

Untersuchung des
Reibungsverhaltens von PTFE bei
Variation der Einflußparameter
Verschiebegeschwindigkeit, Pressung,
Lagergröße, Gesamtweg "Verschleiß",
Lageraubau und Lastexzentrizität

T 2059

T 2059

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

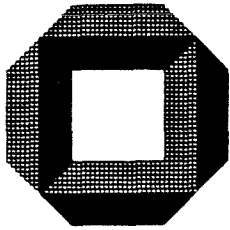
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

Untersuchung des Reibungsverhaltens von
PTFE bei Variation der Einflußparameter
Verschiebegeschwindigkeit, Pressung,
Lagergröße, Gesamtweg (Verschleiß),
Lageraufbau und Lastexzentrizität

Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
Dipl.-Ing. W. Zeller

Universität Karlsruhe
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Leitung: Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
1988

Abschlußbericht

UNTERSUCHUNG DES REIBUNGSVERHALTENS VON PTFE
BEI VARIATION DER EINFLUSSPARAMETER:
VERSCHIEBEGESCHWINDIGKEIT, PRESSUNG, LAGERGRÖSSE,
GESAMTWEG (VERSCHLEISS), LAGERAUFBAU UND LASTEXZENTRIZITÄT

Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
Dipl.-Ing. W. Zeller

Der Bericht umfaßt:

Inhaltsangabe	:	3 Seiten
Text	:	77 Seiten
Literaturverzeichnis	:	5 Seiten
Anlagen	:	161 Seiten
Anhang	:	9 Seiten

Das Forschungsvorhaben wurde im Auftrag des Institut für Bautechnik,
Berlin, Az IV/1-5-284/82, durchgeführt. Für die Förderung sei an dieser
Stelle herzlich gedankt.

UNTERSUCHUNG DES REIBUNGSVERHALTENS VON PTFE
BEI VARIATION DER EINFLUSSPARAMETER:
VERSCHIEBEGESCHWINDIGKEIT, PRESSUNG, LAGERGRÖSSE,
GESAMTWEG (VERSCHLEISS), LAGERAUFBAU UND LASTEXZENTRIZITÄT

Zusammenfassung

Geschmierte PTFE-Gleit- und Verformungsgleitlager wurden in zahlreichen Kurz- und Langzeitversuchen bei Variation oben angeführter Einflußparameter und mit der Hauptzielrichtung geprüft, die Abhängigkeit der Reibungszahlen von der Verschiebegeschwindigkeit experimentell zu ermitteln. Begleitende Schubversuche an bewehrten Elastomerlagern unterschiedlicher Steifigkeit sollten über die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Schubwiderstandes Auskunft geben.

Die in Tabellen und Diagrammen ausführlich dargestellten Versuchsergebnisse sowie weitere, umfangreiche Auswertungen ergaben folgendes: Die Anfahrreibung geschmierter PTFE-Gleitflächen ist von der Verschiebegeschwindigkeit, Pressung, Temperatur, Lagergröße, Standzeit ohne Gleitbewegung und vom Gesamtgleitweg abhängig. Neben weiteren Einflüssen spielt bei Reibung und Verschleiß auch die Anordnung des Schmieraschenrasters zur Gleitrichtung und die Größe der Verschiebungsamplitude eine Rolle. Lageraufbau und geringe Lastexzentrizitäten verändern das Reibungsniveau nicht wesentlich. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Anfahrreibung und des Schubwiderstandes von Elastomerlagern wird durch Erhöhungsfaktoren erfaßt.

Aus den beobachteten, detailliert beschriebenen Verschleißerscheinungen werden Schlußfolgerungen hinsichtlich des tribologischen Verhaltens von Gleit- und Verformungsgleitlagern gezogen. Zur Trendvorhersage einiger wichtiger Einflußgrößen auf die Anfahrreibung werden als Arbeitshypothese analytische Ansätze vorgestellt. Die komplexen Reibungs- und Verschleißvorgänge werden mit Hilfe der Systemanalyse beschrieben. Zur endgültigen Beurteilung des Reibungs- und Verschleißverhaltens geschmierter Gleitlager muß das tatsächlich im Bauwerk auftretende Beanspruchungskollektiv bekannt sein, das jedoch zum Beispiel bei Brückengleitlagern von vielen weiteren Zusatzparametern beeinflusst wird.

INVESTIGATION OF FRICTION BEHAVIOUR OF PTFE
BY VARIATION OF THE INFLUENCE PARAMETERS:
SLIDING SPEED, PRESSURE, BEARING SIZE,
TOTAL WAY (WEAR), BEARING SYSTEM, LOAD EXCENTRICITY

Summary

Lubricated PTFE-slide- and deformation slide bearings were tested in numerous short- and longtime tests by variation of the parameters as stated above and with the main intent of determining experimentally the dependence of the friction coefficient on the sliding speed. Furthermore shear tests with variable velocities were carried out to study the shear resistance of reinforced elastomeric bearings.

From the test results represented in tables and diagrams in detail and further evaluations the following is to be deduced:

The starting friction coefficient of lubricated PTFE-sliding surfaces depends on sliding speed, pressure, temperature, size of bearing, stay time without slide motion and total sliding way. In addition to other influences on friction and wear the arrangement of grease pockets in the slide direction and the amplitude of displacement is of importance too. The frictional level is not changed essentially by the bearing type and normal load excentricity. The dependence of the starting friction and of the shear resistance of elastomeric bearings on the velocity are given by increase factors.

From the observed wear appearances conclusions are drawn in regard to tribological behaviour of slide- and deformation slide bearings.

Analytical formulations for estimating some important influences on the starting friction are presented. The complex friction and wear processes are discussed by the principles of system analysis. But to assess friction and wear behaviour of lubricated slide bearings finally the real tribological load collective of a structure must be known. For bridge bearings this collective depends on a great number of further parameters.

Examen du comportement de frottement de PTFE par variation des paramètres d'influence:

vitesse de translation, pression, grandeur de palier, trajet total (usure), système d'appui et excentricité de charges

RESUME

Des paliers PTFE glissants et glissants de déformation lubrifiés étaient essayés dans plusieurs essais de longue et de courte durée par variation des paramètres ci-dessus ayant pour but de déterminer expérimentalement la dépendance du coefficient de frottement de la vitesse de translation. En outre on avait exécuté des essais tranchants avec des vitesses variables pour déterminer la résistance à l'effort tranchant des paliers armés en élastomère.

Le suivant découle des résultats d'essai représentés en détail dans des tableaux et diagrammes et d'autres évaluations:

Le coefficient de frottement initial des surfaces glissantes lubrifiées dépend de la vitesse de translation, de la pression, de la température, de la grandeur de palier, du temps de pose sans mouvement de glissement et du trajet total de glissement. Entre autres influences sur le frottement et l'usure, ce sont l'arrangement des poches de graissage dans la direction de glissement et l'amplitude de translation, qui sont aussi importants. Le niveau de frottement n'est pas modifié considérablement par le type de palier et l'excentricité normal de charges. La dépendance du frottement initial et de la résistance à l'effort tranchant des paliers en élastomère de la vitesse est couverte par des facteurs d'augmentation.

Sur la base des phénomènes d'usure observés et décrits en détail il y a des conclusions sur le comportement tribologiques des paliers glissants et glissants de déformation. Des formulations analytiques pour estimer quelques influences importantes sur le frottement initial sont présentées. Les processus complexes de frottement et d'usure sont discutés sur la base des principes d'analyse de système. Mais pour analyser le comportement de frottement et d'usure des paliers glissants lubrifiés il faut savoir finalement le collectif tribologiques réel de charges. Pour des paliers de pont, ce collectif dépend d'un grand nombre d'autres paramètres.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Versuchseinrichtung.....	4
3 Versuchsprogramm.....	7
4 Lageraufbau, Werkstoffe, Probekörperabmessungen, Lagereinbau.....	8
5 Untersuchungen an geschmierten Gleitlagern bei Raumtemperatur	
5.1 Kurzzeitversuche (Versuchsreihe A1)	
5.1.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung.....	10
5.1.2 Versuchsergebnisse:	
Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und	
Reibungszahlen.....	13
Temperaturentwicklung beim Gleiten.....	14
Verformungsmessungen.....	15
Aussehen der Gleitflächen, Verschleiß.....	17
Beurteilung und Folgerungen.....	20
Zusammenfassung.....	25
5.2 Dauergleitprogrammversuche über 2205 m Gesamtgleitweg (Versuchsreihe A2)	
5.2.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung.....	27
5.2.2 Versuchsergebnisse:	
Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und	
Reibungszahlen.....	27
Verformungs- und Verschleißmessungen.....	29
Aussehen der Gleitflächen.....	29
5.2.3 Zusammenfassung.....	31

5.3	Dauergleitprogrammversuche über 10024 m Gesamtgleitweg (Versuchsreihe D)	
5.3.1	Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung.....	33
5.3.2	Versuchsergebnisse: Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und Reibungszahlen.....	34
	Temperaturentwicklung beim Gleiten.....	36
	Aussehen der Gleitflächen.....	36
	Verformungs- und Verschleißmessungen.....	38
5.3.3	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen.....	39
6	Untersuchungen an bewehrten Elastomerlagern und geschmierten Verformungsgleitlagern bei Raumtemperatur	
6.1	Schubversuche an bewehrten Elastomerlagern \varnothing 450 mm (Versuchsreihe B1)	
6.1.1	Lageraufbau, Versuchsbedingungen, Versuchsdurchführung..	43
6.1.2	Versuchsergebnisse: Lagerstauchungen.....	44
	Schubversuche.....	44
6.2	Kurzzeitversuche an geschmierten, zentrisch belasteten Verformungsgleitlagern (Versuchsreihe B2)	
6.2.1	Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung.....	48
6.2.2	Versuchsergebnisse: Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und der Schubverformungen der Elastomerlager.....	49
	Verhalten der Lager beim Verschiebevorgang.....	49
	Verschiebewiderstände, Schubverformungen, Gleitwegabhängigkeit.....	50
	Geschwindigkeitsabhängigkeit.....	52
	Verformungsmessungen.....	55
	Aussehen der Gleitflächen, Verschleiß.....	56
6.3	Kurzzeitversuche an geschmierten, exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern (Versuchsreihe C)	
6.3.1	Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung.....	58
6.3.2	Versuchsergebnisse.....	58

