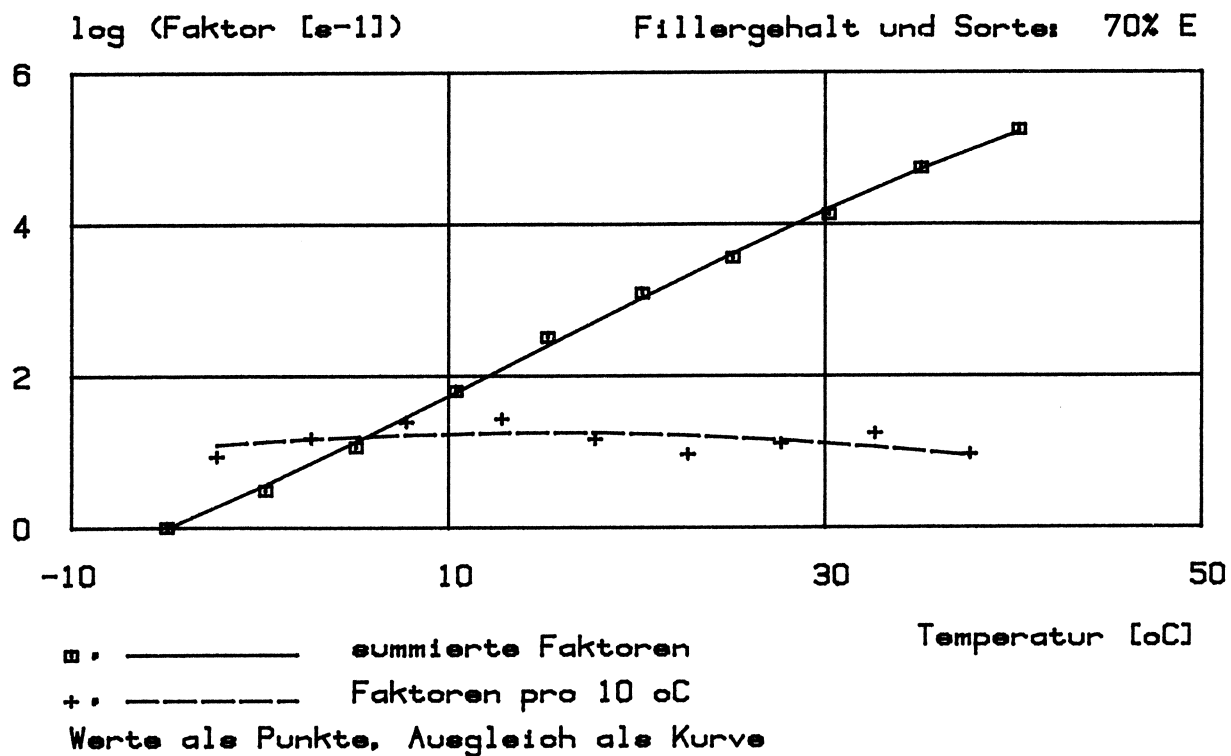
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



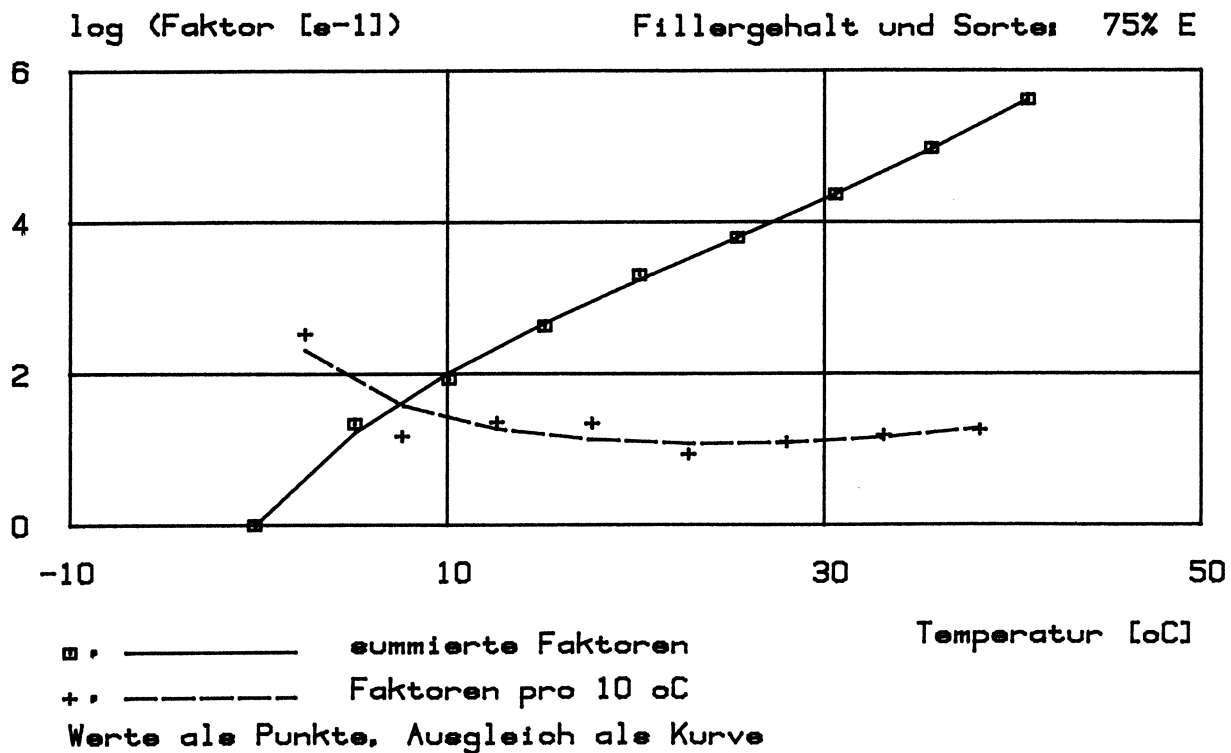
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



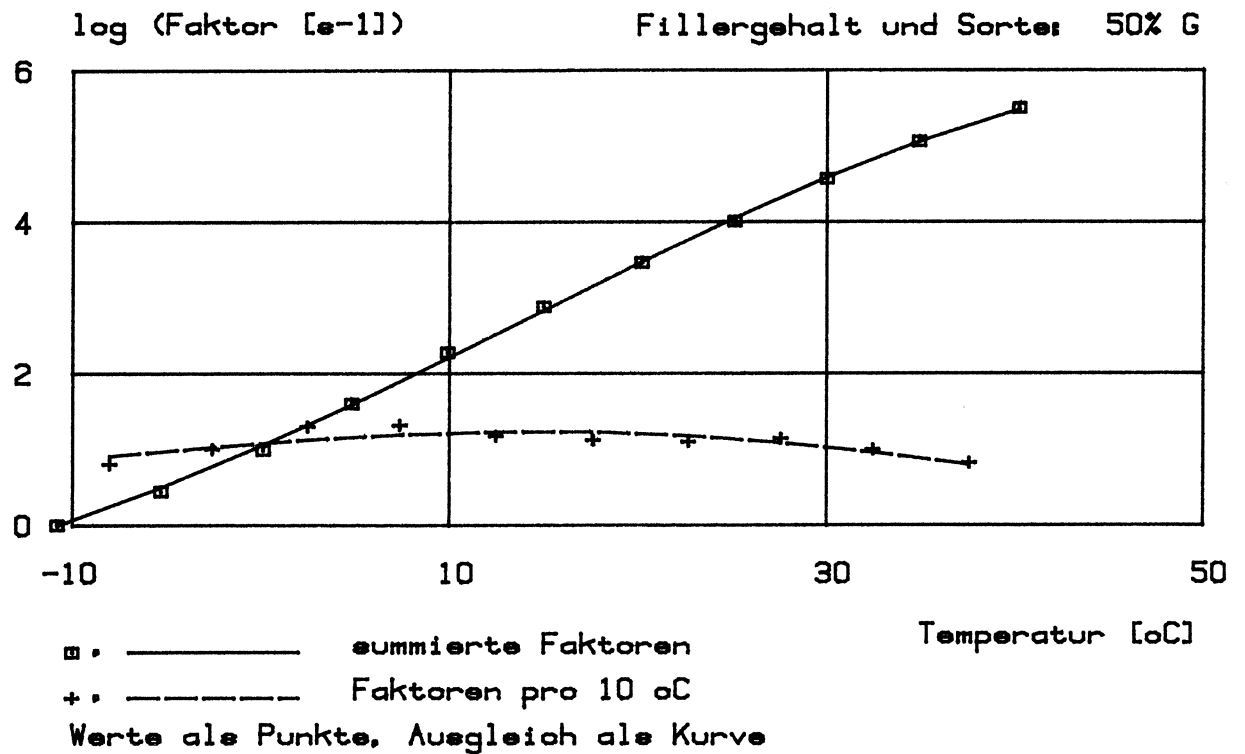
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



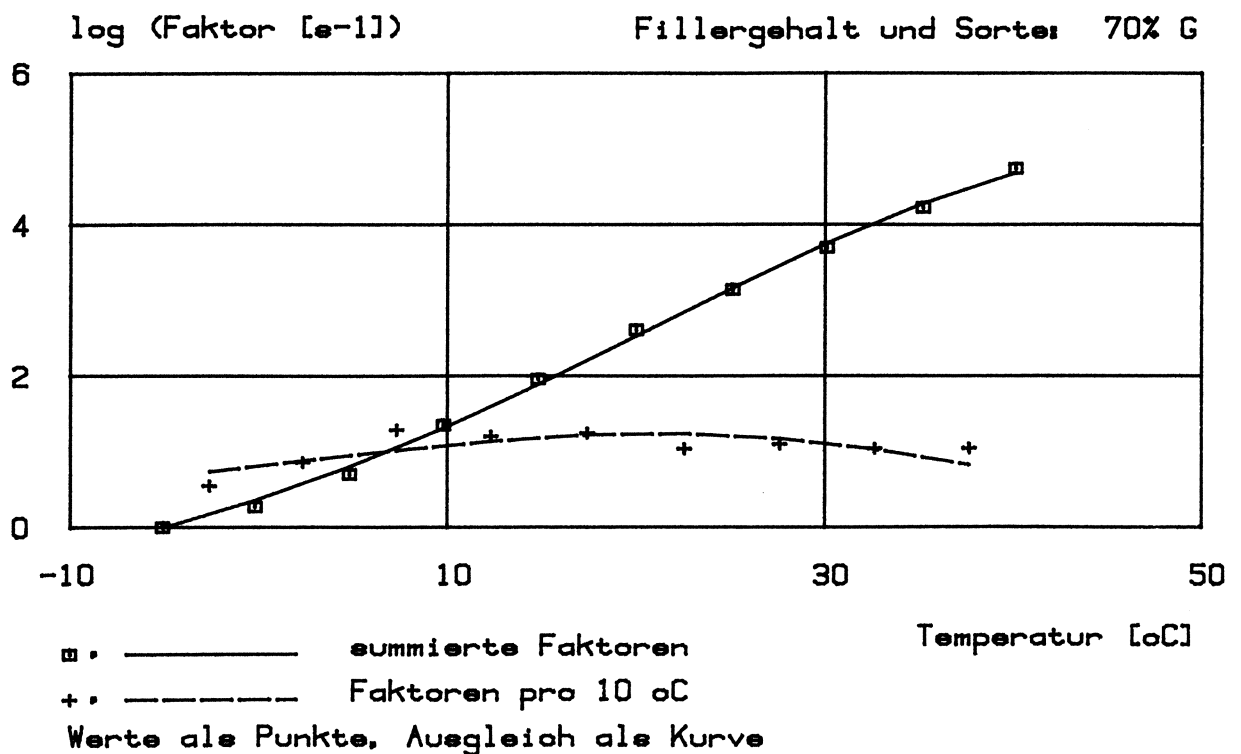
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



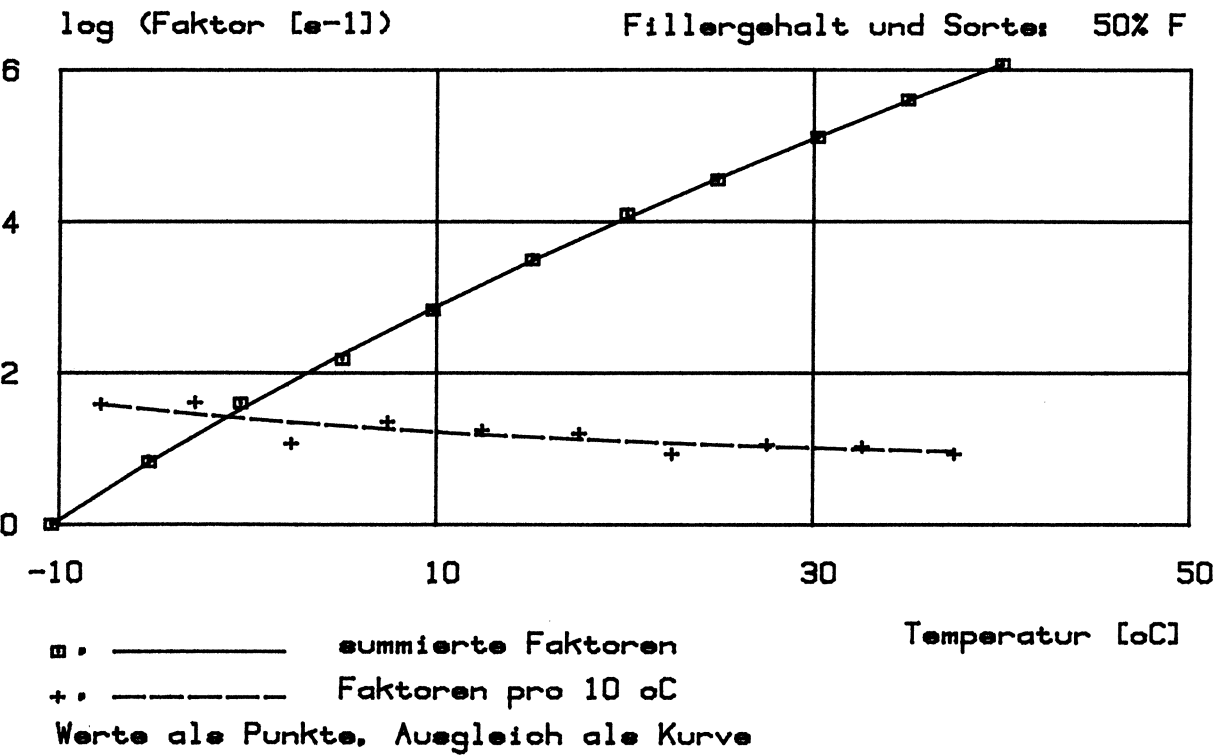
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