	Seite
6.4 Dauergleitprogrammversuche an geschmierten, zentrisch und exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern über 2205 m Gesamtgleitweg (Versuchsreihen B2 und C)	
6.4.1 Versuchsbedingungen.....	60
6.4.2 Versuchsergebnisse:	
Reibungs- und Verformungsverhalten.....	60
PTFE-Verformungen und Verschleißmessungen.....	62
Aussehen der Gleitflächen.....	63
6.4.3 Zusammenfassung.....	64
7 Gesamtzusammenfassung und Ergebnisse weiterer Untersuchungen	
7.1 Aufgabenstellung.....	66
7.2 Versuchsprogramm.....	68
7.3 Versuchsergebnisse	
7.3.1 Reibversuche an Gleit- und Verformungsgleitlagern	
Reibungsverhalten.....	69
Gleitspaltänderungen.....	70
Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen.....	71
7.3.2 Schubversuche an Elastomerlagern.....	72
7.4 Erläuterung des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Gleitlagern.....	73
7.5 Tribologisches System Gleitlager.....	75
7.6 Zusatzuntersuchungen.....	75
7.7 Schlußbemerkungen.....	76
Literaturverzeichnis.....	78 - 82
Anlagenverzeichnis, Anlagen 1-161	
Anhang	

1 Einleitung

Der Kunststoff Polytetrafluoräthylen (PTFE) zeichnet sich durch seine hohe Alterungs-, Korrosions- und Temperaturbeständigkeit aus, ist besonders widerstandsfähig gegen chemische Angriffe und leicht bearbeitbar. Dank seiner Eigenschaften wird er in der Technik in großem Umfang angewendet.

Im Bauwesen wird PTFE insbesondere wegen seiner niedrigen Reibungszahl und seinem günstigen Verschleißverhalten vor allem bei Gleitlagern eingesetzt. In der BR Deutschland werden solche Lager nahezu ausschließlich mit der Gleitpaarung PTFE-austenitischer Stahl, geschmiert mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung verwendet. Die Reibungszahl nimmt i.a. mit wachsender Flächenpressung und kleiner werdender Verschiebegeschwindigkeit ab, bei tieferen Temperaturen als Raumtemperatur jedoch zu.

Aus den Literaturquellen [1], [4] bis [7] geht hervor, daß vor allem im Zusammenhang mit allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen von PTFE-Gleitlagern für Brücken- und Hochbau zahlreiche Gleitreibungsversuche sowohl bei Raumtemperatur als auch bei verschiedenen tiefen Temperaturen bis $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt wurden. Es handelt sich dabei vorwiegend um Modellagerscheiben (\emptyset 75 mm, Dicke $t = 4,5$ mm) mit originalgetreuer Schmierstoffspeicherung. Die Versuche werden fast ausschließlich bei den beiden Verschiebegeschwindigkeiten $v_1 = 0,4$ mm/s und $v_2 = 2$ mm/s (im Mittel) mit den zugehörigen Verschiebewegen von $s_1 = \pm 5$ mm und $s_2 = \pm 4$ mm bis zu einem Gesamtgleitweg von $S \approx 5000$ m vorgenommen.

In [11] wird über entsprechende Versuche über einen Gesamtgleitweg von $S \approx 20000$ m berichtet. Wie aus [1] bis [8] hervorgeht, sind vereinzelt auch geschmierte und ungeschmierte PTFE-Platten mit und ohne Schmiertaschen [4] bis [6] bis zu einem Scheibendurchmesser von \emptyset 720 mm [2] untersucht worden. Ferner ist aus [3] zu entnehmen, daß in den USA Versuche mit Verschiebegeschwindigkeiten bis zu 80 mm/s durchgeführt wurden, die zeigen, daß die Verschiebegeschwindigkeit einen sehr wesentlichen Einfluß auf die sogenannten statischen und dynamischen Reibungszahlen μ_{An} und μ_n ausübt. In [9] sind ebenfalls Angaben über das geschwindigkeits-, pressungs- und temperaturabhängige Reibungsverhalten von ungeschmiertem PTFE gegenüber verschiedenen Materialien bei umlaufender Bewegung in einem Stift-Scheiben-Tribometer zu finden.

Bei Brücken unter kurzzeitig wirkenden Verkehrslasten können je nach Baustoff, Konstruktion und Steifigkeit des Überbaus nach allgemeiner Auffassung Gleitgeschwindigkeiten bis zu etwa 25 mm/s auftreten. Wie die an einer Stahlbrücke erfolgten Untersuchungen in [12] gezeigt haben, resultiert der wesentliche Anteil am jährlich zurückgelegten Gleitweg aus Verkehrslasten infolge SLW und Straßenbahnen, die kleine, jedoch häufig vorkommende Gleitbewegungen bis etwa 0,5 mm verursachen können. Dabei liefern die langsam im Gleitteil stattfindenden Relativbewegungen aus Temperaturänderungen des Überbaus einen relativ geringen Beitrag am Gesamtgleitweg.

Gleitgeschwindigkeiten bis zu $v \approx 200$ mm/s sind im Lastfall "Erdbeben" bei Brücken und Konstruktionen des Hochbaus als realistisch anzusehen. Es ist üblich, bei mehrfeldrigen Brücken (Durchlaufträgern) den Festpunkt Pfeilern und -lagern die gesamten bei einem Erdbeben auftretenden Massenkkräfte zuzuweisen, wogegen jene Pfeiler, auf denen verschiebliche Gleitlager angeordnet sind, in Gleitrichtung nur für Reibungskräfte infolge der langsamen Temperaturbewegungen bemessen werden. Die größeren Kräfte zufolge den schnellen Bewegungen aus Erdbeben bleiben dabei unberücksichtigt.

In einem weiteren Anwendungsgebiet werden z.B. im Reaktorbau Gleit- und Verformungsgleitlager angeordnet, um die großen Relativverschiebungen zwischen Primär- und Sekundärabschirmung im Lastfall "Flugzeugabsturz" aufnehmen zu können. Dabei treten Verschiebungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von $v = 2000$ mm/s auf.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei der Berechnung und Bemessung der Lager und der anschließenden Bauteile meist von Reibungszahlen ausgegangen wird, die den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zugehöriger Lagertypen entnommen werden. Der Ingenieur weiß dabei in der Regel nicht, daß diese Werte aus Laborversuchen stammen, bei denen die Temperatur zwar -35 °C, die Verschiebegeschwindigkeit aber nur $v = 0,4$ und 2 mm/s beträgt.

Wie auch eigene, unveröffentlichte Kurzzeitversuche an bauaufsichtlich zugelassenen, jedoch ungeschmierten Verformungsgleitlagern gezeigt haben, ist der Einfluß der Verschiebegeschwindigkeit auf die Größe der Reibungskräfte erheblich und müßte bei größeren Gleitgeschwindigkeiten zusätzlich zum Einfluß von tiefen Temperaturen berücksichtigt werden. Zur sicheren Bemessung der Bauteile und zur Schadensverhütung müßten demnach auch die geschwindigkeits- und verschleißabhängigen Reibungszahlen von PTFE-Gleitflächen bekannt sein.

Aus diesem Grunde wurde beim Institut für Bautechnik, Berlin, ein Forschungsantrag mit der Hauptzielrichtung gestellt, für Gleit- und Verformungsgleitlager die Abhängigkeit der Reibungszahlen von der Verschiebegeschwindigkeit experimentell zu untersuchen. Bei den durchgeführten Versuchen an Gleitlagern wurden außer der Verschiebegeschwindigkeit auch die Lagerpressung, Lagergröße, Exzentrizität und der Gesamtgleitweg variiert.

2 Versuchseinrichtung

Für die Untersuchungen stand eine am Institut entwickelte und gebaute Versuchseinrichtung (vgl. Anlagen 1 und 2) zur Verfügung, mit der vertikale Druckkräfte bis ca. 2500 kN und horizontale Verschiebekräfte bis ca. 200 kN durch zwei voneinander unabhängige hydraulische Systeme aufgebracht werden können. Die Hochleistungshydraulikanlage läßt in einer Verschieberichtung je nach Größe des Gleitwegs Geschwindigkeiten bis zu etwa 2000 mm/s zu. Bei hin- und hergehender Bewegung können Gleitwege von $s = \pm 100$ mm bei Verschiebegeschwindigkeiten bis ca. 200 mm/s erreicht werden. Es ist sowohl eine Kraft-, als auch eine Wegsteuerung über einen rechnergesteuerten servohydraulischen Regler möglich.

Die Vertikalkraft wird durch eine auf dem Boden der Prüfhalle stehende Druckpresse erzeugt, die zentrisch zu den vier, gegen das Spannungsfeld der Prüfhalle mit je 1000 kN vorgespannten, am oberen Haupt des Prüfstandes mit einer biegesteifen Deckplatte verbundenen Vertikalpfosten angeordnet ist. Die lotrechte Druckkraft wird ebenfalls durch ein servohydraulisches System geregelt. Als Meßwertaufnehmer dient eine im vertikalen Kraftfluß zwischengeschaltete Kraftmeßdose bzw. bei einigen Versuchen ein Öldruckaufnehmer.