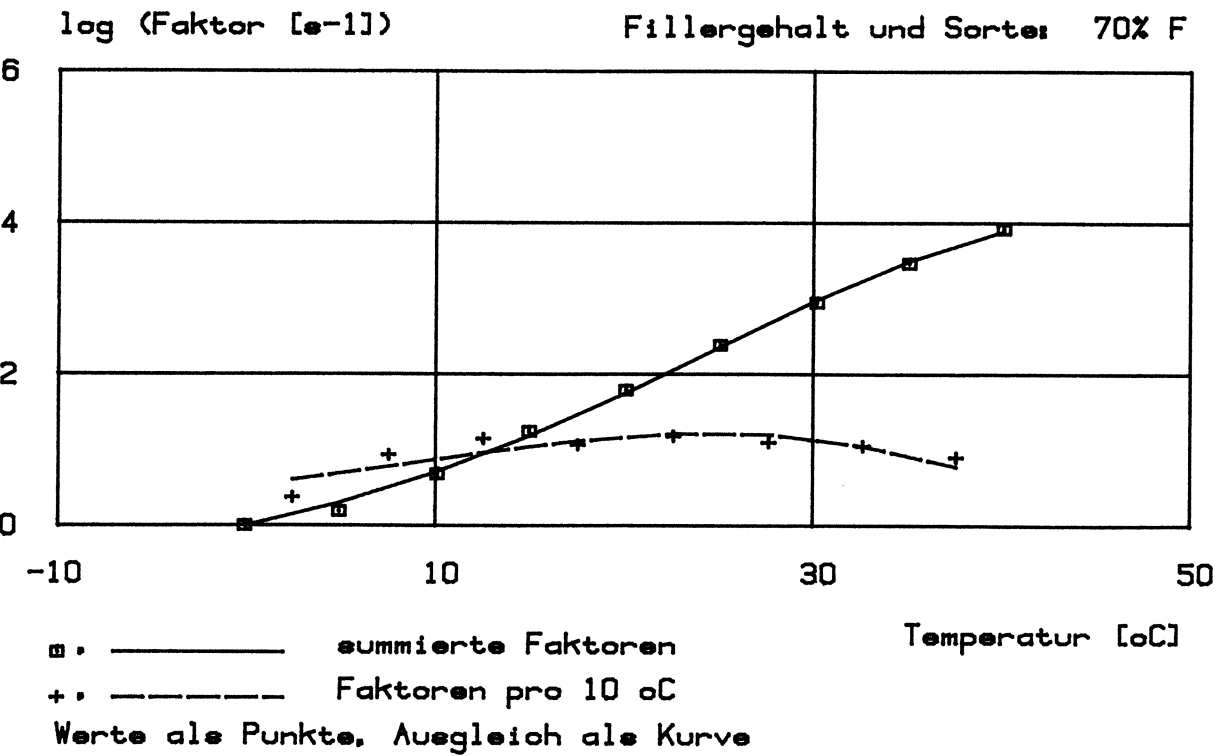
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



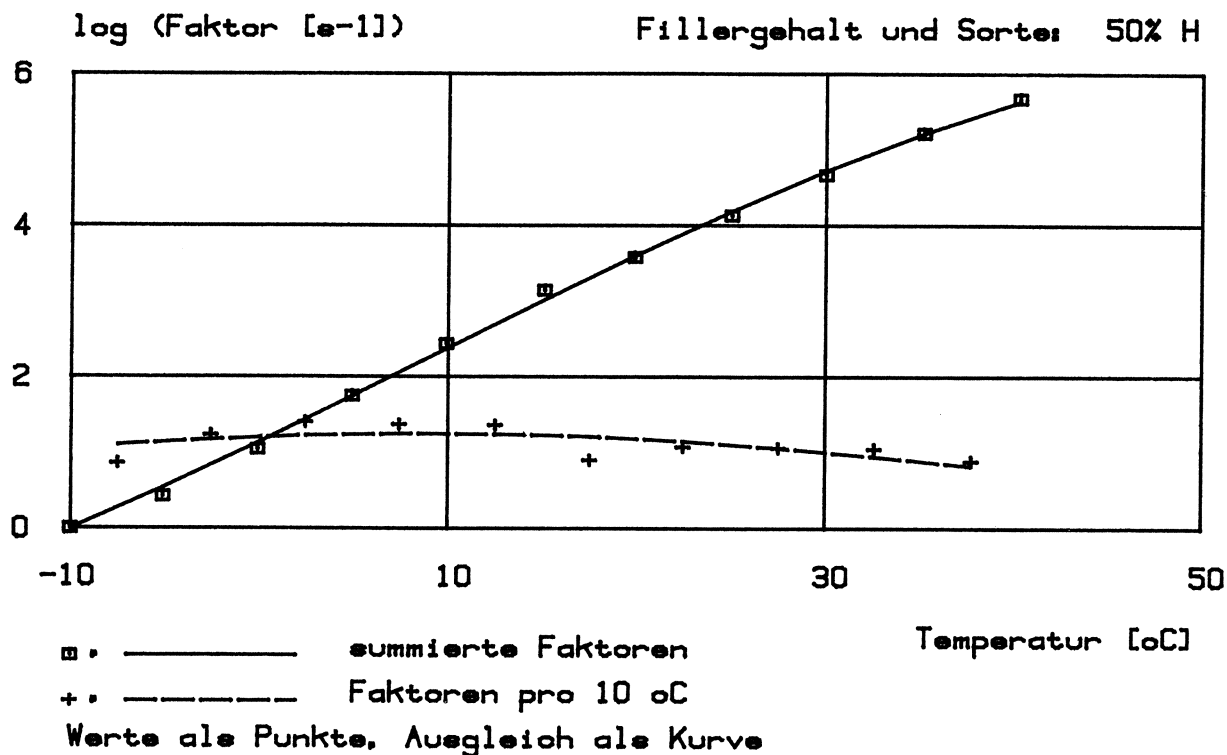
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



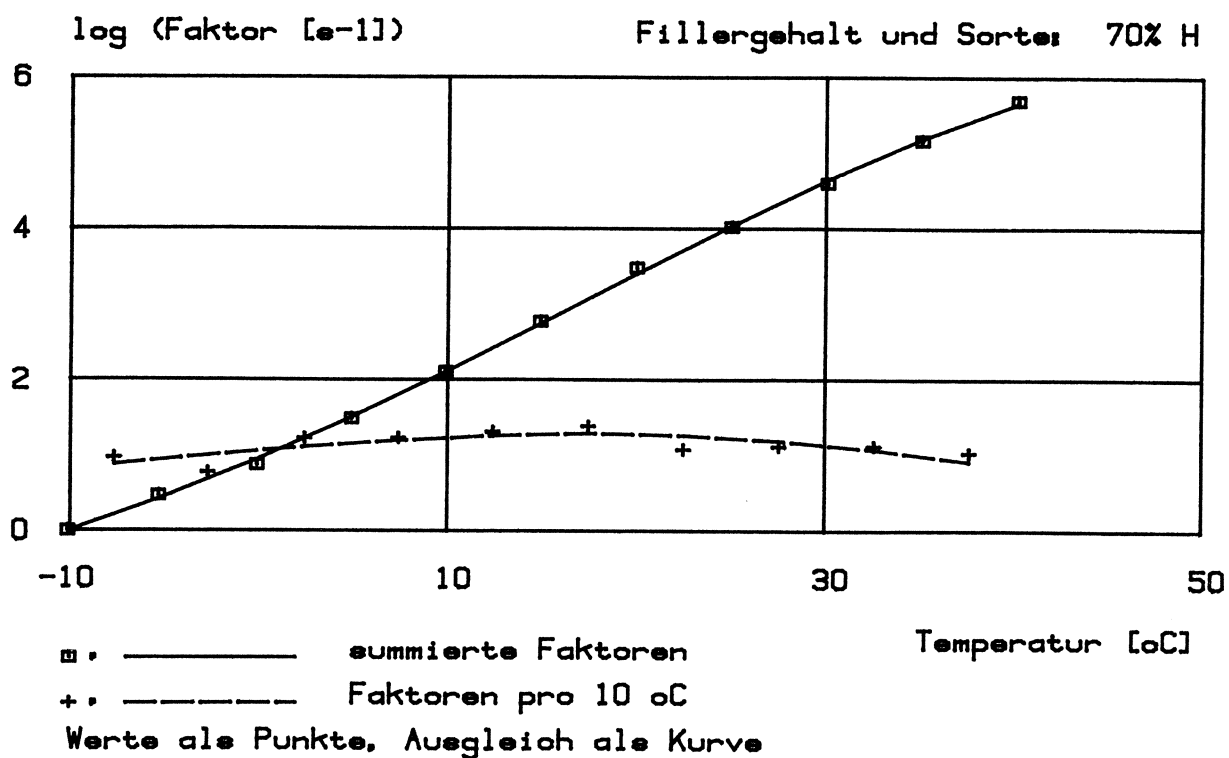
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



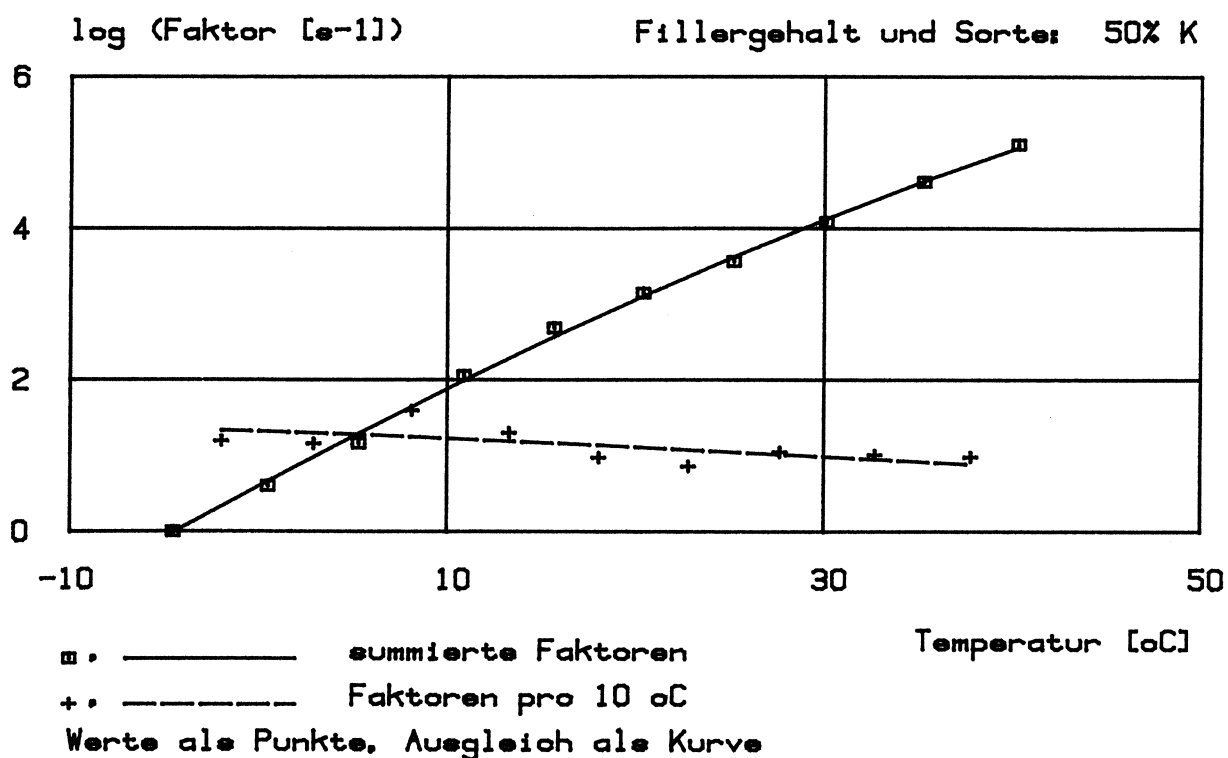
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



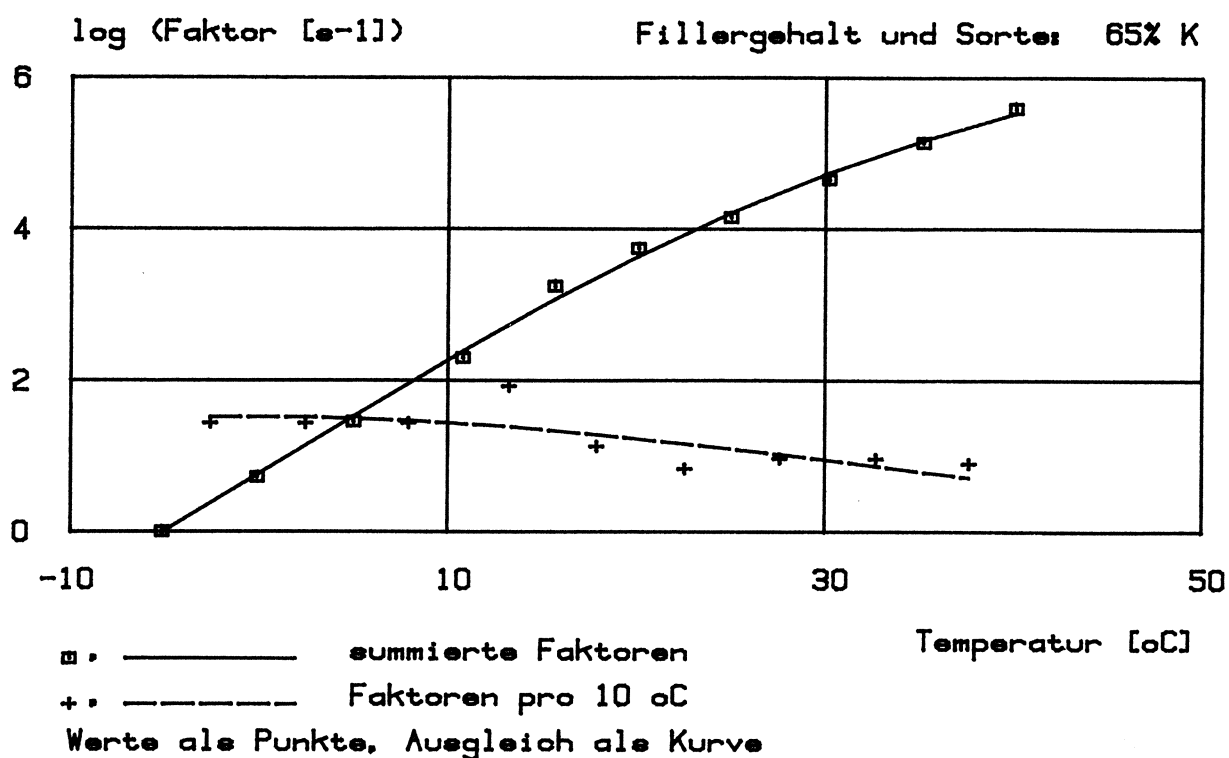
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



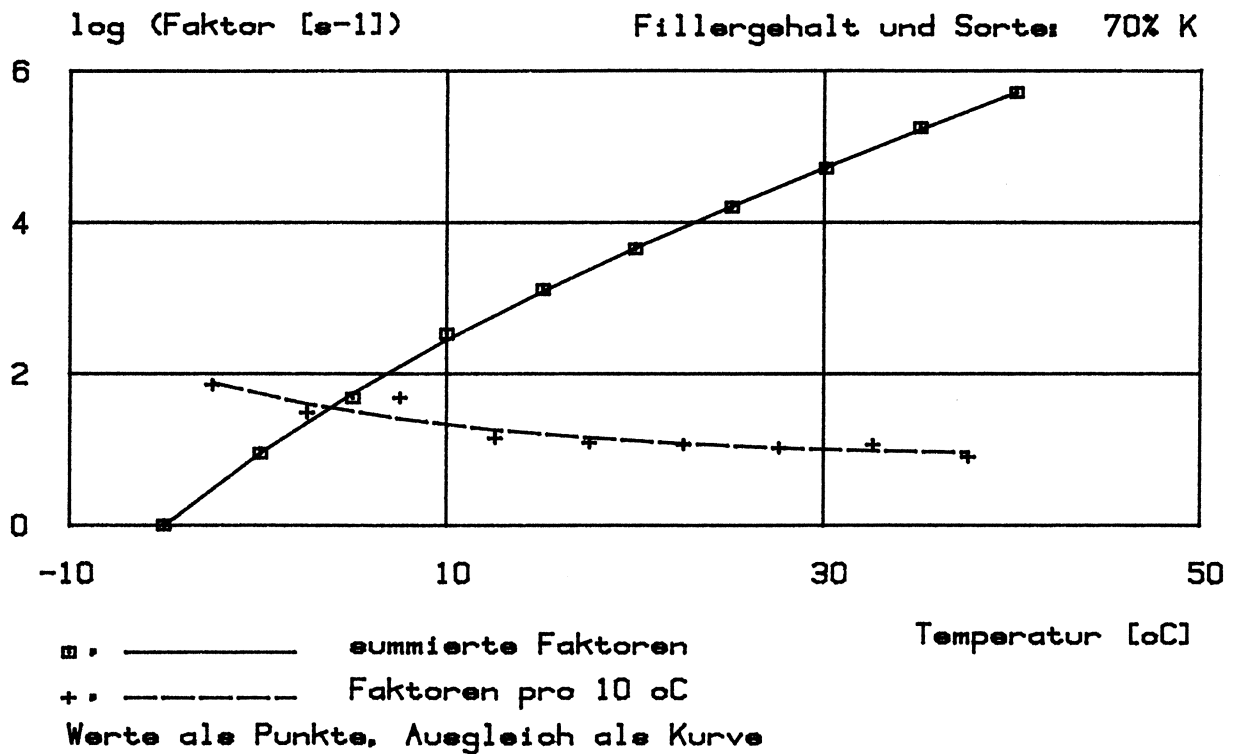
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