Die horizontale Verschiebekraft wird mit einem speziellen Zug-Druck-Zylinder, der eine große zulässige Kolbengeschwindigkeit und ein Ventil mit kurzer Ansprech- bzw. Reaktionszeit und großer Durchflußmenge besitzt, in die Mittelebene des Gleitschiebers eingeleitet. Dieser Zylinder ist mit dem Gleitschieber über ein Koppelstück verbunden. Darin zwischengeschaltet sind ein kalibriertes Meßglied zur Kontrolle der erforderlichen Verschiebekraft und ein Leerlaufglied, das bei Bedarf ein Leerlaufspiel ermöglicht. Zur Aufnahme der Horizontalkräfte ist der Pressenbock in sich ausgesteift, zusätzlich stützt er sich in Gleitschieberebene über einen horizontalen Stahlrahmen gegen die Vertikalpfosten des Prüfstandes ab.

Der Gleitschieber wird an der oberen Deckplatte durch zwei Rollenlager aus gehärtetem Edelstahl mit geringer Hertzscher Pressung und damit vernachlässigbar kleinem Rollwiderstand horizontal geführt. Die große Steifigkeit der beiden Rollen in vertikaler Richtung verhindert bei exzentrischer Rollenstellung bezüglich der Vertikalkraftachse eine Schrägstellung des Gleitschiebers. Eine exzentrische Beanspruchung des Lagers ist somit praktisch ausgeschlossen.

Das zu prüfende Lager wird mit oben liegender, dem Gleitschieber zugewandter Gleitfläche in die Anlage eingebaut. Zur Rutschvermeidung wird die Gleitplatte mit nach unten weisender Gleitfläche am Gleitschieber mittels dort angeschraubter Anschläge festgehalten. Bei einer derartigen Anordnung wird der Lagerkörper auch bei horizontaler Bewegung des Gleitschiebers bezüglich der vertikalen Pressenkraft zentrisch belastet.

Bei Versuchen mit hohen Verschiebegeschwindigkeiten ist der Einfluß von Massenkräften auf die Versuchsergebnisse nicht mehr vernachlässigbar. Erfahrungsgemäß können dabei immerhin Beschleunigungen bis über $10 \cdot g$ auftreten, so daß das im horizontalen Kraftfluß zwischen Gleitschieber und Horizontalzylinder geschaltete Meßglied verfälschte Meßergebnisse liefern würde. Deshalb wurde zur Bestimmung des horizontalen Verschiebewiderstandes ein spezielles Meßelement bzw. Meßlager (vgl. Anlage 1) entwickelt: Der obere und untere Drucktisch, zwischen denen sich ein Rollenpaar mit geringer Rollreibung befindet, sind über ein konsolartiges Verbindungsstück und eine zwischengeschaltete, vorgespannte Kraftmeßdose horizontal nahezu starr miteinander verbunden. Am unteren Drucktisch sind seitlich zwei steife Stahlscheiben angebracht, über die die Horizontalkräfte auf die Vertikalpfosten des Prüfstandes abgetragen werden und somit ein Verdrehen des Meßlagers verhindern.

Wegen der kleinen elastischen Verformungen des Meßlagers bleibt der obere Drucktisch auch beim schnellen Verschieben des Gleitschiebers nahezu in Ruhe. Die in der Gleitebene wirkenden Verstellkräfte können damit ohne größeren Einfluß von Massenkräften gemessen werden.

Die im Antrag vorgesehene Beschaffung einer Meßplattform aus Quarzelementen, mit der ein besseres Auflösungsvermögen und eine praktisch verformungslose Kraftmessung möglich gewesen wäre, war aus Kostengründen nicht realisierbar.

Die Versuche werden über einen rechnerunterstützten, servohydraulischen Regler gesteuert und überwacht, der an die Hydraulikanlage angeschlossen ist, und mit dem bei der in Gleitreibungsversuchen üblichen Wegsteuerung die Verschiebeweg-Zeit-Funktion des Gleitschiebers als Sollwertvorgabe eingegeben werden kann. Durch kontinuierlichen Vergleich von Soll- und Istwert versucht die Regelung die Öldurchflußmenge im Horizontalzylinder-system so einzustellen, daß der Istwert dem Sollwert entspricht.

Die Meßdaten können mit Schreibern direkt aufgezeichnet oder speziell bei hoher Verschiebegeschwindigkeit mit einer rechnergesteuerten Meßanlage, die bis zu ca. 50000 Einzelmessungen pro Sekunde erlaubt, in digitaler Form registriert und auf Magnetplatten oder Bänder abgespeichert werden.

3 Versuchsprogramm

Entsprechend der vorgegebenen Zielrichtung, insbesondere das geschwindigkeitsabhängige Reibungsverhalten von Gleit- und Verformungsgleitlagern zu untersuchen, gliedert sich das Versuchsprogramm in die Versuchsreihen A1, A2, B1, B2, C und D (vgl. Anlage 3). Der durch die Versuche erfaßte Geschwindigkeitsbereich liegt zwischen 0,4 und 2000 mm/s. Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur vorgenommen.

In den Versuchsreihen A1, A2 und D wurden insgesamt 63 Gleitlager unterschiedlichen Durchmessers in Abhängigkeit von der Verschiebegeschwindigkeit, der mittleren PTFE-Pressung und dem Gesamtgleitweg geprüft. Es handelt sich dabei um Kurzzeitversuche über 30 m bzw. 100 m Gesamtgleitweg und um Dauergleitprogramm-Versuche über 2200 m und 10000 m Gesamtgleitweg, die mit wechselnder Verschiebegeschwindigkeit gefahren wurden.

In der Versuchsreihe B1 wurden Schubversuche an bewehrten Elastomerlagern mit gleichem Durchmesser, aber unterschiedlichen Einbaudicken und Shore-A-Härten in verschiedenen Geschwindigkeits- und Schubverformungsbereichen durchgeführt. Sie sollten auch einen Vergleich zum Verhalten des Elastomerteils bei Verformungsgleitlagern ermöglichen.

Die Versuchsreihen B2 und C behandeln insgesamt 21 Versuche an geschmierten, in Kurzzeit- und Dauergleitprogrammversuchen bei variabler Verschiebegeschwindigkeit geprüften Verformungsgleitlagern mit konstantem PTFE- und Elastomerdurchmesser.

Mit den Kurzzeitversuchen der Versuchsreihe B2 über 30 bzw. 100 m Gesamtgleitweg wurde das geschwindigkeitabhängige Verhalten solcher Verformungsgleitlager bei zentrischer Vertikalbelastung untersucht.

Die Versuche C sollten den Einfluß einer ständigen Exzentrizität, die durch eine Schrägstellung des Verformungsteils mit einem Keil hergestellt wurde, auf das Reibungsverhalten eines Verformungsgleitlagers punktuell bei niedriger Verschiebegeschwindigkeit erfassen.

Die obigen, allgemein gehaltenen Angaben verschaffen einen Gesamtüberblick über das durchgeführte Versuchsprogramm. Weitergehende Hinweise über die Versuchsbedingungen der einzelnen Versuchsreihen sind im Detail in den Abschnitten 5 und 6 zu finden.

4 Lageraufbau, Werkstoffe, Probekörperabmessungen, Lagereinbau

In Anlage 4 ist der Aufbau eines PTFE-Gleitlagers und eines Verformungs-gleitlagers dargestellt. Aus den Anlagen 5 bis 8 gehen Probekörperabmes-sungen und verwendete Werkstoffe der geprüften Lager hervor.

Die Versuchs-Gleitlager bestehen aus einer 9,5 mm starken, stählernen Gleitplatte mit angeschraubtem, 2,5 mm dickem austenitischem Stahlblech, einer ca. 4,5 mm dicken PTFE-Ronde mit einseitig eingesprägten Schmier-taschen zur Schmierstoffspeicherung und einer runden PTFE-Aufnahme. In diese Stahlunterlage sind die Lagerscheiben wegen der bekannten Fließnei-gung von PTFE versenkt eingesetzt. Die Einlaßtiefe wurde aufgrund der vorhandenen Scheibendicken einheitlich zu 2,6 mm gewählt, so daß sich zwischen Unterlage und Gleitplatte Spalthöhen von etwa 2 bis 2,2 mm in unbelastetem Zustand ergeben. Die PTFE-Scheiben, das austenitische Stahl-blech und das zur Schmierung verwendete Siliconfett wurden von einschlä-ßigen, überwachten Fachfirmen bezogen. Die im Rahmen der Eigen- bzw. Fremdüberwachung erstellten Labor-Prüfberichte und Überwachungsbescheini-gungen für diese aus der laufenden Fertigung gelieferten Stoffe sind im Anhang zu finden.

Die untersuchten Verformungsgleitlager bestehen wie das Gleitlager aus einer Gleitplatte mit aufgeschraubtem, austenitischem Stahlblech von 2,5 mm Dicke, einer PTFE-Ronde \varnothing 450x4,5 mm, einer 56,6 mm dicken PTFE-Aufnahme und einem bewehrten Elastomerlager mit \varnothing 450 mm. Die Ein-laßtiefe für die PTFE-Scheibe betrug auch hier 2,6 mm, um Spalthöhen von etwa 2 bis 2,2 mm zu erhalten.

Die PTFE-Aufnahme wurde entsprechend den Zulassungen so bemessen, daß im Lastfall II bei einer maximal zulässigen mittleren PTFE-Pressung von 45 N/mm^2 die mittlere Elastomerpressung kleiner als 15 N/mm^2 bleibt, und sowohl die zulässigen Stahlspannungen als auch die zulässigen Verfor-mungen von 0,3 mm nicht überschritten werden. Im Elastomer wurde dabei eine parabolisch verteilte Pressung zugrunde gelegt. Eine Erhöhung der zulässigen mittleren Elastomerpressung um 50 % blieb unberücksichtigt, da - wie in den Zulassungen festgelegt - die Elastomerdicke der verwendeten Lager größer ist als der $1/6,67$ -fache Elastomerlagerdurchmesser. Die Be-messung der Gleitplatten erübrigte sich, weil diese in den Versuchen am biegesteifen Gleitschieber anliegen und deshalb praktisch verformungsfrei bleiben.

Um einen guten Sitz der PTFE-Scheiben in den scharfkantig ausgebildeten Fassungen der PTFE-Aufnahmen zu erhalten, wurden die Ronden zunächst in gekühltem Zustand eingebaut. Die Gleitflächen der wiedererwärmten Lager-scheiben und der austenitischen Stahlbleche wurden unmittelbar vor Ver-suchsbeginn gründlich mit einem fettfreien Lösungsmittel gereinigt, an-schließend die Schmiertaschen mit Schmierstoff gefüllt und die Oberflä-chen von PTFE und austenitischem Stahl mit einem dünnen Fettfilm versehen.

Beim Einbau der Lager in den Prüfstand wurden die PTFE-Ronden in allen Versuchen in Gleitrichtung derart angeordnet, daß benachbarte Schmierta-schenreihen gegeneinander auf Lücke versetzt waren (vgl. Anlage 8). Beim Gleitvorgang blieben so je nach Größe des Verschiebeweges keine oder nur geringe Zonen ohne Nachschmierung mit dem in den Schmiertaschen befindli-chen Siliconfett.

Die PTFE-Ronden und Gleitbleche wurden für jeden Versuch ausgewechselt und durch neue Teile ersetzt. Bei den Versuchen mit Verformungsgleitla-gern wurden die zuvor in Schubversuchen geprüften Elastomerlager mehrmals wiederverwendet.

5 Untersuchungen an Gleitlagern

5.1 Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern (Versuchsreihe A1)

5.1.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Die einzelnen Versuchsbedingungen sind in der Tabelle von Anlage 9 zusammengefaßt. Es wurden Gleitlager mit PTFE-Durchmessern von 75, 150, 250 und 450 mm bei mittleren Pressungen von 15, 30 und 45 N/mm² und Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4, 50, 150 und 2000 mm/s geprüft.

Alle Gleitlager wurden vor Beginn der ersten Gleitbewegung eine Stunde lang mit konstanter Vertikallast zentrisch vorbelastet. Danach wurde mit dem Gleiten entsprechend der Bewegungsart - hin- und hergehende Bewegung - begonnen.

Je untersuchtem Parameter wurden drei gleichartige Versuche durchgeführt, wobei der Gesamtgleitweg in zwei Versuchen jeweils ca. 30 m und in einem Versuch rund 100 m betrug. Bei $v = 2000$ mm/s erfolgten die Versuche lediglich über einen Gesamtgleitweg von 30 m.

Der Verschiebeweg pro Doppelhub war je nach Größe der PTFE-Scheiben unterschiedlich. Lediglich bei den Versuchen mit Verschiebegeschwindigkeiten von 2000 mm/s mußte er für alle Lagerdurchmesser gleich groß gewählt werden, da - wie Vorversuche zeigten - zum Erreichen derartiger Geschwindigkeiten ein entsprechend großer Gleitweg wegen der zu beschleunigenden Massen erforderlich ist.

Weil die Zuschaltung eines Leerlaufspiels nur bei kleinen Gleitgeschwindigkeiten sinnvoll und möglich ist, wurden alle Versuche auch wegen der programmgesteuerten Regelung und der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse ohne Leerlaufspiel durchgeführt.

Bei den Versuchen mit Verschiebegeschwindigkeiten bis 150 mm/s wurde eine lineare Weg-Zeit-Funktion vorgegeben und aus der Mittelstellung des Gleitschiebers angefahren.

Bei Gleitgeschwindigkeiten von 2000 mm/s verlief diese Funktion trapezförmig, da nach jedem Hub zum Aufbau eines ausreichend großen Öldrucks in den Druckkammern eine etwa 5 Sekunden dauernde Wartezeit ohne Horizontalbewegung des Gleitschiebers erforderlich war. Diese Hochgeschwindigkeitsversuche mußten aus der Randlage angefahren werden. Daher wurde der Gleitschieber vor Aufbringen der Vertikallast aus der Mittelstellung verschoben, danach das Lager zentrisch belastet und nach der einstündigen Vorbelastungszeit mit dem Gleitversuch begonnen. Diese Vorgehensweise beeinflusst die Reibungszahlen praktisch nicht, wie nachträglich auf Wunsch eines Betreuers durchgeführte Zusatzversuche zeigten.

Bei jedem Versuch wurden folgende Größen gemessen:

- Verschiebewiderstand F_H und Verschiebeweg des Gleitschiebers s
(Der zeitliche Verlauf von $F_H(t)$ und $s(t)$ wurde mit Schreibern kontinuierlich aufgezeichnet; bei Hochgeschwindigkeitsversuchen mit $v = 2000$ mm/s wurden die Meßdaten zusätzlich mit einer rechnergesteuerten Meßanlage in digitaler Form registriert)
- Oberflächentemperatur der Gleitplatte an der zugänglichen Schmalseite vor (T_A) und nach (T_E) dem Gleiten mit einem Temperaturfühler
- Dicken und Gewicht der ungefetteten PTFE-Scheiben vor und nach dem Versuch mit Mikrometer bzw. Waage
(Zur Ausschaltung des Temperatureinflusses wurden die Dickenmessungen in einem Klimaraum bei + 21 °C vorgenommen)
- Überstand der PTFE-Ronde aus der Stahlunterlage am Scheibenrand vor und nach dem Versuch in unbelastetem Zustand mit einer Schieblehre

- PTFE-Zusammendrückung bei zentrischer Vertikalbelastung von einer Vorlast (meist $0,1 F_v$) bis zur Endlast F_v , nach der einstündigen Vorbelastungszeit und nach dem Gleiten sowie bei Entlastung auf die Vorlast (Hierzu wurde die Abstandsänderung zwischen Gleitschieber und Drucktisch des Prüfstandes mit Meßuhren (0,001 mm) gemessen. Die Zusammendrückungen der zusätzlich dazwischen befindlichen Stahlteile werden vernachlässigt)

Nach jedem Versuch wurden die Gleitflächen der PTFE-Ronde und des austenitischen Stahlblechs fotografiert und augenscheinlich beurteilt.

5.1.2 Versuchsergebnisse der Kurzzeitversuche an geschmierten Gleitlagern (Versuchsreihe A1)

Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und Größe der Reibungszahlen

Einige typische zeitliche Verläufe der Verschiebewiderstände $F_H(t)$ und der Verschiebewege $s(t)$ sind in den Anlagen 10 bis 12 wiedergegeben.

In den Anlagen 13 bis 31 sind die aus den gemessenen Verschiebewiderständen F_H und den aufgetragenen Vertikallasten F_V nach der Beziehung $\mu = F_H / F_V$ ermittelten Reibungszahlen für alle Versuche tabellarisch und graphisch in Abhängigkeit vom Gleitweg S dargestellt.

Die größten Reibungszahlen traten bei allen Versuchen zu Beginn der ersten Relativbewegung auf. Diese Anfahrreibung, auch statische Reibungs- bzw. Haftreibungszahl μ_{A1} genannt, äußert sich im zeitlichen Verlauf des Verschiebewiderstandes durch eine ausgeprägte Kraftspitze, die beim Übergang vom Haften zum Gleiten entsteht. In der anschließenden Gleitphase mit einer gleichförmigen Bewegung des Gleitschiebers nimmt der Reibungswiderstand mit zunehmendem Gleitweg rasch ab.

Bei Bewegungsumkehr stellten sich in den nachfolgenden Hieben bei den Versuchen mit $v = 0,4$ mm/s ebenfalls entsprechende Kraftspitzen ein, die jedoch immer wesentlich kleiner blieben als die Anfahrreibung. Während des anschließenden Gleitens durchläuft die Reibungszahl μ_G ein Minimum und steigt danach wieder etwas an. Dabei erreicht sie jedoch die bei der Bewegungsumkehr vorhandene Größe nicht mehr (Anlage 10).

Die Versuche mit $v = 50$ und 150 mm/s zeigten in den Hieben nach dem Anfahren einen etwas anderen zeitlichen Verlauf der Verschiebewiderstände (Anlage 11). Es fehlten dort die bei den Versuchen mit niedriger Verschiebegeschwindigkeit beobachteten, ausgeprägten Haftreibungsspitzen größtenteils. Bei einigen Versuchen waren diese zwar andeutungsweise vorhanden, sie lagen dann aber in der Größenordnung der beim Gleiten erreichten Reibungszahlen. Der beschriebene zeitliche Kraftverlauf wird darauf zurückgeführt, daß bei der verwendeten Prüftechnik ohne Leerlaufspiel die Verschiebeweg-Zeit-Funktion infolge der Massenkräfte bei Bewegungsumkehr etwas ausgerundet wurde. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte nur für die maßgeblichen Maximalwerte.

Ein ähnliches Reibungsverhalten zeigten auch die mit $v = 2000$ mm/s durchgeführten Versuche, bei denen die größten Verschiebewiderstände ebenfalls beim Anfahren im ersten Hub, bei den nachfolgenden Hübten, zwischen denen jeweils eine 5 Sekunden dauernde Wartezeit ohne Bewegung eingefügt war, jedoch während des Gleitens mit niedrigerem Kraftniveau erreicht wurden (Anlage 12). Der etwas unregelmäßige zeitliche Reibungskraftverlauf ist nicht auf Stick-Slip-Effekte zurückzuführen, sondern darauf, daß sich bei diesen Hochgeschwindigkeitsversuchen hochfrequente Schwingungen des Prüf- und Meßsystems bemerkbar machten. Nach dem ersten Hub ist bei Bewegungswiederbeginn jeweils eine erste, kleine Kraftspitze erkennbar, die als Haftreibung anzusehen ist, und bis zu etwa 25 % unter den beim Verschieben auftretenden und ausgewerteten Maximalwerten liegt. Dies ist dadurch erklärbar, daß die Verschiebegeschwindigkeit des Gleitschiebers infolge der Trägheit des Systems erst allmählich aufgebaut werden kann und daher ihren Maximalwert erst etwa 0,04 Sekunden nach Bewegungsbeginn während des Verschiebens erreicht. Bei der maximalen Verschiebegeschwindigkeit sind dann auch die Verschiebewiderstände und damit die Reibungszahlen am größten. Diese nehmen beim anschließenden Abbremsen des Gleitschiebers stark ab.