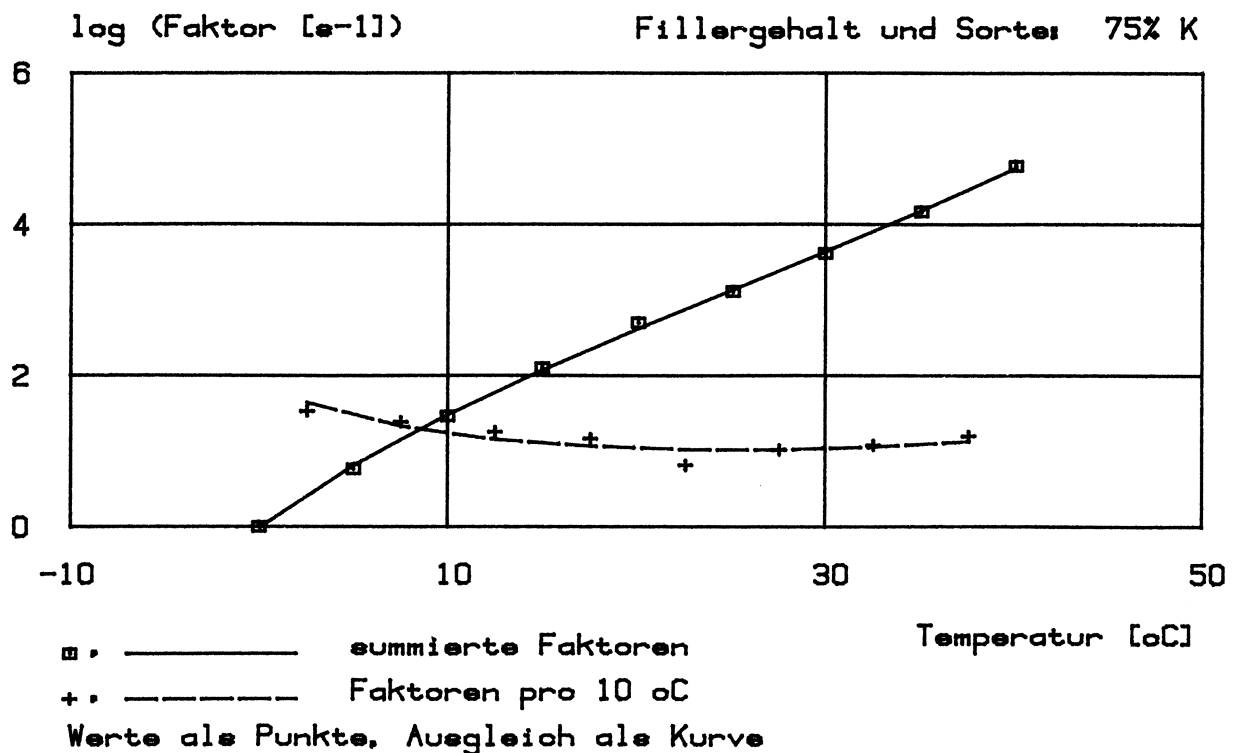
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



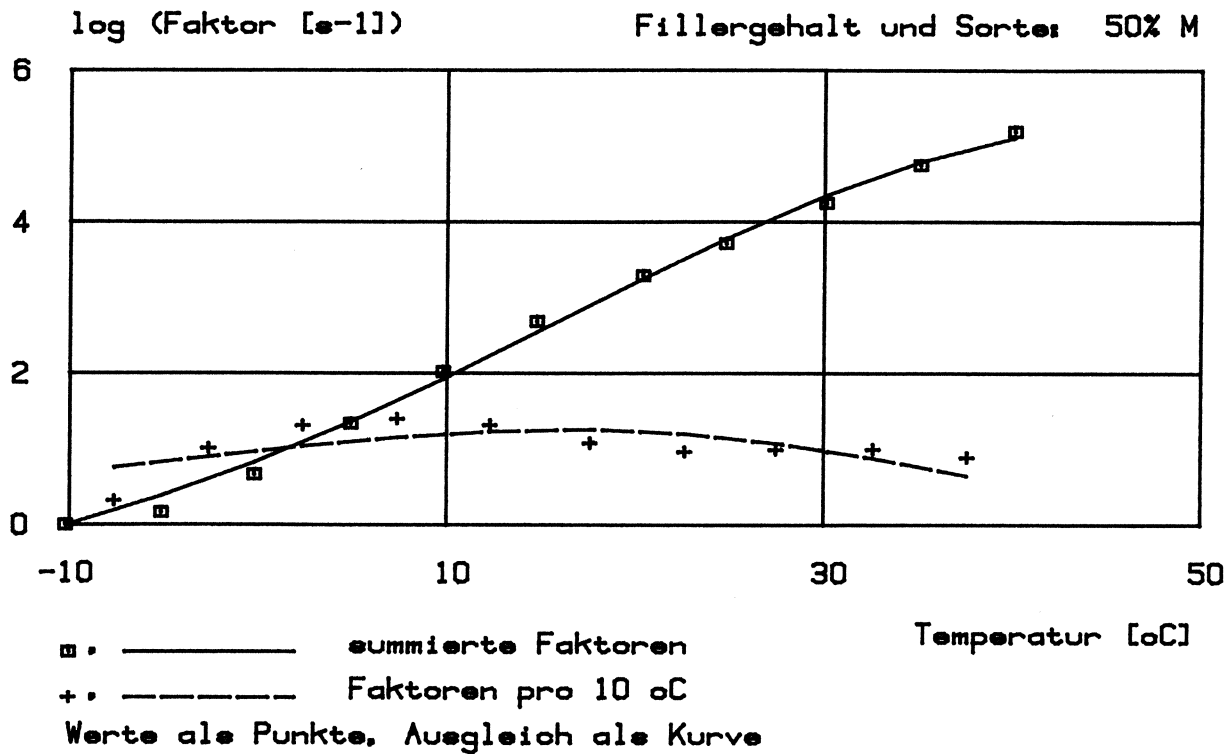
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



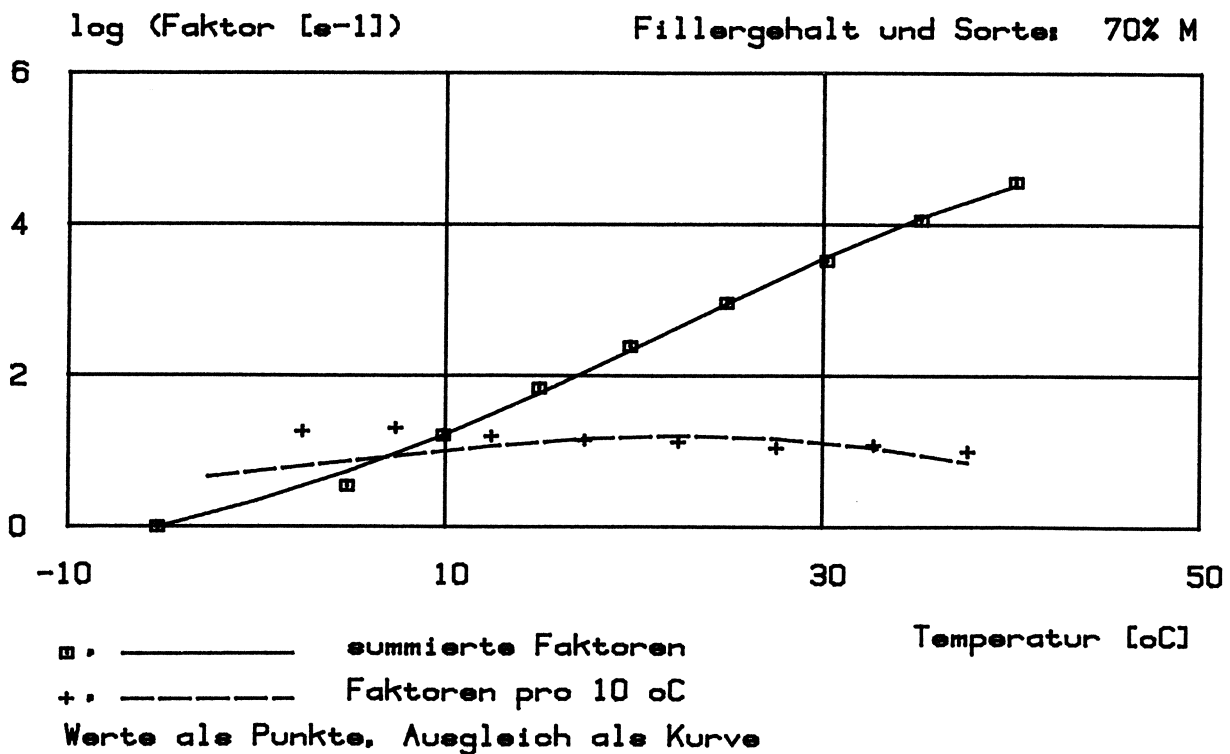
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



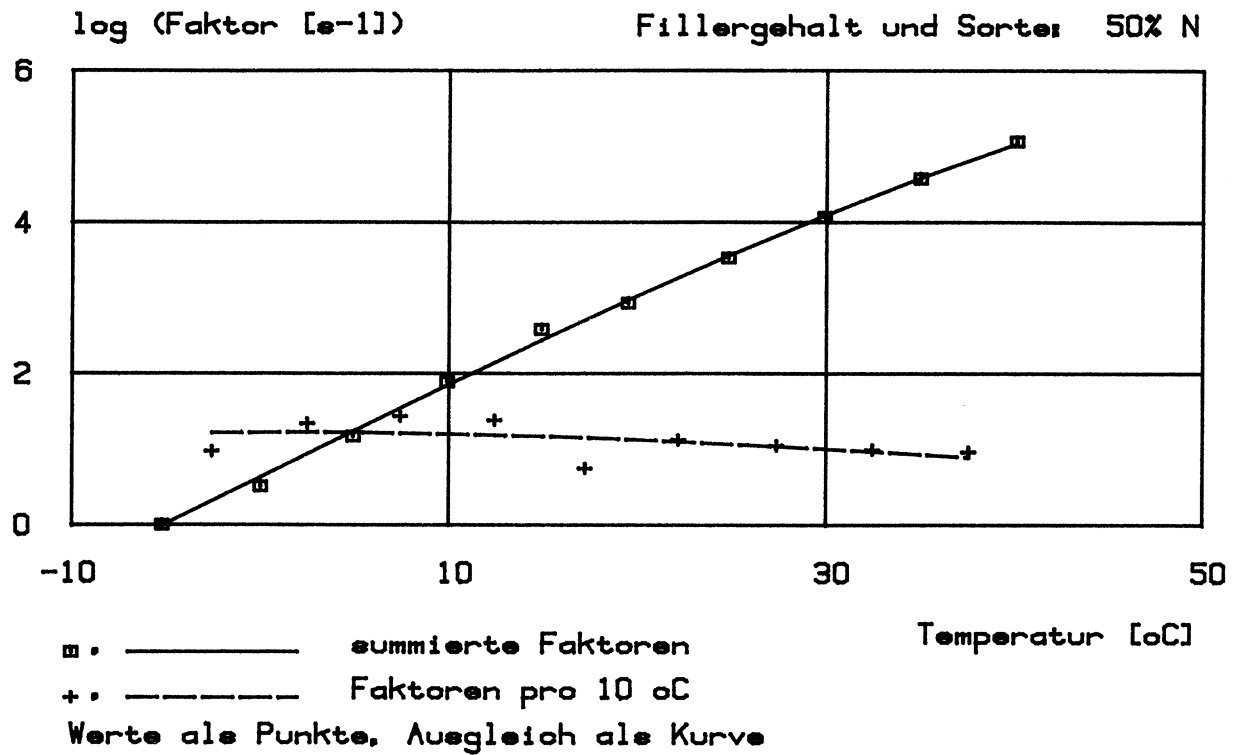
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



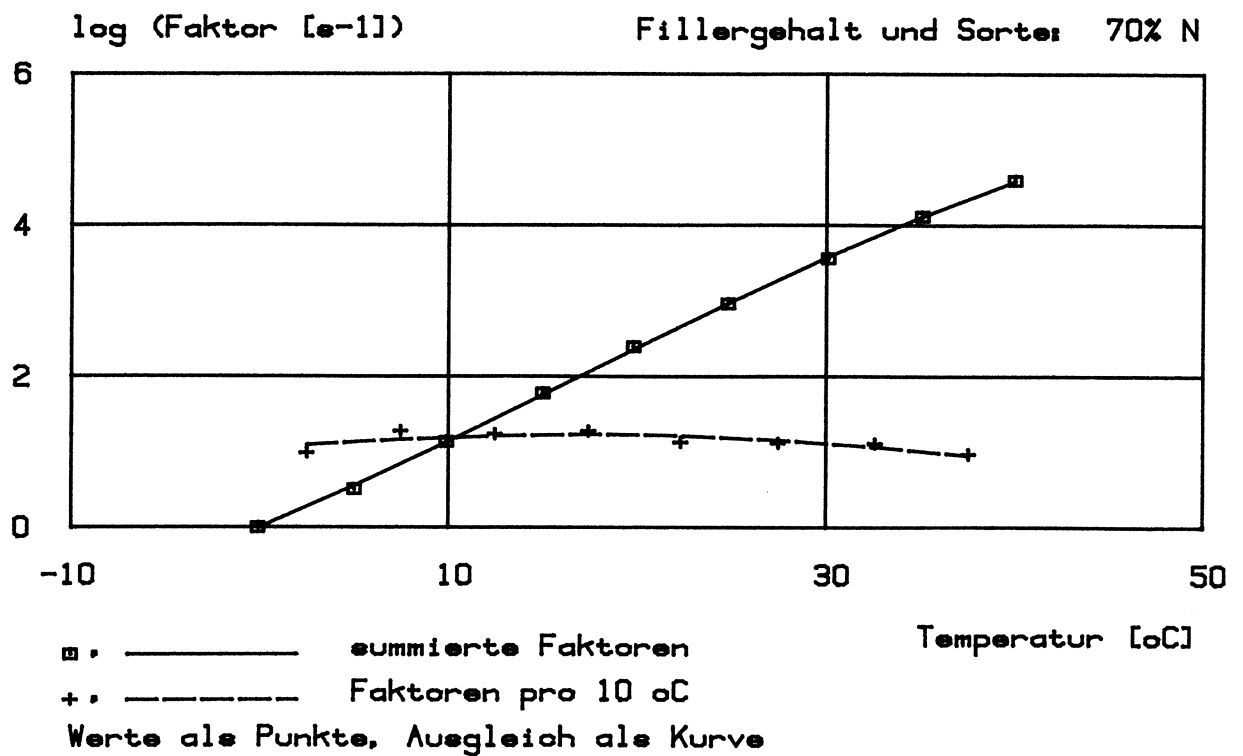
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



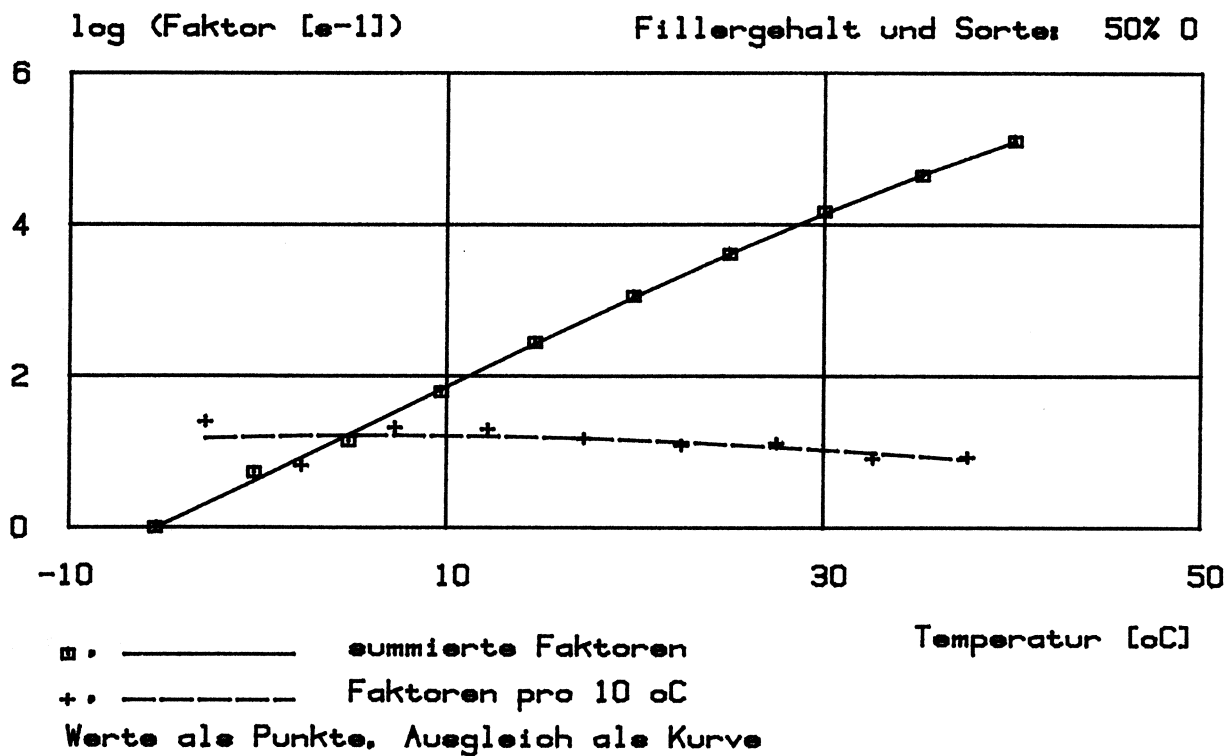
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



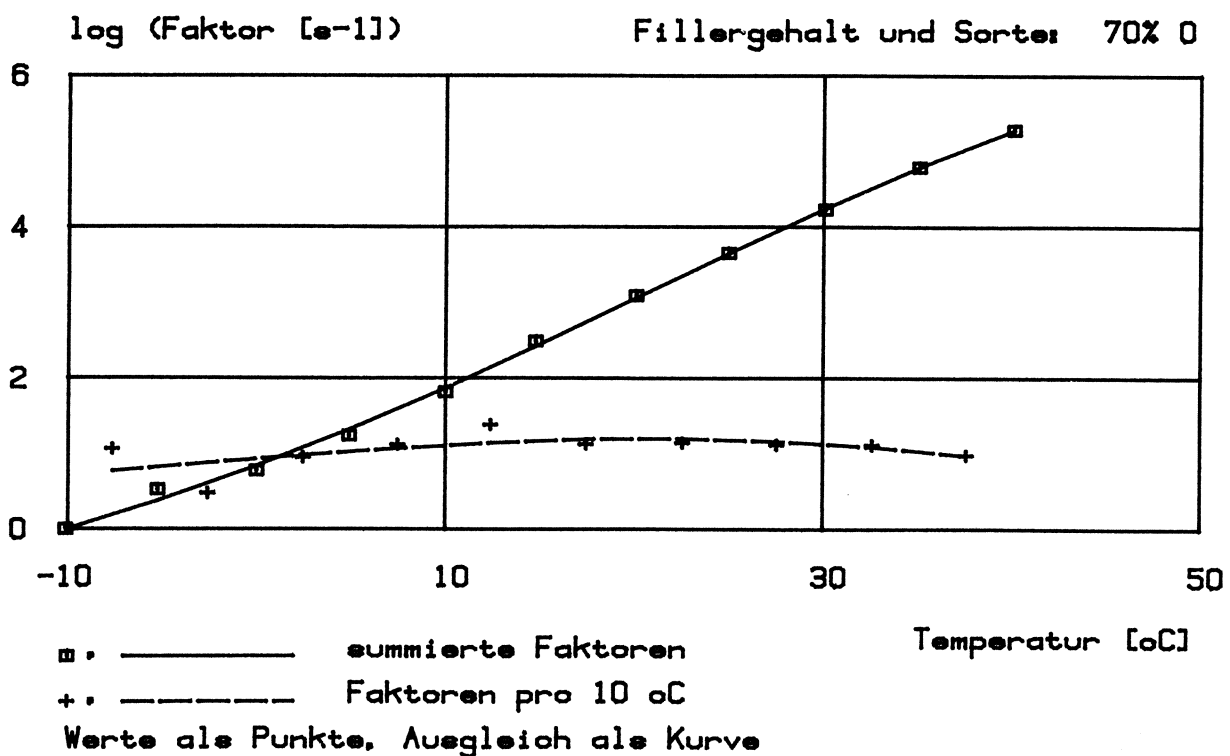
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



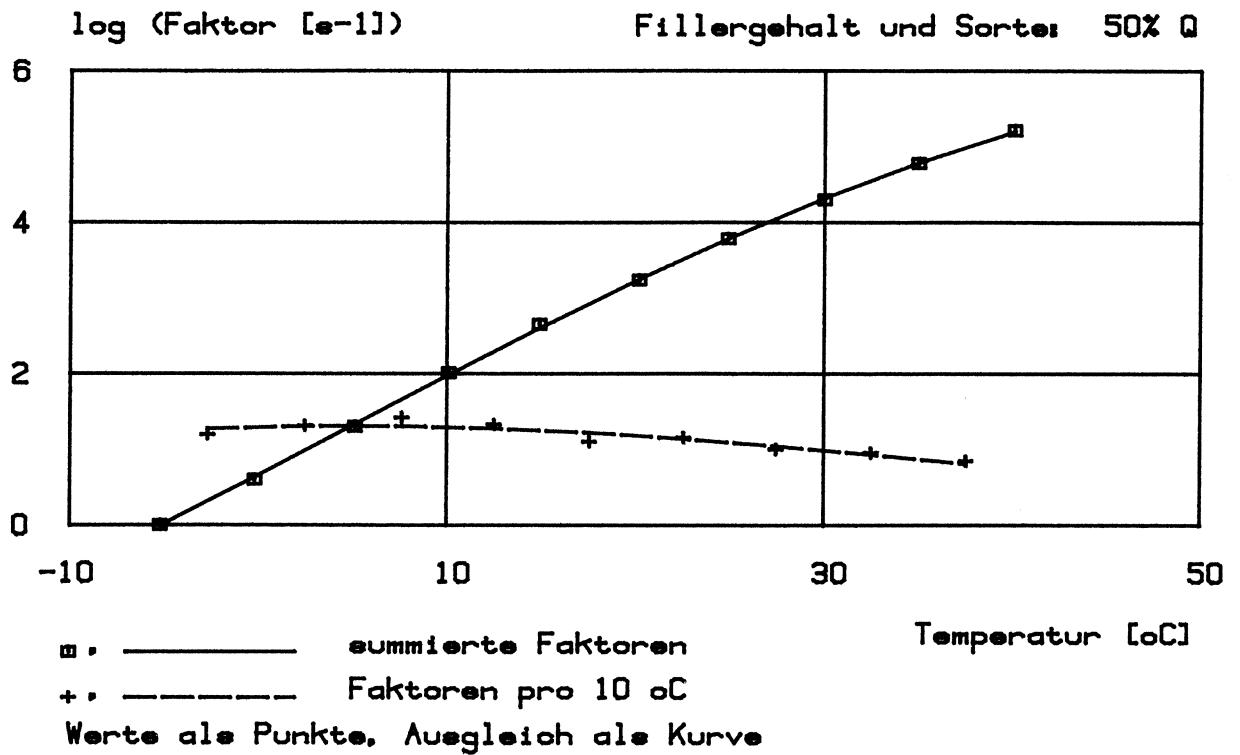
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



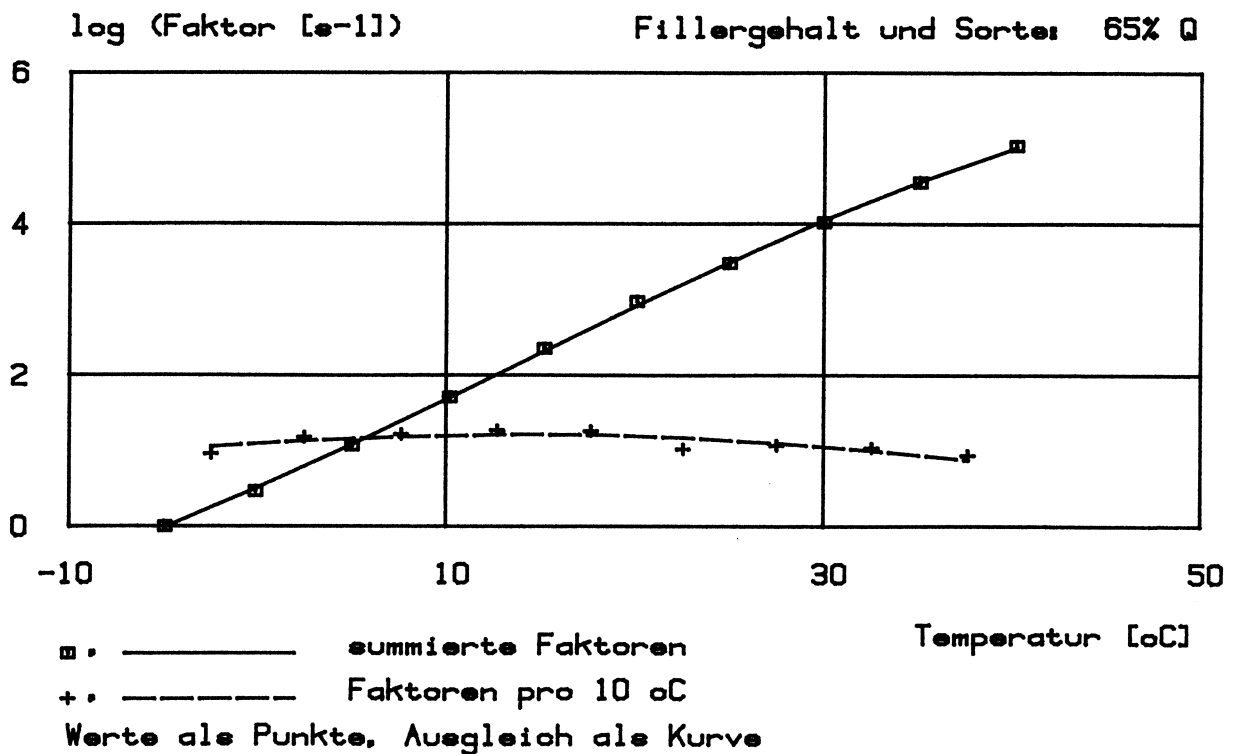
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



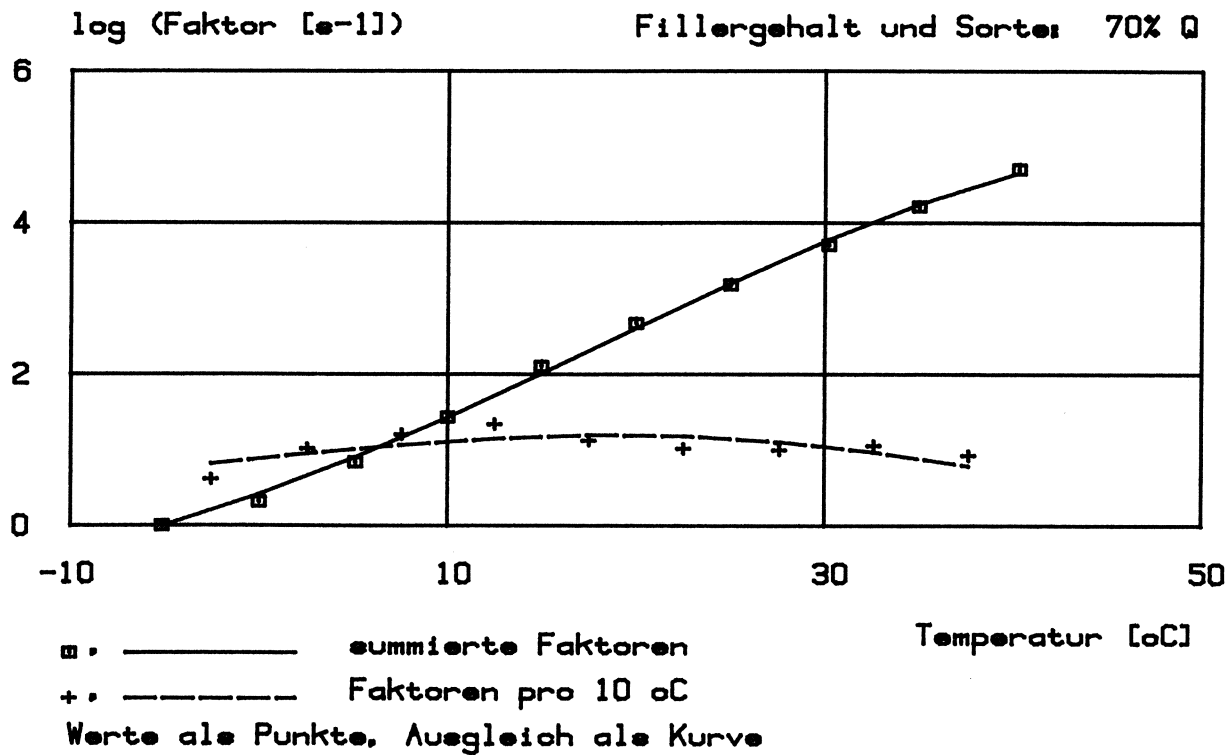
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