Aus der Gleitwegcharakteristik, d.h. der Abhängigkeit der Reibungszahlen vom Gleitweg (vgl. Anlagen 13 bis 31) ist abzulesen, daß die Reibungszahlen nach der teils stark streuenden Anfahrreibung vorübergehend auf ein Minimum abfallen und danach mit zunehmendem Gleitweg i.a. wieder allmählich ansteigen. In einigen Versuchen wird nach etwa 10 bis 20 m Gleitweg ein fast konstantes Reibungsniveau erreicht.

Temperaturentwicklung beim Gleiten

Bei den Versuchen mit höheren Verschiebegeschwindigkeiten stieg die mit einem Fühler gemessene Oberflächentemperatur an der Schmalseite der Gleitplatte während des Gleitens deutlich an, wie aus den in den Tabellen angegebenen Temperaturen zu Versuchsbeginn (T_A) und am Versuchsende (T_E) ersichtlich ist. Die Erwärmung war entsprechend der aufgebrauchten Reibarbeit um so höher, je länger der Gleitweg und je größer die Auflast bzw. spezifische Pressung war. Nach 100 m Gleitweg wurden Temperaturzunahmen bis zu etwa 13 °C festgestellt. Die örtlichen Temperaturen in der Gleitfläche lagen sicherlich noch höher. Die ermittelten Reibungszahlen gegen Versuchsende dürften daher bei größeren Verschiebegeschwindigkeiten etwas von der Temperatur beeinflusst sein.

Verformungsmessungen

Die im unbelasteten Zustand mit einer Schieblehre gemessenen PTFE-Überstände aus der Stahlunterlage lagen vor den Versuchen zwischen 2,1 und 2,2 mm, nach den Versuchen bei 1,9 bis 2,05 mm. Die Änderung der Überstände war von der Größe der Pressung und vom zurückgelegten Gleitweg abhängig. Bei 30 m Gesamtgleitweg betrug die Überstandsänderung bei einer mittleren Pressung von $p = 15 \text{ N/mm}^2$ im Mittel rund 0,1 mm, bei $p = 30 \text{ N/mm}^2$ rund 0,15 mm und bei $p = 45 \text{ N/mm}^2$ rund 0,20 mm. Für die Versuche mit 100 m Gleitweg ergaben sich geringfügig höhere Werte.

Die Messungen der Abstandsänderungen zwischen Gleitschieber und Drucktisch, die bei Vernachlässigung der Verformungen der dazwischenliegenden, stählernen Auffütterungen als PTFE-Zusammendrückungen angesehen werden können, erbrachte folgende Ergebnisse:

- Aus den pressungsabhängigen Zusammendrückungen bei Belastung von einer Vorlast (in der Regel $0,1 F_V$) bis zur Endlast F_V sowie beim Entlasten auf die gleiche Vorlast nach Versuchsende wurden mit den tatsächlich vorhandenen PTFE-Dicken folgende mittlere "Elastizitätsmoduln" für Druckbeanspruchung von gekammertem, gefettetem PTFE ermittelt:

	mittlere PTFE-Pressung			Dim. N/mm ²
	15	30	45	
E bei Belastung	375	662	696	N/mm ²
E bei Entlastung	554	820	908	N/mm ²

Diese Mittelwerte sind als Anhaltswerte für den Sekantenmodul zu verstehen und schwankten in den Versuchen bis zu etwa 20 %. Sie gelten wegen des bekannten Kriechverhaltens von PTFE nur bei zügiger Lastaufbringung und werden sicherlich auch durch das Auspressen von überschüssigem Fett beim Belasten und der Höhe der Vorlast beeinflusst. Mit den angegebenen Größen können jedoch überschläglich PTFE-Zusammendrückungen bei Kurzzeitbelastung berechnet werden.

- Während den einstündigen Vorbelastungszeiten unter konstanter Maximallast F_v vergrößerten sich die Zusammendrückungen um etwa 0,01 bis 0,025 mm, im Gesamtmittel um 0,017 mm, also rund 0,02 mm. Pressungsabhängige Tendenzen waren hierbei nicht eindeutig feststellbar. Lediglich bei Lagern mit \varnothing 75 mm und Pressungen von 30 und 45 N/mm² lagen diese Werte bei etwa 0,04 mm.
- Die unter konstanter Auflast vorhandene, weitere Verformungszunahme während der Gleitversuche ergaben sich zu 0,02 bis 0,06 mm, im Mittel zu 0,04 mm. Auch hier konnten wegen der Streuungen keine relevanten Abhängigkeiten vom Gleitweg, von der Pressung und der Verschiebegeschwindigkeit festgestellt werden.
Wegen der geringen Gesamtgleitwege von 30 bzw. 100 m und wegen des nahezu unbeschädigten Aussehens der PTFE-Gleitflächen nach den Versuchen ist anzunehmen, daß diese beim Gleiten stattfindenden Verformungszunahmen weniger auf Verschleiß sondern mehr auf plastischen Zusatzverformungen beruhen. Bei höheren Verschiebegeschwindigkeiten spielte auch die beim Gleiten stattfindende Temperaturzunahme eine Rolle.
- Die bei der Vorlast vor und nach den Versuchen gemessenen, bleibenden Restverformungen wurden zu rd. 0,08 bis 0,18 mm, im Mittel aller Versuche zu etwa 0,12 mm ermittelt.
- Aus den Verformungsmessungen und mit den mittleren Sekantenmoduln kann überschläglich auf das Spaltmaß, d.h. den lichten Abstand zwischen Gleitblech und PTFE-Aufnahme geschlossen werden. Beispielsweise ergeben sich mit den obigen Werten Gleitspaltänderungen unter aufgebrachtener Maximallast und bis zum Ende des Gleitens von 0,25 bis 0,35 mm je nach Pressungsgröße, wobei der größte Verformungsanteil aus der Belastung mit F_v resultiert. Ausgehend vom Überstand des PTFE im unbelasteten Zustand kann daher annähernd ein mittleres Spaltmaß unter Last von 1,8 bis 1,9 mm angegeben werden.
- Unter Berücksichtigung der PTFE-Rückverformungen beim Entlasten können aus den Verformungsmessungen die zuvor angegebenen Überstandsänderungen des PTFE im unbelasteten Zustand kontrolliert werden. Sie ergeben sich daraus pressungsabhängig zu etwa 0,10 bis 0,15 mm und sind damit von derselben Größenordnung wie die mit einer Schieblehre am Schreibe- rand gemessenen Werte.

Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen, Verschleiß

Der Zustand einiger repräsentativer Gleitflächen nach 30 m bzw. 100 m Gesamtgleitweg geht aus den Bildern in den Anlagen 32 bis 44 hervor.

Bei allen untersuchten Lagern bildete sich unter der Belastung am Außenrand der PTFE-Scheiben ein über den Umfang etwa gleichmäßig verteilter, kleiner, ringförmiger Wulst (Bilder 3 und 4, Anlage 32) infolge Herausdrückens von PTFE durch den Spalt. Dadurch vergrößerte sich der Außendurchmesser der PTFE-Ronden im nicht gekammerten, aus der Stahlfassung überstehenden Bereich geringfügig. Bei hoher Pressung und längerer Versuchsdauer war diese Wulstbildung etwas ausgeprägter. Durch die scharfkantig ausgebildete Kammerung wurde jedoch ein nachteiliges Ausfließen von PTFE wirksam behindert.

Schmiertaschen mit Abständen vom Scheibenrand von wenigen Millimetern und direkt am Rand liegende, angeschnittene Taschen weisen nach den Versuchen, abhängig von Pressungsgröße und Versuchsdauer, sichtbar kleinere Abmessungen auf als im mittleren Bereich der PTFE-Ronden. Sowohl die Außendurchmesser als auch die Taschentiefen haben sich verkleinert. Insbesondere bei den angeschnittenen Schmiertaschen tritt dies in Erscheinung, da dort durch den fehlenden Druck auf den Schmierstoff PTFE-Material unbehindert in die Taschen hinein nachfließen kann. An einigen Rondenrückseiten wurden sogar kleinere Vertiefungen infolge dieses Nachfließens beobachtet.

Die PTFE-Gleitflächen zeigen nach den Versuchen ein mattglänzendes Aussehen mit helleren, streifenartigen Gleitspuren in Verschieberichtung, die nur in spiegelndem Licht sichtbar sind. Bei den Versuchen mit kleinen Verschiebegeschwindigkeiten treten örtlich feinste, kaum erkennbare Verschleiß-Kratz-Spuren im PTFE auf. Bei Versuchen mit höherer Gleitgeschwindigkeit sind diese deutlicher zu erkennen und schon mehr rillenartig, als kleine Vertiefungen im PTFE ausgebildet. Solche Verschleißspuren sind entlang ausgezeichneter Linien vorhanden, nämlich dort, wo sich die Laufspuren benachbarter, in Gleitrichtung auf Lücke sitzender Schmiertaschen gerade noch etwas berühren. Sie sind bei größeren Lagerdurchmessern als \emptyset 75 mm nur im äußeren Randbereich der PTFE-Scheiben zu erkennen und treten bei Gesamtgleitwegen von 100 m stärker hervor als bei 30 m Gleitweg.