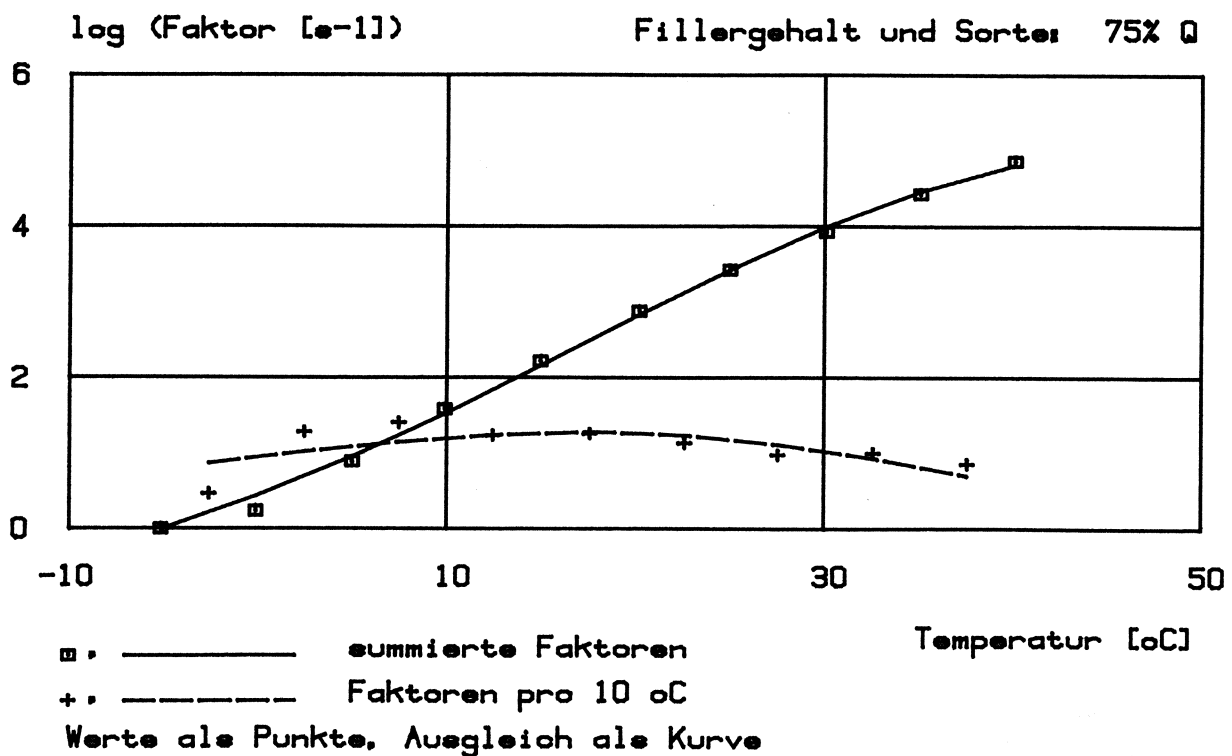
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



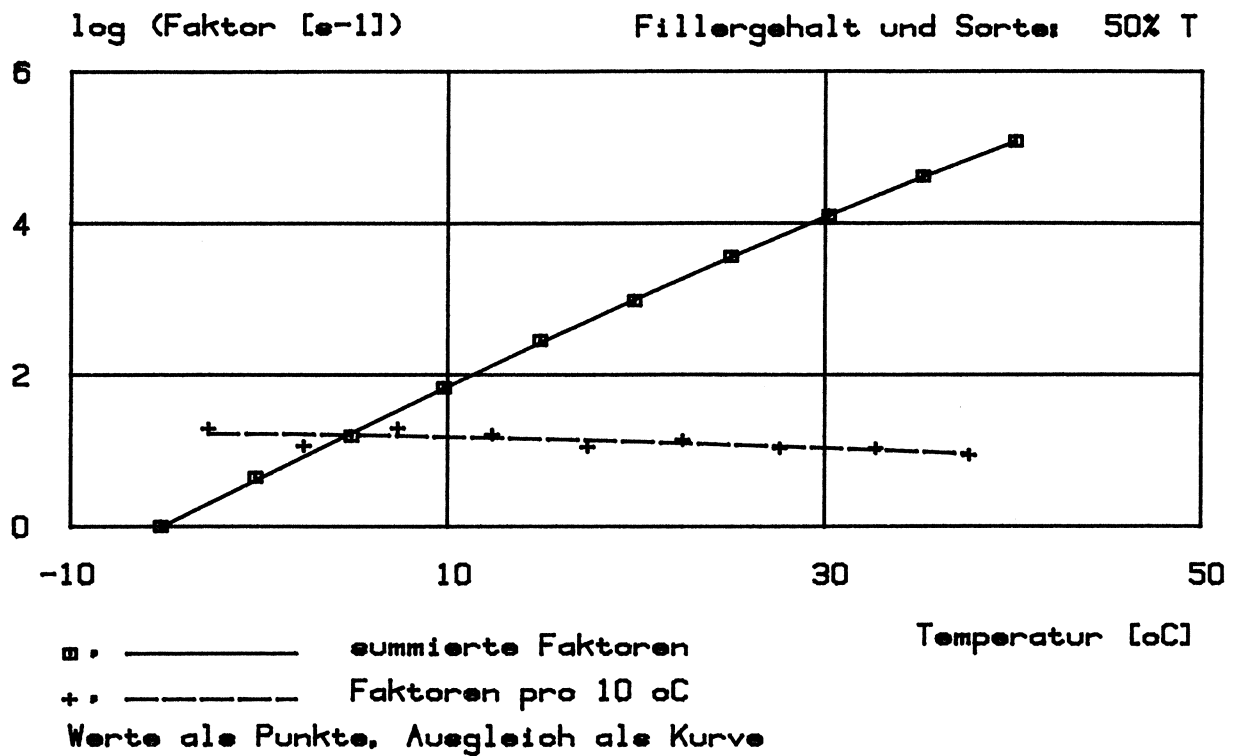
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



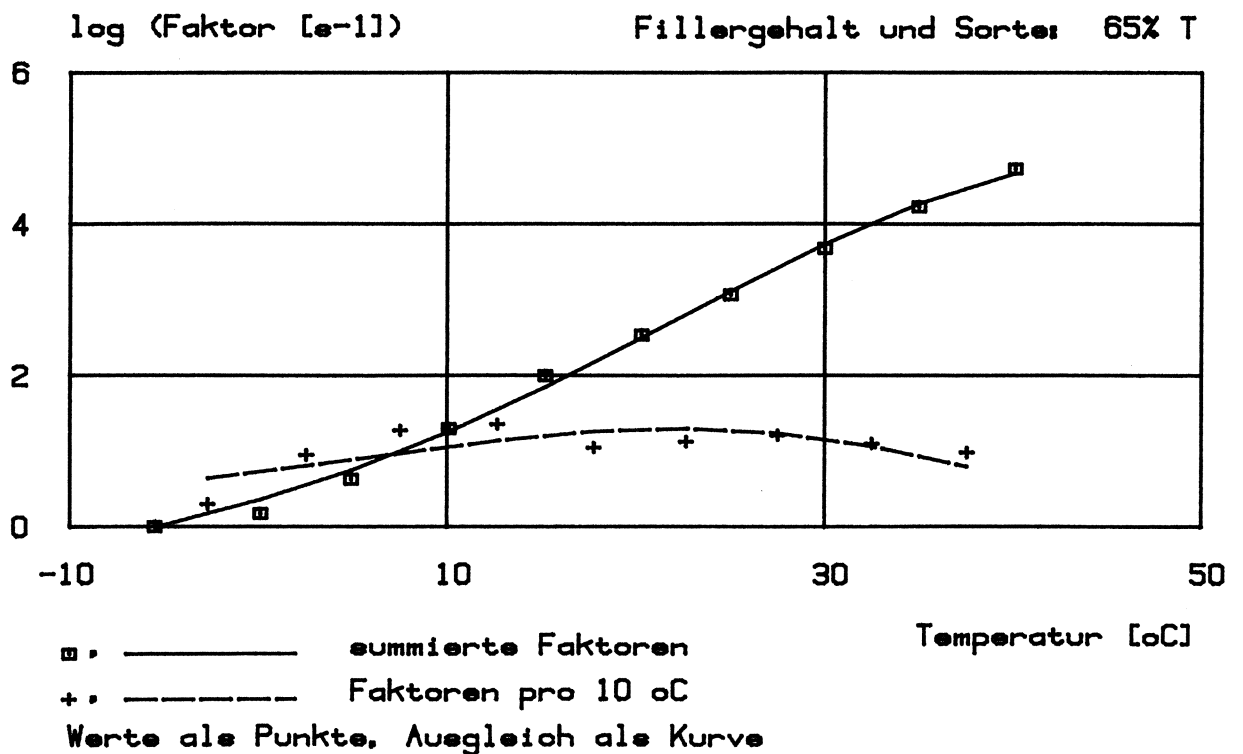
Frequenz-Verschiebungsfaktoren



Frequenz-Verschiebungsfaktoren



Frequenz-Verschiebungsfaktoren



N Diskussion der Ergebnisse

1. Maximum der Temperaturempfindlichkeit

a) Berücksichtigte Werte

Die Werte für die Filler A und C müssen aus der Diskussion ausgeschlossen werden.

b) Aussagewert der ermittelten Grössen

Die Auswertung der komplexen Moduln in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz und das Zusammenfassen der Moduln in eine Masterkurve von 20 °C geschieht unter Verwendung eines Temperaturmodells für den viskosen Anteil des mechanischen Verhaltens. Korrigiert wird in diesem Modell jeweils die Frequenz, um den Einfluss der Temperatur auszugleichen. Die Untersuchungen zeigen für eine Mehrzahl von Fillern eine Temperatur maximaler Empfindlichkeit, d.h. eine Temperatur, bei der die grösste Korrektur der Frequenz angebracht werden muss, um den Temperatureinfluss auf den Modul auszugleichen. Die Werte der Tabelle zeigen, dass für die Filler E und K kein gesichertes Maximum der Temperaturempfindlichkeit vorliegt. Für alle anderen Filler zeigt sich ein weitgehend regelmässiger Gang des Wertes, er nimmt mit steigender Fillerkonzentration zu. Ein hoher Wert bedeutet dabei eine geringe Temperaturempfindlichkeit bei tiefen Temperaturen, ein tiefer oder das Unvermögen, den Punkt maximaler Temperaturempfindlichkeit zu finden, bedeutet, dass dieser im tiefen Temperaturbereich am grössten ist. Im Zusammenhang mit dem Tatbestand, dass Grenzviskositäten für konstanten Füllergehalt wenig differenzieren, bedeutet für die Praxis, dass die Filler mit tiefer maximaler Temperaturempfindlichkeit die grösste Eignung in der Kälte aufweisen sollten, weil das Verhärten erst bei tiefen Temperaturen gross wird.

c) Nichtlinearität des Temperaturverhaltens

Aus dieser Grösse kann ersehen werden, warum bei den Fillern E und K keine Temperatur maximaler Empfindlichkeit bestimmt werden kann-

te. Der quadratische Anteil des Temperaturverhaltens ist sehr gering, oder es existiert eher ein Punkt minimaler Empfindlichkeit. Fast noch klarer als bei der Temperatur maximaler Empfindlichkeit zeigt sich hier der regelmässige Gang der Werte.

Der Wert hat direkt wenig praktische Bedeutung. Er beschreibt natürlich das Temperaturverhalten und widerspiegelt sich somit in der umseitig besprochenen maximalen Temperaturempfindlichkeit. Deren Bedeutung ist im Gegensatz zu der rein mathematischen Grösse der Nichtlinearität viel leichter verständlich. Ein hoher Anteil nichtlinearen Verhaltens mag als Warnung dienen, Extrapolationen auf andere Temperaturen anzustellen.

2. Belastungsempfindlichkeit

Dieser Wert ist ein Mass dafür, wie leicht das Fillergerüst unter Scherung eine Veränderung erfährt. Man kann sich vorstellen, dass die Fillerkörner im ungestörten Material zufällig geordnet sind. Wenn nun eine Scherung auftritt, besteht die Tendenz, dass die Fillerkörner sich so ausrichten, dass sie leichter aneinander vorbeigleiten können. Ähnliche Effekte sind auch bei anderen dispersen Systemen bekannt, so etwa bei Viskositätsbestimmungen an Polymerlösungen. Interessant ist, dass die Veränderung im Fillergerüst so langsam vor sich geht, dass sie messtechnisch erfasst werden konnte.

Die Werte zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Fillerkonzentration, sie nehmen mit zunehmender Fillerkonzentration zu. Unterschiede nach Herkunft sind ebenfalls zu erkennen. Sie treten auch bei gleichem Prüfprogramm auf (z.B. Filler M, N und O), während unterschiedliches Prüfen (Filler C und H) praktisch gleiche Resultate ergeben haben. Die Aussagesicherheit der Werte kann beim gegenwärtigen Stand der Forschung noch nicht angegeben werden.

3. Grenzwert des komplexen Moduls

Der Wert stellt eine Extrapolation dar, wird aber durch die meisten Mischungen mit Ausnahme der Filler A und C einigermaßen erreicht. Die Extrapolationen dieser Filler werden deshalb aus der Besprechung ausgeschlossen.

Die Werte zeigen keinen klar erkennbaren Gang. Sie schwanken vielmehr um einen Wert zwischen 40 und 50 N/mm². Die Kenngrösse ist als von geringem Interesse anzusehen. Für Fragen nach dem Verhalten bei tiefen Temperaturen und kurzen Belastungszeiten kann unabhängig von Füllersorten und Füllergehalt einfach der Wert von 50 N/mm² für Mischungen zwischen Füllern und Bitumen angenommen werden.

4. Scherempfindlichkeitsparameter

Dieser Parameter darf nicht mit der Belastungsempfindlichkeit verwechselt werden, denn er stellt nicht ein Mass für eine Empfindlichkeit des Materials gegenüber Scherbelastung dar, sondern ist ein Mass dafür, wie schnell das mechanische Verhalten von viskosem zu elastischem mit steigender Frequenz der Belastung übergeht. Ein grosser Wert im Bereich von zwei bedeutet einen raschen Uebergang und entspricht einem rheologischen Modell mit einer Feder und einem Dämpfer. Ein kleiner Wert entspricht einem langsamen Uebergang, der sich über viele Zehnerpotenzen in der Frequenz hinzieht und nur durch ein Modell mit vielen viskosen und elastischen Gliedern erklärt werden kann.

Die Betrachtung der Werte zeigt wohl systematische Trends, aber es ist auch zu sehen, dass Schwankungen beträchtlich sind. Die Verlässlichkeit der Werte ist somit nicht sehr gross, ein spezifischer Einfluss von Füllersorte ist mit Ausnahme des Quarzfillers Q kaum zu erkennen. Die mehrheitlich zu beobachtende Zunahme des Wertes mit steigendem Füllergehalt dürfte eine reale Grundlage haben. Für die Praxis hat dieser Wert keine Bedeutung.

5. Mechanische Kennwerte

Die mechanischen Kennwerte wurden graphisch dargestellt. Sie sind nicht zum Vergleich der Füllersorten gedacht, auch der Einfluss der Füllerkonzentration wird am besten nicht anhand dieser Daten studiert. Trotzdem haben Werte dieser Art eine grosse praktische Bedeutung. Es sind Module, wie sie direkt für statische Berechnungen eingesetzt werden können. Am besten werden dabei die komplexen Module verwendet.

6. Viskositätswerte

Die Auswertung als Masterkurven liefert eine Kurve für die Schwingungsviskosität. Zwei wichtige Kennwerte aus dieser Kurve sind in die Tabelle eingesetzt, der Grenzwert für die Frequenz 0 (und auch für die Schergeschwindigkeit 0) und die Schwingungsviskosität für eine Frequenz 1 s^{-1} . Vereinzelt sind hinter die Werte der Tabelle Fragezeichen zu setzen, so für die Mischungen mit 75% Filler A und C. Die Werte zeigen, was nicht anders zu erwarten ist, eine deutliche Abhängigkeit von der Füllerkonzentration und weisen damit auf die versteifende Wirkung der Filler hin. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Füllersorte. Mit Sicherheit liegt eine eindeutige Differenzierung vor, der Wert ist gemäss dem Auswerteverfahren eine aus allen ermittelten Modulen für die entsprechende Füllermischung abgeleitete Grösse und wird durch einzelne Messfehler kaum mehr beeinflusst. Er ist damit sehr verlässlich und kann, bei Einhalten eines festen Prüfprogrammes, auf wenige Prozent genau bestimmt werden. Von Temperatur und Frequenz her charakterisiert er einen mittleren Belastungsfall. Seine Angabe für Füllerkonzentrationen von 50 und 70 Masse-% ermöglicht deshalb ein rasches Beurteilen des vorliegenden Fillers.

Kennwerte der Schub-Schwingprüfung

Filler- sorte	Gehalt	$T_{\max}$	Nicht- linearität	Belastungsemp- findlichkeit	G_{∞}	b	Viskosität bei	
	Masse-%	°C			N/mm ²		0 s ⁻¹ MPa·s	1 s ⁻¹ MPa·s
B	50	7	-0.03	0.02	40	0.38	0.28	0.24
	65	2	-0.04	-	51	0.39	0.76	0.54
	70	18	-0.02	0.08	46	0.37	2.04	1.15
D	50	8	-0.02	0.03	55	0.33	0.25	0.20
	70	19	-0.01	0.11	41	0.40	1.24	0.86
E	50	-10	0.04	0.02	61	0.28	0.47	0.28
	65	-10	0.01	-	48	0.32	0.94	0.48
	70	15	-0.02	0.14	46	0.40	1.44	0.91
	75	-10	-0.01	-	42	0.39	5.07	2.11
F	50	-10	-0.004	0.02	38	0.36	0.32	0.25
	70	25	-0.02	0.10	39	0.40	1.27	0.88
G	50	15	-0.01	0.03	27	0.42	0.26	0.23
	70	21	-0.01	0.14	48	0.36	1.52	0.93
H	50	9	-0.02	0.03	41	0.36	0.30	0.24
	70	18	-0.01	0.16	40	0.40	1.37	0.92
K	50	-10	0.02	0.03	40	0.37	0.33	0.26
	65	0	-0.07	0.06	41	0.37	0.73	0.52
	70	-10	-0.01	0.09	42	0.39	1.35	0.86
	75	-10	-0.01	-	45	0.40	2.52	1.40
M	50	16	-0.01	0.02	52	0.32	0.27	0.21
	70	23	-0.01	0.08	56	0.34	1.33	0.81
N	50	1	-0.06	0.03	45	0.34	0.34	0.26
	70	17	-0.02	0.16	47	0.41	1.21	0.82
O	50	6	-0.03	0.03	35	0.39	0.26	0.22
	70	21	-0.01	0.12	42	0.42	1.54	1.93
Q	50	5	-0.03	0.03	45	0.35	0.27	0.22
	65	14	-0.02	0.08	42	0.42	0.75	0.60
	70	19	-0.015	0.08	43	0.47	0.84	0.72
	75	17	-0.015	-	41	0.46	1.25	0.97
T	50	-10	-0.07	0.03	45	0.34	0.49	0.35
	65	22	-	0.11	48	0.35	2.18	1.16

0 Anwendbarkeit des Prüfverfahrens

In diesem Teil soll diskutiert werden, inwieweit die verschiedenen Resultate praktisch anwendbar sind. Es wird auch angegeben, ob und auf welche Weise weitere Forschungen die Anwendbarkeit erhöhen können.

1. Bestimmen des mechanischen Verhaltens

Das mechanische Verhalten kann mit der entwickelten Methode im Bereich von Temperaturen von -10 bis $+40$ °C gemessen werden. Randbedingungen, Versuchsparameter und Versuchsmethoden sind hinreichend bekannt, um die mechanischen Kennwerte mit der wünschenswerten Genauigkeit bestimmen zu können.

2. Erfassen der Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verhaltens mit einem sich an William, Landel und Ferry anlehrenden Verfahren

Es wurden Auswerteverfahren entwickelt, mit denen sich die Temperaturabhängigkeit im mittleren Bereich von 0 bis 30 °C gut beschreiben lässt. Eine Verbesserung des verwendeten Modells mit dem Ziel, vor allem die Temperaturabhängigkeit über 30 °C ebenso gut erfassen zu können, wäre wünschenswert, da dieser Bereich für das Abschätzen der Standfestigkeit von Bedeutung ist. Für die Prüfung der Richtigkeit eines veränderten Modells wären gezielte neue Versuche nötig. Die Versuchsparameter müssten eventuell ebenfalls neuen Forderungen angepasst werden.

3. Ermitteln der Belastungsempfindlichkeit

Es konnte gezeigt werden, dass Bitumen/Filler-Mischungen unter dem Einwirken einer mechanischen Belastung erweichen. Eine zusätzliche Auswertung der Daten für das Bestimmen der mechanischen Kennwerte ermöglicht es, die Belastungsempfindlichkeit daraus zu ermitteln.

Zu suchen bleiben auch hier noch die optimalen Versuchsparameter. Die bisher durchgeführten Messungen waren so ausgelegt worden, dass die Mischung möglichst wenig gestört wurde. Dementsprechend gering fiel dann auch die Auswirkung der Belastungsempfindlichkeit aus. Dieser geringe Effekt ist natürlich keine gute Basis für die Auswertung. Eine Erhöhung der vorgegebenen Amplituden kann hier zu einer wesentlichen Verbesserung führen.

4. Rissbildung bei tiefen Temperaturen

Auch dieses Verhalten kann sowohl mit speziellen Versuchen als auch im Verlauf des Bestimmens von mechanischen Kennwerten erfasst werden. Diese zweite Art der Auswertung bezüglich Rissbildung ist denkbar einfach, wenn die Versuche bis zu einer genügend hohen Frequenz durchgeführt werden, am besten bis zu 32 Hertz. Dann müssen nur noch die Messungen bei 32 Hertz für die verschiedenen Temperaturen miteinander verglichen werden, die Abnahme dieser Werte im Tieftemperaturbereich ist ein gutes Mass für die Rissbildung.

P Beurteilung

Mit der Durchführung von Prüfungen zum Bestimmen von mechanischen Kennwerten können alle interessierenden Eigenschaften einer Filler/Bitumen-Mischung bestimmt werden. Spezielle Versuche, wie sie anlässlich dieser Arbeit durchgeführt wurden, um Effekte wie Belastungsempfindlichkeit und Rissbildung genauer zu untersuchen, können ausgeklammert werden, ohne dass damit ein grosser Verlust an Information verbunden ist. Ein Optimieren der Versuchsparameter mit dem Ziel, alle beschriebenen Eigenschaften von praktischer Relevanz hinreichend genau erfassen zu können, wäre wünschenswert. Teilweise müssten auch die mathematischen Modelle verbessert werden.

Fillergemische mit nur 50% Filler differenzieren wenig, weil der Einfluss des Bindemittels noch im wesentlichen die Eigenschaften der Mischung bestimmt. Mischungen mit 75% Filler sind schwer zu handhaben und liefern schlechte, mit Fehlern behaftete Resultate.

Die Beschränkungen auf Untersuchungen an einer Mischung mit einem Füllergehalt von 65% oder 70% erscheinen möglich.

Das Durchführen der Versuche ist mit der an der EMPA entwickelten Prüfanlage recht einfach vorzunehmen, der Aufwand ist angesichts der Aussagen, welche der Versuch liefert, vertretbar.

Q Zusammenhang mit den Resultaten anderer Prüfungen

Eine gute Korrelation besteht zwischen den Schwingungsviskositäten für 20 °C und Kreisfrequenz 1 s^{-1} mit den Grenzviskositäten, dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und teilweise auch mit Hohlraumgehalt nach Rigden. Schwingungsgrenzviskositäten weisen bei 70% Füllergehalt eine gute, bei einem Gehalt von 65% Filler eine mässige und bei einem solchen von 50% keine Korrelation zu anderen mechanischen Werten auf. Zwei Gründe können für dieses Verhalten angegeben werden:

- Das Bestimmen der Module bei 40 °C ist wegen der Weichheit des Materials schwierig. Somit sind die härtesten Mischungen, also die mit 70% Füllergehalt, am genauesten zu bestimmen und die weichsten am ungenauesten, was sich natürlich auch auf die Korrelation auswirkt.
- Mischungen mit nur 50% Füllergehalt differenzieren am wenigsten, weil der Einfluss des Fillers sich noch wenig bemerkbar macht.

Nichtlinearität, Rissbildung bei tiefen Temperaturen und Belastungsempfindlichkeit korrelieren nicht mit anderen Werten, stellen also eine neue Kategorie von Informationen dar.

IX Auswertung, Kommentare

Untersuchungen über die Materialbeschaffenheit

Die Untersuchungen über die Materialbeschaffenheit - petrographisch-mineralogische Untersuchung, Gehalt an ungeeigneten Anteilen und Gehalt an Verunreinigungen - ergeben mehrheitlich deutliche Unterschiede zwischen Fremd- und Rückgewinnungsfillern.

Die Fremdfiller entsprechen dabei in bezug auf ungeeignete Anteile, Verunreinigungen sowie den Anteil an Tonmineralien den heute gültigen Anforderungswerten der Norm SN 670'760. Lediglich der Filler H enthält mit etwa 10 vol-% Glimmer und Chloriten einen kritischen Wert an ungeeigneten Anteilen.

Die Rückgewinnungsfiller zeigen mit Ausnahme von Filler E* deutliche Unterschiede zu den Fremdfillern, indem sie etwa 2 bis 7 vol-% Asche- und Russ-Anteile (Filler B*, G*, N*, O*), etwa 3 Masse-% wasserlösliche Salze (Filler G*, N*, O*) und einen Gehalt an Tonmineralien von etwa 3 Masse-% (Filler N*, O*) aufweisen.

Korngrössenverteilung

Durch Mahlen der Gesteine oder durch Entstaubung beim Herstellen von Sand und Splitt entstandene und untersuchte Steinmehle enthielten 81.4 bis 93.0 Masse-% Filleranteile (Anteile mit Korndurchmesser < 0.09 mm). Die beim Aufbereiten von bituminösem Mischgut zurückgewonnenen Steinmehle enthielten 65.2 bis 93.0 Masse-% Filleranteile.

In der Sedimentationsanalyse weisen die untersuchten Filler alle Fraktionen bis < 0.005 mm auf. Bezogen auf die Filleranteile = 100%, sind die in der folgenden Tabelle zusammengefassten Korngrössenverteilungen der Filleranteile bestimmt worden.

Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Filleranteile

Anteile [mm]	Minimum	Maximum	Mittel- wert [Masse-%]	Standard- abweichung	2x Standard- abweichung
	<----->				
< 0.05	69.8	87.1	78.3	4.73	9.46
< 0.02	43.9	67.6	52.6	6.62	13.24
< 0.01	24.0	42.3	32.8	6.92	13.84
< 0.005	12.7	27.0	19.4	5.12	10.24

Zwischen Fremd- und Rückgewinnungsfiller bestehen keine signifikanten Unterschiede in der Korngrößenverteilung.

Volumetrische Untersuchungen

An den untersuchten Praxis-Fillern sind Hohlraumgehalte nach Rigden von 32.4 bis 41.9 vol-% bestimmt worden. Die Filler K, Q und T weisen Hohlraumgehalte von 34.5, 33.7 und 43.4 vol-% auf.

Anhand der Messungen ergibt sich unter Berücksichtigung der Schwankungen der Einzelwerte ein gutes Differenzierungsvermögen des Hohlraumgehaltes nach Rigden.

Zwischen Fremd- und Rückgewinnungsfillern ergeben sich aufgrund des Hohlraumgehaltes nach Rigden tendenzielle Unterschiede, indem die Rückgewinnungsfiller mehrheitlich höhere Hohlraumgehalte als die Fremdfiller aufweisen.

- Fremdfiller (n = 6) 32.4 bis 37.2 vol-%
- Rückgewinnungsfiller (n = 5) 35.3 bis 41.9 vol-%

Die Volumenänderung von EMPA-Prüfkörpern nach Wasserlagerung ergab für die Fremd- und Rückgewinnungsfiller Volumenzunahmen von 0.39 bis 5.42 vol-%. Hier zeigten vor allem die Rückgewinnungsfiller B*, G* und O* und als Ausnahme auch der Filler H Volumenzunahmen, die zum Teil deutlich über dem heute gültigen Anforderungswert der

Norm SN 670'760 liegen. Die Filler K und Q weisen Volumenzunahmen von 0.52 und 0.04 vol-% auf, der Filler T zerbröckelte während der Wasserlagerung.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die bestimmten Volumenzunahmen der Filler auf mögliche Abhängigkeit zu der effektiven Fillerkonzentration (C_{eff}) im Prüfkörper untersucht.

Für die Herstellung der EMPA-Prüfkörper werden Filler und Bitumen im Massenverhältnis 90:10 gemischt. Unter Berücksichtigung des Hohlraumgehaltes nach Ridgen und der Rohdichte des Fillers sowie der Dichte des Bitumens wird die effektive Fillerkonzentration, oftmals auch effektive Volumenkonzentration genannt, im Filler-Bitumen-Gemisch berechnet.

$$C_{eff} = \frac{C_v}{1-H_R}$$

C_v = Volumenkonzentration des Fillers in Bitumen

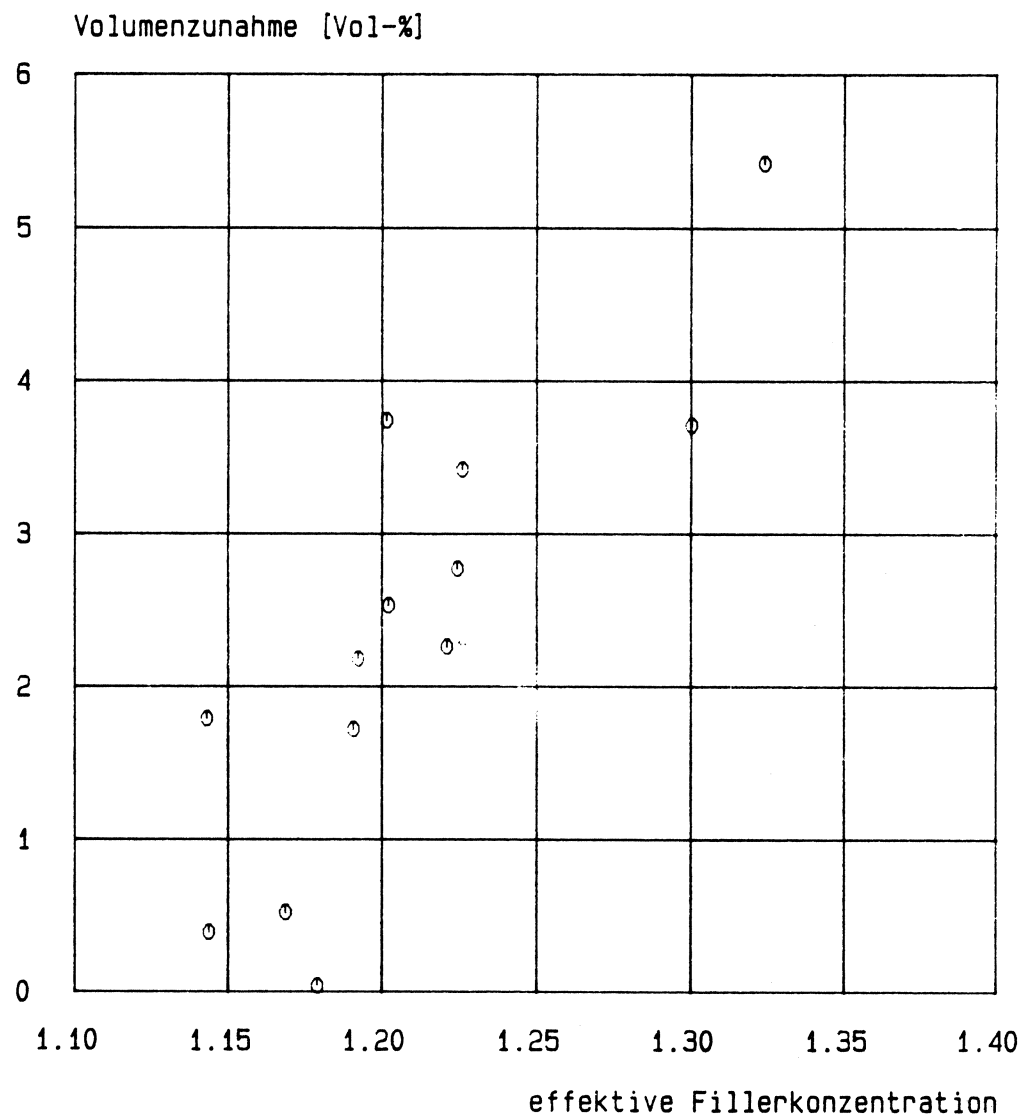
H_R = Hohlraumgehalt nach Ridgen

C_{eff} -Werte < 1 bedeuten dabei Bitumen-Ueberschuss im Gemisch, Werte > 1 einen Filler-Ueberschuss und somit freie Hohlräume im Filler-Bitumen-Gemisch.