Um über die Größe des Verschleißes quantitativ etwas aussagen zu können, war bei der Versuchsplanung vorgesehen, die Dicken und Gewichte aller PTFE-Scheiben dieser Versuchsreihe im entfetteten Zustand nach den Versuchen nochmals zu messen. Da die PTFE-Ronden jedoch wohl wegen der kleinen Gleitwege nur örtlich geringen Verschleiß zeigten, wurden zunächst lediglich einige PTFE-Scheiben, deren Verschleiß offensichtlich war, und die in den Versuchen einer hohen Pressung und Verschiebegeschwindigkeit unterworfen waren, nach den Versuchen gewogen und vermessen. Dabei wurden Gewichtsverluste von weniger als 1⁰/100 des Ursprungsgewichts festgestellt, was teilweise noch in der Größenordnung der Meßgenauigkeit der verwendeten Waagen lag. Auf weitere Gewichtsmessungen wurde daher verzichtet. Die Dickenmessungen ergaben ähnliche Werte wie bei den Verformungsmessungen. Aus den vor und nach einem Gleitversuch bestimmten Dickenänderungen sind sowieso keine eindeutigen Angaben über den Verschleiß zu erhalten, da in solche Messungen auch die plastischen Verformungen und möglicherweise Rückkriecheffekte nach dem Entlasten miteingehen. Daher wurden bei dieser Versuchsreihe auch keine weiteren Dickenmessungen mehr vorgenommen.

Fast alle Gleitflächen des austenitischen Stahlblechs zeigen nach den Versuchen feine, nur bei Lichtspiegelung erkennbare, hell hervortretende Kratzspuren (vgl. z.B. Bilder 10 und 11 in Anlagen 35 und 36), die bei hoher Flächenpressung ausgeprägter sind. Sie sind möglicherweise dadurch entstanden, daß sowohl beim Walzen der Bleche als auch bei der mechanischen Nachbehandlung der Gleitflächen durch Schleifen bzw. Polieren mikroskopisch kleine Partikel in die zwar glatt aussehende, in Wirklichkeit jedoch noch "rauhe", in Berge und Täler von wenigen Mikrometern Höhenunterschied gegliederte Blechoberfläche eingelagert werden [11]. Diese Kleinstteile werden bei der Gleitbewegung aus der Grenzschicht herausgelöst und lagern sich vor allem im Siliconfett in den Schmiertaschen ab. Beim Hin- und Herbewegen erfolgt ein Nachspeisen der Kontaktflächen mit derart angereichertem Fett, so daß sowohl lose in der Gleitfläche befindliche als auch im PTFE eingebettete Partikel Kratzer auf dem Gleitblech durch ritzende Beanspruchung verursachen. Warum sich diese Kratzspuren häufiger und bevorzugt in Laufbereich der Schmiertaschenränder ausbilden, also auch an den im PTFE beobachteten Verschleißstellen, könnte dadurch erklärt werden, daß dort bei der Bewegung verstärkt Partikel sich ansammeln und abgegeben werden und wegen schlechterer Schmierung ein stärkerer Verschleiß stattfindet.

Durch das Walken des in den Schmiertaschen befindlichen Schmierstoffs bei der Gleitbewegung mischen sich die herausgelösten Partikel immer mehr mit dem Fett, das sich dabei von ursprünglich weißer Farbe zu hellgrauer bis dunkelgrauer Farbe verfärbt. Der Verfärbungsgrad hängt dabei von der Menge der herausgelösten Partikel ab, die, wie aus den vorliegenden Versuchen hervorgeht, mit längerem Gleitweg und größerer Flächenpressung zunimmt.

Betrachtet man die Gleitflächen der austenitischen Stahlbleche nach dem Versuch, so können bezüglich der Fettverteilung verschiedene Bereiche unterschieden werden:

Zunächst hebt sich die Endlage der PTFE-Scheiben durch entsprechende Fettablagerungen insbesondere aus den Schmiertaschen deutlich hervor, weil beim Abheben der Gleitplatte von der PTFE-Scheibe nach dem Gleitversuch immer etwas Fett an der Blechoberfläche hängen bleibt. In der inneren Zone dieses Scheibenabdruckes zeigt sich bei Lagerdurchmessern von 250 und 450 mm ein deutlicher "Fetthof", in dem sich auch zwischen den Schmiertaschen Fett befindet. Er fehlt bei den kleinen Lagerdurchmessern. Seine Größe nimmt mit zunehmender Flächenpressung und wachsendem Gleitweg ab. Auf den PTFE-Gleitflächen ist er nur in spiegelndem Licht oder nach Eingilbung des Fettes bei längerer Lagerung am Tageslicht zu erkennen (vgl. z.B. Bilder 18 und 19, Anlage 40).

Die benachbarten sichelförmigen Bereiche neben der Scheibenendlage zeigen den ungestörten Zustand eines Teils der beim Gleiten überstrichenen Fläche, auf der bei fast blankem Aussehen ein dünner, streifenförmiger Fettfilm bei Lichtspiegelung sichtbar ist (vgl. z.B. Bilder 7, 9 bis 11, 31). Bei den Versuchen mit hohen Verschiebegeschwindigkeiten von 150 und 2000 mm/s sind auch Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag, die mehr am Gleitflächenrand liegen zu erkennen (vgl. Bilder 12, 16, 20, 22 bis 31). Diese haben sich wie die Verschleißspuren im PTFE und die Kratzer auf dem Gleitblech meist im Laufbereich der Schmiertaschenränder gebildet, und zwar an solchen, schlechter nachgeschmierten Stellen, wo sich am Scheibenrand angeschnittene Schmiertaschen befinden, oder wo in Gleitrichtung die Schmiertaschen vom Scheibenrand weiter entfernt sind.

Beurteilung und Folgerungen

Die oben beschriebenen Erscheinungen können wie folgt gedeutet und erklärt werden:

Sowohl beim Aufsetzen der Gleitplatte auf die PTFE-Scheibe als auch beim Aufbringen der Vertikallast wird zunächst überschüssiges Fett aus dem Gleitspalt herausgedrückt, womit bei größeren Lagerdurchmessern ein mehr oder weniger gut hörbares Geräusch verbunden ist. Bei entsprechender Belastung berühren sich PTFE und austenitisches Stahlblech infolge ihrer mikroskopisch rauhen, amorphen Oberflächenstruktur nur an wenigen Kontaktstellen direkt. Die dazwischen liegenden, untereinander in Verbindung stehenden, feinen Hohlräume werden durch den Druck völlig mit Fett ausgefüllt, sofern dies nicht bereits beim Auftragen von Schmiermittel vor dem Versuch geschehen ist. Bei weiterer Belastungszunahme wird besonders das weichere PTFE an den Kontaktstellen elastisch und plastisch zusammengedrückt. Da durch die engen, kapillaren und fein verästelten Zwischenräume nur wenig zusätzliches Fett an den Flächenrand verdrängt werden kann, baut sich im Fett in diesen Zwischenräumen und selbstverständlich auch im Fett in den Schmiertaschen ein entsprechender Druck auf, so daß die aufgebrachte Last zunächst größtenteils vom Fett übertragen wird. Durch den Druck verkleinern sich auch die Schmiertaschentiefen etwas, wodurch zusätzliches Fett aus den Taschen in den Schmierspalt eingepreßt wird.

Die Fettverteilung im Gleitspalt nach Aufbringen der Last hängt offensichtlich von der Pressungsverteilung ab. Um dafür einen qualitativen Einblick zu erhalten, wurden mit Druckfolien Druckbilder von einem ungeschmierten und einem geschmierten Lager mit 250 mm PTFE-Durchmesser angefertigt (vgl. Anlagen 46 und 47). Aus dem Grad der Verfärbung der Druckfolie kann auf die Größe der Pressung geschlossen werden, wobei mit zunehmendem Druck eine dunklere Verfärbung eintritt.

Bei beiden Druckbildern ist im Scheibeninnern ein hellerer Bereich, also mit dort wirkender niedrigerer Pressung zu erkennen als in der diesen konzentrisch umgebenden Randzone. Beim geschmierten Lager sind die einzelnen Schmiertaschen im Scheibeninnern kaum oder nicht mehr sichtbar. Es herrscht demnach in den Taschen und den sie umgebenden Bereichen ein ört-

lich praktisch gleich großer Druck, was die zuvor geschilderte Wirkungsweise der Schmierung bestätigt. Die Fettverteilung auf dem Gleitblech und der PTFE-Scheibe entspricht in etwa der Pressungsverteilung. Durch den größeren Druck wird es in der Randzone mehr direkte Kontaktstellen zwischen Gleitblech und PTFE geben, wodurch das Herausdrücken von weiterem Fett aus dem Innenbereich behindert wird. Die Randzone wirkt daher zumindest kurzzeitig ähnlich wie ein Dichtungsring. Somit läßt sich auch das Entstehen des weiter oben beschriebenen "Fetthofs" mit eingelagertem Fettpolster zwischen den Schmiertaschen erklären.

Neben der Pressungsverteilung ist bekanntlich auch die Vorbelastungszeit von Einfluß. Mit zunehmender Einwirkungsdauer der Normalkraft werden geringe Mengen Fett langsam nach außen abgegeben. An den Kontaktstellen verformt sich das PTFE zusätzlich plastisch infolge seiner starken Kriechneigung. Das in den feinen Zwischenräumen vorhandene Fettpolster wird somit allmählich kleiner, wobei sich die Anzahl der Kontaktstellen und damit die Kontaktfläche mit der Zeit vergrößern wird. Die bekannte Vergrößerung der Reibungszahlen bei zunehmender Vorbelastungszeit kann teilweise darauf zurückgeführt werden. Dabei spielt jedoch auch die Größe der PTFE-Scheibe eine Rolle. Je größer nämlich die PTFE-Scheibe ist, desto längere Vorbelastungszeiten sind erforderlich, um Fett auch aus dem Innenbereich herauszudrücken. Vermutlich aus diesem Grund und möglicherweise auch infolge einer anderen Pressungsverteilung wurde bei den kleinen Lagerscheiben kein ausgeprägter Fetthof im Scheibeninnern mehr festgestellt. Bei kleineren Scheibendurchmessern ist demnach die Gleitfläche bei gleicher Vorbelastungszeit von Gleitbeginn an etwas schlechter geschmiert, so daß sich dann, wie in den Versuchen beobachtet, höhere Reibungszahlen ergeben als bei größeren Lagerdurchmessern.

Bei den ersten Gleitbewegungen lagert sich das beim Belasten und während der Vorbelastungszeit aus dem Gleitspalt abgegebene Fett zusammen mit dem überschüssigen Schmierstoff auf dem Gleitblech größtenteils am Gleitflächenrand des Stahlblechs ab (vgl. Bilder). Bei jeder nachfolgenden Gleitbewegung werden dann vom Gleitblech geringe Mengen Fett aus der belasteten Fläche mitgenommen. Außerhalb dieser Fläche wird das Fett wegen des fehlenden Gegendrucks entspannt. Bei der gegenläufigen Rückbewegung wird es deshalb teilweise am PTFE-Scheibenrand abgestreift und bei Bewegungs-

umkehr am Gleitflächenrand des Blechs abgelagert, was sich auch an der leichten Graufärbung eines Teils des dort befindlichen Fettes zeigt. Dieses verbrauchte, zur Schmierung der belasteten Gleitfläche nicht mehr zur Verfügung stehende Fett stammt bei den größeren Lagerdurchmessern mit Fetthof im Scheibeninnern zunächst vor allem aus der Randzone der PTFE-Scheibe. Mit zunehmender Anzahl der Hin- und Herbewegungen wird jedoch auch Fett aus dem Innenbereich nach außen transportiert und aus dem Gleitspalt herausgedrückt, so daß sich der Fetthof allmählich verkleinert. Der damit verbundene Fettverbrauch dürfte vom zurückgelegten Verschiebeweg je Hub abhängig sein.

Bei der Gleitbewegung überstreichen die Rauigkeitsspitzen des härteren Gleitblechs die weichere PTFE-Oberfläche. An den direkten Kontaktstellen finden dabei infolge der überlagerten, alternierenden Tangentialbeanspruchung zusätzliche elastische und plastische Verformungen insbesondere im PTFE statt, was mit einem mehr oder weniger starken Materialabrieb verbunden ist. Die Rauigkeitsspitzen im PTFE werden dadurch in Laufrichtung geglättet, so daß sich die PTFE-Oberfläche zunehmend an das Oberflächenprofil des Gleitblechs anpaßt. Damit einhergehend und durch den ständigen Fettverbrauch beim Verschieben nimmt die Schmierfilmdicke im Gleitspalt weiter ab und die Größe der Kontaktfläche zu. Die aufgebrachte Last wird dadurch mehr und mehr direkt vom Gleitblech auf die PTFE-Scheibe übertragen, die Reibungszahlen und der Verschleiß steigen daher allmählich an. Entsprechend der bei den größeren Lagerdurchmessern beobachteten Pressungs- und Schmiermittelverteilung zu Gleitbeginn und durch den größeren Fettverbrauch am Gleitflächenrand werden diese Vorgänge, wie auch in den Versuchen feststellbar war, in der Randzone eher beginnen als im besser geschmierten Innenbereich. Die Reibungskräfte sind auch über die Gesamtgleitfläche wegen der unterschiedlichen Pressungsverteilung örtlich verschieden groß. Durch das Kriechen von PTFE werden jedoch Spannungsumlagerungen stattfinden, so daß die Pressungsverteilung mit der Zeit gleichmäßiger wird.

Aus den Schmiertaschen wird bei jeder Gleitbewegung Fett entnommen und in den Gleitspalt eingespeist. In der Literatur wird davon ausgegangen, daß sich der Druck im Fett infolge der Kriechneigung von PTFE über längere Zeit aufrecht erhält und somit ein wiederholtes Einpressen von Schmiermittel in den Gleitspalt erfolgt. Die Schmierung bleibt daher über größere Gleitwege wirksam.

Vorstellbar ist aber auch, daß der Druck in den Schmiertaschen infolge der zwar geringen, jedoch ständigen Fettentnahme nach längeren Gleitwegen allmählich nachläßt. Es könnte dann nicht nur die Größe der direkten Kontaktfläche zwischen PTFE und Gleitblech, sondern auch die dort herrschende Pressung zunehmen, was weitere Zusammendrückungen des PTFE zur Folge hätte. Zusammen mit der Kriechwirkung würde dadurch ein weiteres Einspeisen von Fett in den Schmierspalt bewirkt. Infolge des nachlassenden Fettdruckes würden sich die Schmiertaschen durch plastisches Nachfließen von PTFE-Material langsam verkleinern. Nach entsprechend großem Fettverbrauch könnten sich auch an den Schmiertaschenrändern infolge der aussteifenden Wirkung der Kanten ein örtlich größerer Druck ausbilden, so daß sich dort eher ein direkter Kontakt zwischen Gleitblech und PTFE einstellen wird. Durch die stärkere Randbeanspruchung würde der Verschleiß besonders im schlechter nachgeschmierten Bereich seitlich der Schmiertaschen stattfinden, die Kanten würden sich mit der Zeit abrunden. Durch den größeren Kantendruck könnte sich gleichzeitig eine Art Abdichtungswirkung ergeben. Ob diese Vorstellungen zutreffen, konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht geklärt werden, weil hierzu beispielsweise der Fettdruck in den Schmiertaschen hätte gemessen werden müssen, und weitergehende umfangreiche Untersuchungen erforderlich gewesen wären.

Bei der Hin- und Herbewegung werden vorwiegend nur die in Gleitrichtung liegenden, streifenförmigen Bereiche neben den Schmiertaschen nachgeschmiert. Um eine gute Schmierwirkung zu erzielen, sollten daher die Schmiertaschen so zur Gleitrichtung angeordnet sein, daß ein möglichst großer Teil der gesamten Gleitfläche nachgeschmiert wird (z.B. wie in Anlage 8). Andernfalls wird der Verschleiß in den schlechter nachgeschmierten Bereichen früher beginnen und entsprechend größer sein, wie beispielsweise bei Vorversuchen feststellbar war. Beim Einbau von Gleitlagern sollte daher unbedingt auf eine solche zweckmäßige Anordnung der Schmiertaschen geachtet werden. Allerdings tritt auch bei einer derartigen Wahl der Schmiertaschenlage, bedingt durch den vorgegebenen Abstand der eingepprägten Vertiefungen, keine vollständige Überdeckung der Nachschmierbereiche mehr auf, wenn die Verschiebewege kleiner sind als etwa $\pm 9,5$ mm. Es verbleiben dann Restbereiche zwischen den einzelnen Schmiertaschen, die schlechter nachgeschmiert werden, so daß der Verschleiß dort eher beginnen wird. Damit ist gezeigt, daß der Verschleiß

von PTFE nicht nur vom zurückgelegten Gesamtgleitweg, sondern auch von der Schmiertaschenanordnung, dem Verschiebeweg je Hub und dem davon abhängigen Fettverbrauch beeinflußt wird.

In den bisherigen Ausführungen wurde allgemein von Fett im Zusammenhang mit Fettverbrauch, Einspeisen von Fett etc. gesprochen. Dieser Begriff ist jedoch zu relativieren.

Aus der Literatur ist bekannt, daß das im wesentlichen aus Lithiumseife als Konsistenzgeber und aus Siliconöl bestehende Fett sowohl bei statischer Belastung als auch bei Gleitversuchen vor allem Siliconöl abgibt. Nach Programmversuchen über sehr lange Gleitwege konnte kein Öl mehr im Fett der Schmiertaschen nachgewiesen werden [11]; außerdem wurde dort bei Orientierungsversuchen festgestellt, daß bei alleiniger Verwendung von Seife als Schmiermittel, das Reibungsniveau gegenüber ungeschmiertem PTFE deutlich herabgesetzt wird, d.h. auch Lithiumseife allein schmierwirksame Eigenschaften besitzt.

Bei den vorliegenden Versuchen wurden derartige Untersuchungen nicht angestellt. Jedoch wurde insbesondere bei den Versuchen mit höheren Verschiebegeschwindigkeiten außer der bereits erwähnten farblichen Änderung des Fettes auch eine Änderung der Konsistenz beobachtet. Auf den Gleitblechen waren nach den Versuchen auch feinste Tröpfchen und Streifen in Gleitrichtung erkennbar, die bei entsprechendem Lichteinfall in den Spektralfarben schimmerten. Das Fett aus einigen Schmiertaschen konnte bei den Versuchen mit hohem $p \cdot v$ -Wert teils wie ein Kuchen aus einer runden Backform entnommen werden, teilweise blieb es auch am Gleitblech hängen. Die Rückseiten dieser Fettkuchen zeigten ein glänzendes Aussehen. Diese Erscheinungen weisen ebenfalls auf ein Abscheiden von Öl hin.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die in dieser Versuchsreihe untersuchten Gleitlager wegen der kurzen Gleitwege nur geringen, praktisch noch nicht meßbaren, beginnenden Verschleiß zeigten. Dieser machte sich vor allem bei den Versuchen mit hoher Verschiebegeschwindigkeit stärker bemerkbar.