Für die Filler-Bitumen-Gemische im Massenverhältnis 90:10, wie für die Volumenzunahme nach Wasserlagerung verwendet, wurden für die in der Praxis verwendeten Filler C_{eff} -Werte von 1.14 bis 1.32 berechnet, für die Filler K, Q und T 1.18, 1.17 und 1.36.

Zwischen Volumenzunahme und effektiver Fillerkonzentration im Filler-Bitumen-Gemisch konnte eine hohe und gesicherte Korrelation bestimmt werden. Daraus geht hervor, dass die bestimmte Volumenzunahme vom Hohlraumgehalt der geprüften Mischung und von den chemischen Eigenschaften des Fillers abhängt.

Im folgenden Diagramm a) ist die Abhängigkeit zwischen Volumenzunahme und effektiver Fillerkonzentration graphisch dargestellt.

Diagramm a)Volumenzunahme in f (Ceff)

Mischungen mit 90 Masse-% Filleranteil

Die Bestimmung der Bitumenzahl van der Baan wird im Rahmen dieser Untersuchungen den volumetrischen Untersuchungen zugeordnet.

Für die Fremd- und Rückgewinnungsfiller wurden Bitumenzahlen von 25 bis 41 bestimmt. Die Filler K, Q und T weisen Bitumenzahlen von 31, 30 und 56 auf.

Gemäss der in "Eisen voor bouwstoffen in de wegenbouw, 1978" enthaltenen Verfahrensbeschreibung ist die Stabilisierungswirkung der Filler aufgrund der Bitumenzahl van der Baan folgendermassen zu beurteilen: 28 bis 38: sehr schwach

40 bis 50: schwach

54 bis 60: mittel

Im Vergleich mit den an den untersuchten Fillern bestimmten Bitumenzahlen zeigt sich, dass gemäss der niederländischen Beurteilungsgrundlage die Filler, mit Ausnahme der Filler O* und T, sehr schwach stabilisieren. Der Filler O* stabilisiert schwach und einzig der Filler T erreicht mittlere Stabilisierungswirkung. Daraus ist demnach deutlich ersichtlich, dass die Bitumenzahl van der Baan mit der Beurteilungsgrundlage der niederländischen Vorschrift für die untersuchten, in der Praxis verwendeten Filler ungenügende Differenzierungsvermögen aufweist.

Zusammen mit dem bei der Durchführung der Prüfung festgestellten, teilweise unregelmässigen Verhalten der Filler beim Misch- und Knetvorgang sowie den teilweisen Sedimentationsvorgängen während der Messung der Eindringtiefe zeigt sich, dass die niederländische Vorschrift nicht ohne weitere Abklärungen auf schweizerische Filler übertragen werden kann.

Stabilisierungswirkung der Filler

Die Bestimmung der Stabilisierungswirkung der Filler erfolgte im Rahmen dieser Untersuchungen ausschliesslich an Filler-Bitumen-Gemischen, wodurch ein möglichst naher Praxisbezug gewährleistet ist.

An den Filler-Bitumen-Gemischen wurden folgende Prüfungen zum Erfassen des mechanischen Verhaltens durchgeführt:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel (RuK)
- Dynamische Viskosität
- Schub-Schwing-Prüfung

Die Ergebnisse der Schub-Schwing-Prüfung werden gesamthaft in Abschnitt **VIII** behandelt.

Die Bestimmung des Erweichungspunktes RuK von Filler-Bitumen-Gemischen ergibt die nachstehend zusammengefasst aufgeführten Temperaturen sowie die im Vergleich zum Bitumen berechneten Erhöhungen des Erweichungspunktes RuK.

Filler/Bitumen Verhältnis [Masse-%/Masse-%]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	Erhöhung Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
50/50	54.9 bis 60.3	6.1 bis 11.5
65/35	64.3 bis 97.3	15.5 bis 48.5
70/30	72.1 bis 146.5	23.3 bis 97.7
75/25	89.9 bis 153.5 *)	41.1 bis 104.7 *)

*) ohne Filler T

Bei den Untersuchungen zur Bestimmung des Erweichungspunktes RuK traten bei den 75/25-Gemischen der stark stabilisierenden Filler Probleme auf, indem die Prüfkörper nicht die charakteristische Sackbildung aufwiesen, sondern ohne Fliessen durchgebrochen sind. Am deutlichsten trat diese Erscheinung bei Filler T auf, von diesem Filler konnte der Erweichungspunkt RuK der 75/25-Mischung nicht bestimmt werden. In der obigen Tabelle ist dies auch aus der geringen Zunahme des maximalen Wertes zwischen den 70/30- und 75/25-Gemischen ersichtlich.

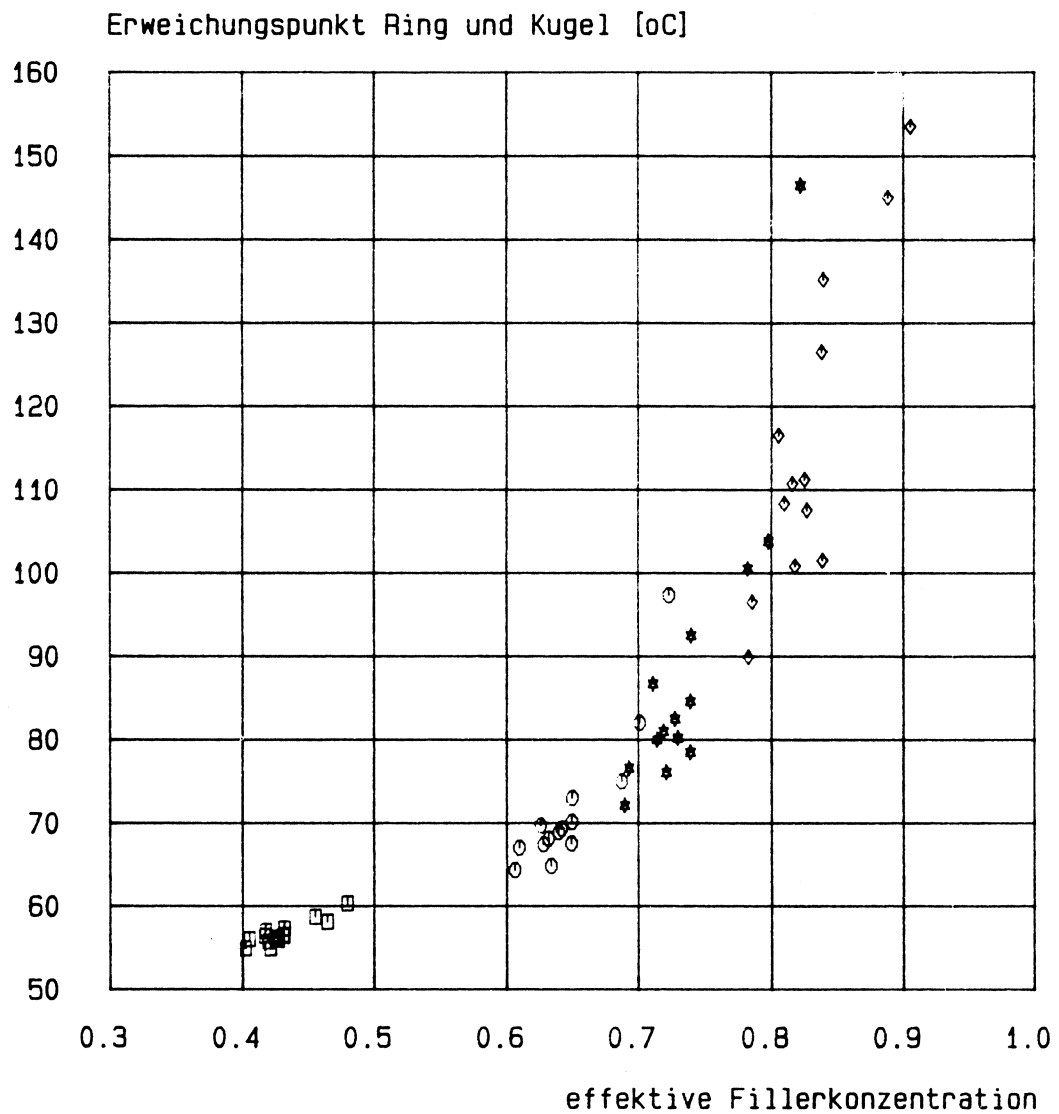
Anhand der bestimmten Erhöhungen des Erweichungspunktes RuK ist deutlich ersichtlich, dass die Differenzierung des Verfahrens mit steigendem Filleranteil zunimmt und mit den 70/30-Gemischen das Optimum erreicht, da die 75/25-Mischungen aus den bereits erwähnten Gründen nicht vollumfänglich repräsentativ sind.

Im weiteren ergaben die Untersuchungen eindeutig, dass die Rangordnung der Filler bezüglich Stabilisierungswirkung bei den verschiedenen Mischungsverhältnissen weitgehend gleich bleibt.

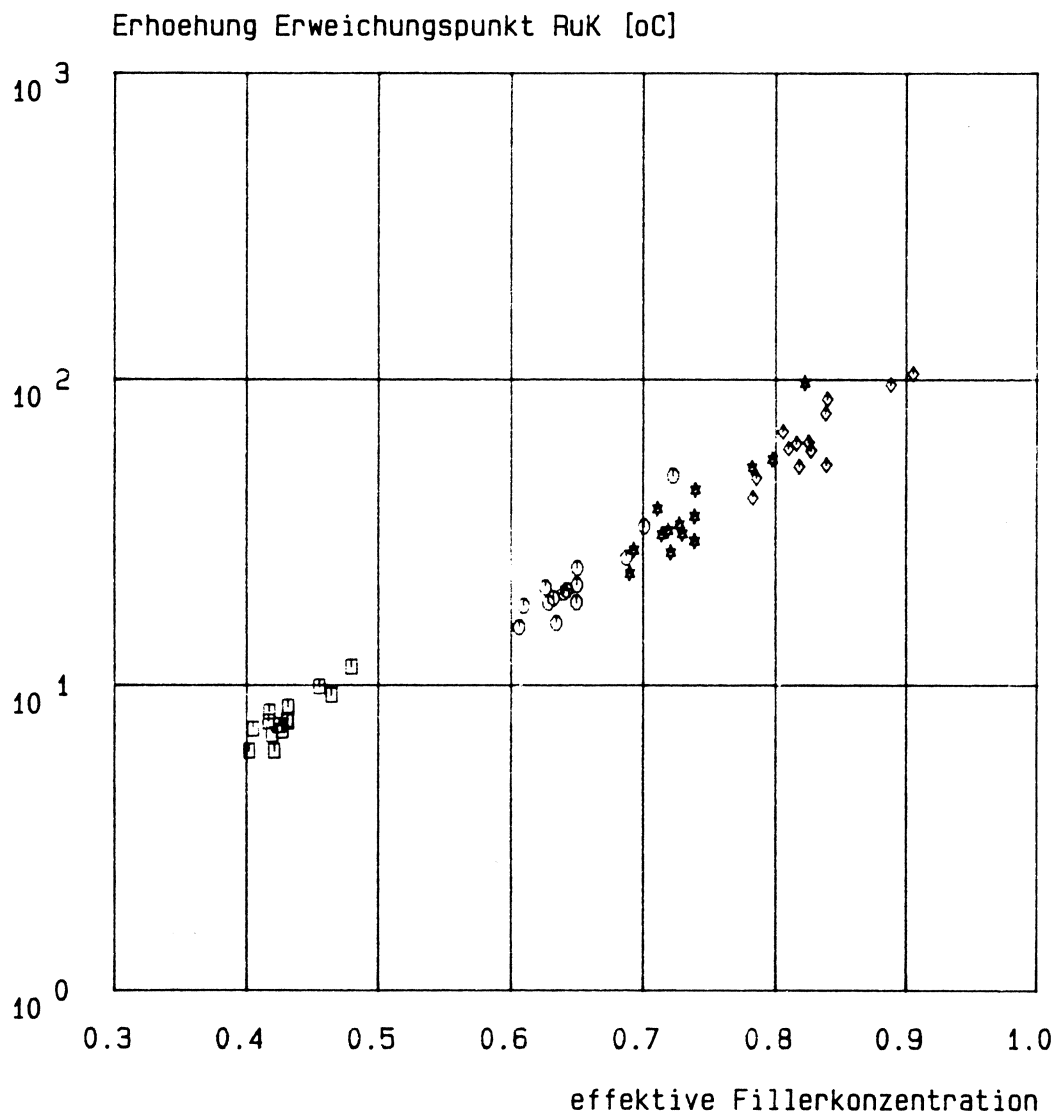
Im folgenden werden in Diagramm b) der Erweichungspunkt RuK und in Diagramm c) die Erhöhung des Erweichungspunktes RuK in Funktion der effektiven Fillerkonzentration C_{eff} graphisch dargestellt. In Diagramm c) ist vor allem die eindeutige Abhängigkeit der Erhöhung des Erweichungspunktes RuK von der effektiven Fillerkonzentration ersichtlich. Dies bedeutet, dass die Erhöhung des Erweichungspunktes RuK in direktem Zusammenhang mit dem Bitumenüberschuss im Gemisch steht, der seinerseits bei festgelegten Mischungsverhältnissen durch den Hohlraumgehalt nach Rigden, der Rohdichte des Fillers sowie der Dichte des Bitumens gegeben ist.

Für die Filler-Bitumen-Gemische wurden die folgenden C_{eff} -Werte berechnet:

Filler	Filler-Bitumen-Verhältnis [Masse-%/Masse-%]			
	50/50	65/35	70/30	75/25
A	0.43	0.65	0.74	0.84
B*	0.47	0.70	0.80	0.91
C	0.43	0.64	0.73	0.83
D	0.40	0.61	0.69	0.78
E*	0.42	0.63	0.72	0.82
F	0.42	0.63	0.72	0.82
G*	0.43	0.64	0.73	0.83
H	0.43	0.65	0.74	0.84
M	0.41	0.61	0.69	0.79
N*	0.43	0.65	0.74	0.84
O*	0.46	0.69	0.78	0.89
K	0.42	0.63	0.71	0.81
Q	0.42	0.63	0.71	0.81
T	0.48	0.72	0.82	0.93

Diagramm b)Erweichungspunkt Ring und Kugel in f (Ceff)

- Mischungen mit 50 Masse-% Filleranteil
- Mischungen mit 65 Masse-% Filleranteil
- ★ Mischungen mit 70 Masse-% Filleranteil
- ◆ Mischungen mit 75 Masse-% Filleranteil

Diagramm c)Erhöhung Erweichungspunkt RuK in f (Ceff)

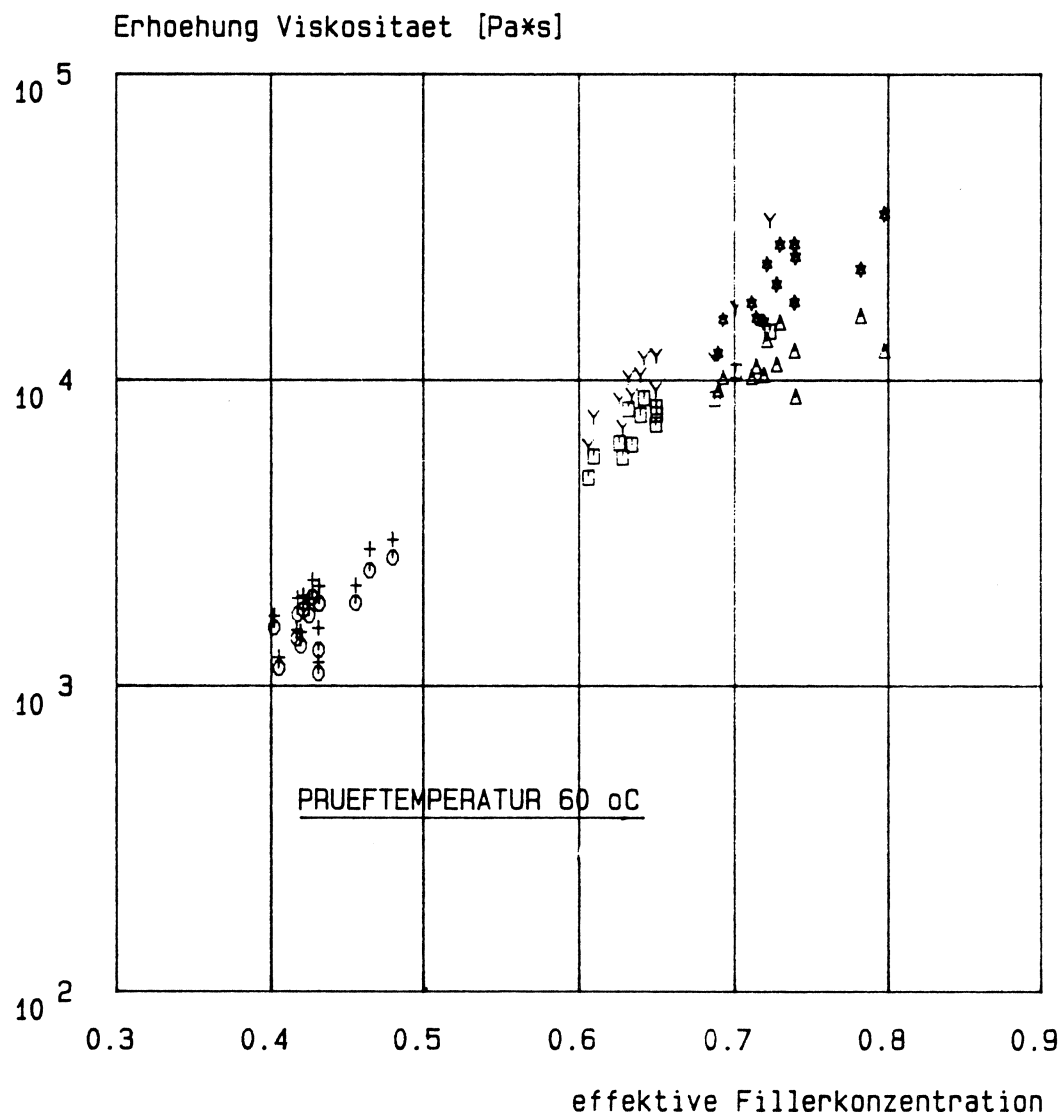
- Mischungen mit 50 Masse-% Filleranteil
- Mischungen mit 65 Masse-% Filleranteil
- ★ Mischungen mit 70 Masse-% Filleranteil
- ◇ Mischungen mit 75 Masse-% Filleranteil

Die Bestimmung der dynamischen Viskosität mittels Rotationsviskosimeter an Filler-Bitumen-Gemischen ergab die nachstehend aufgeführten Viskositäten und Grenzviskositäten. Da aus apparativen Gründen die Viskosität und folglich auch die Grenzviskosität der 70/30-Mischung des Fillers T nicht bestimmt werden konnte, fehlen diese Werte in der folgenden Aufstellung.

		Viskosität η (Pa · s)			
		Grenzviskosität η_0 (Pa · s)			
Filler/Bitumen- Verhältnis [Masse-%/Masse-%]		Prüftemperatur			
		60 °C	80 °C	110 °C	150 °C
50/50	η	1321- 2852	91- 302	6.4- 22.7	0.70- 1.10
	η_0	1417- 3237	115- 355	6.5- 23.1	0.71- 1.16
65/35	η	5031-14700	477-1137	21.9- 70.0	2.12- 6.72
	η_0	6300-33600	573-2459	26.3-132.3	2.24-10.05
70/30	η	9100-16537	783-1120	41.7- 74.2	4.16- 8.49
	η_0	15837-35262	1067-3062	52.1-155.4	4.95-11.23

In Diagramm d) werden der $\log$ (Erhöhung Viskosität 60 °C) und $\log$ (Erhöhung Grenzviskosität 60 °C) in Funktion der effektiven Fillerkonzentration C_{eff} graphisch dargestellt. Daraus ist die eindeutige Abhängigkeit der Erhöhung der Viskosität und der Grenzviskosität von der effektiven Fillerkonzentration ersichtlich. Dies bedeutet, dass ebenso die Erhöhung des Erweichungspunktes RuK wie auch die Erhöhung der Viskosität im Zusammenhang stehen mit dem Bitumenüberschuss im Filler-Bitumen-Gemisch.

Diagramm d)

Erhöhung Viskosität in f(Ceff)

Visk.

Grenzvisk.

○

+

Mischungen mit 50 Masse-% Filleranteil

□

Y

Mischungen mit 65 Masse-% Filleranteil

△

*

Mischungen mit 70 Masse-% Filleranteil

Die aus den Viskositäten und Grenzviskositäten errechneten Verhältnisse η_0/η , die als Vergleichswerte für das Mass der Strukturviskosität dienen, zeigen im wesentlichen eine deutliche Abnahme der Strukturviskosität mit zunehmender Temperatur und eine Zunahme der Strukturviskosität mit zunehmendem Filleranteil.

Vor allem bei den Prüftemperaturen 60 und 80 °C zeigt der Kurvenverlauf im Schubspannungs-Schergeschwindigkeits-Diagramm zusätzlich zu der Strukturviskosität eine unterschiedlich ausgeprägte Neigung zu thixotropem Verhalten. Ein Mass für das thixotrope Verhalten der Filler-Bitumen-Gemische ist die prozentuale Verringerung der Viskosität bei fallender Schergeschwindigkeit im Vergleich zur Viskosität bei zunehmender Schergeschwindigkeit. Günstige Prüftemperatur ist 60 °C, günstige Schergeschwindigkeit 0.3 s⁻¹.

Daraus ist mit wenigen Ausnahmen ersichtlich, dass das thixotrope Verhalten der Filler-Bitumen-Gemische mit zunehmendem Filleranteil zunimmt. Da jedoch im Vergleich der untersuchten Filler keine Regelmässigkeit für die Zunahme des Wertes des thixotropen Verhaltens bei zunehmendem Filleranteil bestimmt werden konnte, ist zu folgern, dass das thixotrope Verhalten der Filler-Bitumen-Gemische als fillerspezifisches Verhalten zu bewerten ist.

Anhand der Viskositätsmessungen können somit folgende rheologische Kennwerte der Filler-Bitumen-Gemische bestimmt werden:

- Viskosität der Filler-Bitumen-Gemische, ermittelt bei maximaler, festgelegter Schergeschwindigkeit.
- Grenzviskosität der Filler-Bitumen-Gemische, ermittelt bei Schergeschwindigkeit > 0.
- Verhältnis Grenzviskosität/Viskosität als Vergleichswert für die Strukturviskosität der Gemische.
- Vergleichswert für das thixotrope Verhalten der Gemische.

Während in den vorhergehenden Abschnitten die einzelnen Prüfungen ausgewertet wurden, werden im folgenden durch Berechnen von Korrelationskoeffizienten und Signifikanz der Korrelationskoeffizienten die Untersuchungsergebnisse der nachstehenden Prüfungen auf gegenseitige Korrelation untersucht.

- Hohlraumgehalt nach Rigden
- Bitumenzahl nach van der Baan
- Erweichungspunkt Ring und Kugel (RuK)
- Viskosität und Grenzviskosität

Hohlraumgehalt nach Rigden

Er korreliert gut mit dem Erweichungspunkt RuK, weniger gut mit der Bitumenzahl nach van der Baan. Eine gute Korrelation besteht zu Viskositäts- und Grenzviskositätswerten der Gemische mit 50 und 65 Masse-% Filler, keine zu den Werten der Gemische mit 70 Masse-% Filler.

Bitumenzahl nach van der Baan

Dieser Wert korreliert weniger gut mit dem Erweichungspunkt RuK als der Hohlraumgehalt nach Rigden. Eine gute Korrelation besteht zu Viskositäts- und Grenzviskositätswerten der Gemische mit 50 und vor allem mit 65 Masse-% Filler, keine zu den Werten der Gemische mit 70 Masse-% Filler.

Erweichungspunkt RuK

Die Erweichungspunkte von Mischungen mit unterschiedlichem Filleranteil korrelieren gut. Sie korrelieren gut mit den Grenzviskositätswerten gleicher Mischungen, weniger gut hingegen mit den Viskositätswerten. Die beste Korrelation zwischen Erweichungspunkt und Grenzviskosität besteht bei einem Filleranteil von 65 Masse-%.

Viskositätswerte

Bei gleicher Prüftemperatur korrelieren jeweils die Viskositätswerte der Mischungen mit 50 Masse-% Filler mit jenen der Mischungen mit 65 Masse-% Filler. Die Werte der Mischungen mit 70 Masse-% Filler korrelieren nur bei der Prüftemperatur von 150 °C mit jenen anderer Mischungen.

Bei gleicher Prüftemperatur korrelieren die Grenzviskositätswerte aller 3 Mischungen (50, 65 und 70 Masse-% Filler) miteinander.

Bei Mischungen mit 50 Masse-% Filler korrelieren die Viskositätswerte bei verschiedenen Prüftemperaturen miteinander. Diese Aussage gilt auch für Mischungen mit 65 Masse-% Filler sowie für die Grenzviskositätswerte aller 3 Mischungsverhältnisse.

Die Viskositätswerte verschiedener Prüftemperaturen von Mischungen mit 70 Masse-% Filleranteil korrelieren dagegen nicht.

X Folgerungen

Aufgrund der Untersuchungen im Rahmen dieser Forschungsarbeit ergeben sich nachstehende Folgerungen:

Die Prüfung Volumenänderung von EMPA-Prüfkörpern nach Wasserlagerung zeigt einen Zusammenhang zwischen der Volumenzunahme und der effektiven Fillerkonzentration C_{eff} des Fillers im Filler-Bitumen-Gemisch. Dies heisst folglich, dass die Volumenzunahme durch den Hohlraumgehalt nach Rigden und die Rohdichte des Fillers beeinflusst wird. Bei dem für diese Prüfung verwendeten Mischungsverhältnis ergeben sich für die untersuchten Filler unterschiedliche effektive Fillerkonzentrationen. Die Prüfungsbedingungen eliminieren die gefundene Abhängigkeit der Volumenzunahme von der effektiven Fillerkonzentration nicht. Dies ist im Hinblick auf die

Praxis durchaus richtig, denn Filler werden in Sollwerten im Gehalt zudosiert. Sollwerte für die effektive Fillerkonzentration werden nirgends diskutiert, es fehlt auch jegliche Erfahrung für ein solches Vorgehen.

Die Bestimmung der Bitumenzahl nach van der Baan charakterisiert das Verhalten von Filler-Wasser-Gemischen, der Bezug zur Stabilisierungswirkung des Fillers im Filler-Bitumen-Gemisch ist nicht in allen Fällen gegeben. Aufgrund der festgestellten Schwierigkeiten bei der Durchführung der Prüfung sowie aufgrund des ungenügenden Differenzierungsvermögens für schweizerische Filler ist die Einführung dieser Prüfung als Normprüfung nicht vorzusehen.

Die Bestimmung der Stabilisierungswirkung des Fillers im Filler-Bitumen-Gemisch über die Erhöhung des Erweichungspunktes RuK ist eine einfache und zweckmässige Methode. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass die Bestimmung mit Schulterringen erfolgen muss, und dass die Messung an den Mischungen mit 75 Masse-% Filler zu ungenau wird, da bei stark stabilisierenden Fillern die in die Ringe abgefüllte Masse nicht mehr die für die Temperaturbestimmung notwendige Sackbildung aufweist, sondern durchbricht. Da die Untersuchungen zudem ergeben haben, dass die Rangordnung der Filler in bezug auf den Erweichungspunkt RuK bei den verschiedenen Mischungsverhältnissen keine grossen Änderungen erfährt, kann gefolgert werden, dass die Bestimmung des Erweichungspunktes RuK an Gemischen mit 75 Masse-% nicht notwendig ist. Mit der Bestimmung des Erweichungspunktes RuK der Mischungen mit 50, 65 und 70 Masse-% Filleranteil ist die Stabilisierungswirkung eines Fillers genügend bestimmt.

Wie bereits bei der Prüfung Volumenzunahme nach Wasserlagerung zeigt auch der Erweichungspunkt Ring und Kugel eine Abhängigkeit zur effektiven Fillerkonzentration C_{eff} im Gemisch. Die Abhängigkeit ergibt für die Erhöhung des Erweichungspunktes RuK in der einfach logarithmischen Darstellung einen linearen Verlauf. Die gleiche Abhängigkeit wurde auch für die Erhöhung der Viskositätswerte bestimmt.

Die Erhöhung der Viskositätswerte ergeben jedoch eine bessere Differenzierung als die Erhöhung des Erweichungspunktes RuK, indem die Steigung der Viskositätserhöhungskurve in der einfach logarithmischen Darstellung grösser ist als diejenige des Erweichungspunktes RuK. Die Werte der Grenzviskosität sind, wie die graphischen Abbildungen zeigen, stetiger und liefern damit ein besseres Mass für die Stabilisierung als die Viskositätswerte nach Worn.

Daraus ist zu folgern, dass die Bestimmung der Stabilisierungswirkung des Fillers durch Bestimmen des Erweichungspunktes RuK und der Viskosität erfolgen kann, die Viskosität jedoch das bessere Differenzierungsvermögen aufweist und zudem auf einem physikalisch exakt definierten Messverfahren basiert.

Die Schubschwingprüfung eignet sich hervorragend, um das mechanische Verhalten von Filler-Bitumen-Mischungen im tieferen Temperaturbereich bis ins Detail zu erfassen. Die Prüfung liefert neben wertvollen Kennwerten zum mechanischen Verhalten Informationen über das Temperaturverhalten und die Belastungsempfindlichkeit, welche von praktischem Interesse sein können.

Dübendorf, 28. April 1989

Die Sachbearbeiter:


Dr. R. Gubler


A. Bernhard

EMPA Dübendorf

Strassenbau, Abdichtungen

Der Abteilungsvorsteher:


H.W. Fritz

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- 1 William M.L., Landel R.F., Ferry J.D.
The temperature dependence of relaxation in amorphous polymers and other glassforming liquids
J. Amer. Chem. Soc. 77, 1955, S. 3701
- 2 Dobson G.R.
Proceedings of the Association of Paving Taring Technologists
Vol 38, 1969, S. 123
- 3 Junker J.P., Weber J., Fritz H.W.
Untersuchung von Steinmehlen zur Erarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften
1. Teil, Forschungsauftrag 10/68, EDI/VSS, 1973
- 4 Junker J.P., Weber J., Fritz H.W.
Untersuchung von Steinmehlen zur Erarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften
2. Teil, Forschungsauftrag 6/71, EDI/VSS, 1974
- 5 Junker J.P., Fritz H.W.
Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut
Schlussbericht, Forschungsauftrag 22/75, EDI/VSS, 1976
- 6 Gubler R.
Anforderungen an Strassenbaubitumen
Schlussbericht, Forschungsauftrag 8/77, EDI/VSS, 1977
- 7 Meier B.
Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen
Schlussbericht, Forschungsauftrag 31/77, EDI/VSS, 1980
- 8 Fritz H.W., Meier B.
Rheologische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen
Schlussbericht, Forschungsauftrag 1/81, EDI/VSS, 1981
- 9 Junker J.P.
Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt
Dissertation, EMPA-Bericht Nr. 215, 1987