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen aus den Versuchsergebnissen
der Versuchsreihe A1 hinsichtlich der Geschwindigkeitsabhängigkeit
der Reibungszahlen

In den Tabellen und Diagrammen der Anlagen 48 bis 51 sind die Versuchsergebnisse als Mittelwerte aus jeweils 3 Einzelversuchen für die Anfahrreibung μ_{A1} und die nach 30 m Gleitweg erreichten Werte zusammengefaßt. Daraus und aus den vorangehenden Ausführungen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Die bekannte Abnahme der Reibungszahl bei zunehmender Pressung wird auch für höhere Verschiebegeschwindigkeiten weitgehend bestätigt. In Einzelfällen ist indes die erwartete Abhängigkeit nicht erkennbar, was mit den trotz gleicher Versuchsbedingungen teils stark streuenden Ergebnissen der Einzelversuche insbesondere der μ_{A1} -Werte erklärt werden kann.
- Mit zunehmendem Lagerdurchmesser zeigen die Reibungszahlen bei gleicher Verschiebegeschwindigkeit und Pressung i.a. fallende Tendenz. Es besteht die begründete Vermutung, daß dies u.a. mit der vom Lagerdurchmesser beeinflussten Pressungs- und Schmiermittelverteilung in der Gleitfuge und der Vorbelastungszeit zusammenhängt.
- Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungszahlen tritt deutlich zutage: Mit wachsender Verschiebegeschwindigkeit nehmen die Reibungszahlen zu.
Das bei der ersten Bewegung sich einstellende Reibungsniveau ist im Rahmen dieser Untersuchungen maßgeblich und wird nach 30 m bzw. 100 m Gesamtgleitweg nicht mehr erreicht.
- Die Verhältnismerte $\mu_v/\mu_{v0,4}$, d.h. der Quotient aus mittlerer Reibungszahl bei $v = 50, 150$ und 2000 mm/s zur Reibungszahl bei $v = 0,4$ mm/s sind als sog. Erhöhungsfaktoren mit angegeben (Anlagen 48 bis 51). In den Diagrammen wurde dabei der vorhandene Einfluß von Pressung und Lagerdurchmesser nicht extra gekennzeichnet, sondern nur ein aus den Mittelwerten sich ergebender Streubereich eingetragen.
Danach können die für μ_{A1} gültigen Reibungszahlen bei $v = 50$ mm/s bis etwa um den Faktor 2, bei $v = 150$ mm/s bis etwa Faktor 3, bei $v = 2000$ mm/s bis etwa um den Faktor 5 höher liegen als bei niedriger Verschiebegeschwindigkeit von $v = 0,4$ mm/s.

Die sich für 30 m Gleitweg ergebenden Erhöhungsfaktoren liegen bis $v = 150 \text{ mm/s}$ unter den oben genannten Werten, bei $v = 2000 \text{ mm/s}$ jedoch darüber und erreichen Maximalwerte von etwa 9 für Lagerdurchmesser von 75 mm.

Aus der Größe dieser Erhöhungsfaktoren ist zu schließen, daß das Anwachsen der Reibungszahl bei höheren Verschiebegeschwindigkeiten nicht mehr vernachlässigbar ist, insbesondere dann, wenn die bekanntlich starke Temperaturabhängigkeit zusätzlich beachtet wird.

Unterstellt man nämlich bei höheren Verschiebegeschwindigkeiten den gleichen Temperatureinfluß, wie er für die niedrige Geschwindigkeit $v = 0,4 \text{ mm/s}$ aus Tieftemperaturprogrammversuchen bis -35 °C bekannt und in den Gleitlagerzulassungen berücksichtigt ist (Faktor ca. 3 bis 5 gegenüber Raumtemperatur), so ergeben sich insgesamt beträchtliche Erhöhungen, die nicht mehr ohne weiteres vernachlässigbar sind. Je nach Anwendungsfall sollte daher geprüft werden, ob die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungszahlen von PTFE-Gleitlagern zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Bei einer endgültigen Beurteilung der Versuchsergebnisse dieser Versuchsreihe ist einschränkend darauf hinzuweisen, daß den vorliegenden, aus Kurzzeitversuchen bei Raumtemperatur bestimmten mittleren Reibungszahlen lediglich 3 Einzelversuche je untersuchtem Parameter zugrunde liegen. Der zwar große, aus insgesamt 57 Versuchen bestehende, im Vergleich zur Parameteranzahl jedoch relativ geringe Versuchsumfang läßt quantitative umfassende und statistisch abgesicherte Aussagen für den untersuchten breiten Geschwindigkeitsbereich von 0,4 bis 2000 mm/s auch wegen der bei Reibungsversuchen naturgemäß vorhandenen Streuungen nicht zu. Außerdem handelt es sich um Laborversuche, die unter definierten Bedingungen und über relativ geringe Gesamtgleitwege von 30 bzw. 100 m gefahren wurden. Langzeiteinflüsse und insbesondere der Einfluß von tiefen Temperaturen sowie weitere, in der Praxis vorhandene und mögliche Einflußgrößen, wie Einbauungenauigkeiten, exzentrische Belastung der Lager sowie Verformungen der Gleitplatte und des Gleitblechs bei Auflagerung auf Beton, sind in den gewonnenen Reibungszahlen nicht mit enthalten. Bei einer umfassenden Beurteilung und Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis wäre daher die bedingte Aussagefähigkeit der aus den Versuchen resultierenden Erkenntnisse zu berücksichtigen. Trotz dieser Einschränkungen zeigen die Versuchsergebnisse jedoch Tendenzen auf, und es können daraus Größenordnungen für die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungszahlen von Gleitlagern abgeleitet werden.

5.2 Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über 2205 m Gesamtgleitweg (Versuchsreihe A2)

5.2.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Das durchgeführte Versuchsprogramm geht aus der Tabelle in Anlage 52 hervor.

Es wurden Gleitlager mit PTFE-Ø 75 und Ø 250 mm bei einer mittleren Pressung von 30 N/mm^2 geprüft. Die drei Versuche wurden als Dauergleitprogrammversuche bis zu einem Gesamtgleitweg von 2205 m durchgeführt. Jeder Versuch wurde in einzelne Versuchsabschnitte mit konstanter Verschiebegeschwindigkeit und gleichbleibendem Verschiebeweg des Gleitschiebers unterteilt. So wurden zwischen 5 Versuchsabschnitten (I/1 bis V/1) mit Gleitwegen von jeweils 33 m und Verschiebegeschwindigkeiten von $v = 0,4$ bzw. 150 mm/s insgesamt 4 Versuchsabschnitte (I/2 bis IV/2) mit je 510 m Gleitweg und $v = 2 \text{ mm/s}$ eingefügt. Die Vorbelastungszeit sowie die Standzeit vor jedem Wechsel der Gleitgeschwindigkeit betrug jeweils 1 Stunde.

Verformungs-, Verschleiß- und Temperaturmessungen wurden wie bei den Kurzzeitversuchen der Versuchsreihe A1 (vgl. Abschnitt 5.1.1) durchgeführt.

5.2.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse dieser drei Dauergleitprogrammversuche sind in den Anlagen 53 bis 68 tabellarisch sowie in Form von Diagrammen und Bildern zusammengestellt.

Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und Größe der Reibungszahlen

Die zeitliche Abhängigkeit von Verschiebewiderständen und Verschiebewegen entsprach qualitativ den bereits von den Kurzzeitversuchen her bekannten Verläufen (vgl. z.B. Anlagen 10 und 11). Beim jeweiligen Anfahren nach der einstündigen Standzeit bildeten sich stets ausgeprägte Haftreibungsspitzen. Bei den Versuchen bzw. Versuchsabschnitten mit Verschiebegeschwindigkeiten von $0,4$ und 2 mm/s stellten sich in den anschließenden

Hüben bei jeder Bewegungsumkehr ebenfalls entsprechende, jedoch kleinere Reibungsspitzen ein als beim Anfahren. Diese waren bei den Versuchsabschnitten, die mit $v = 150 \text{ mm/s}$ gefahren wurden, bei Bewegungsumkehr nur andeutungsweise vorhanden.

In den Tabellen der Anlagen 53, 57 und 61 sind die ausgewerteten maximalen Reibungszahlen sowie die an der zugänglichen Schmalseite der Gleitplatte mit einem Fühler gemessene Oberflächentemperatur in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg je Versuchsabschnitt aufgeführt. Die zugehörigen grafischen Darstellungen des Verlaufs der Reibungszahlen sind in den Anlagen 54, 58 und 62 zu finden.

Aus diesen Anlagen geht hervor, daß die größten Reibungszahlen erwartungsgemäß jeweils beim Anfahren nach der einstündigen Standzeit auftreten. Danach fallen sie mehr oder weniger stark ab, steigen teilweise wieder etwas an und erreichen in den einzelnen Versuchsabschnitten über längere Gleitwege ein nahezu konstantes Niveau. Auffallend dabei ist, daß sich diese Reibungsniveaus in den Versuchen D75 P30 V 0,4/2,0 und D250 P30 V 0,4/2,0 für die einzelnen, mit $v = 2 \text{ mm/s}$ durchgeführten Versuchsabschnitte (vgl. Anlagen 54 und 58 unten) kaum voneinander unterscheiden, und die entsprechenden Reibungszahlen bei beiden Versuchen in derselben Größenordnung liegen, d.h. praktisch unabhängig vom zurückgelegten Gesamtgleitweg sind.

Zur Verdeutlichung und besseren Wertung der Versuchsergebnisse sind die Anfahrreibungszahlen in der Tabelle von Anlage 66 in Abhängigkeit vom aufaddierten Gleitweg unter Angabe der jeweiligen Verschiebegeschwindigkeit für alle 3 Versuche zusammengefaßt. Außerdem sind in Anlage 67 sowohl die beim Anfahren als auch die am Abschnittsende von "Gleiten 1" (Verschiebegeschwindigkeit 0,4 bzw. 150 mm/s) erreichten Reibungszahlen in Abhängigkeit vom Gesamtgleitweg nochmals grafisch aufgetragen. Aus diesen Darstellungen und der erwähnten Tabelle ist folgendes abzulesen: Beim Lager $\emptyset 75 \text{ mm}$ fällt die Reibungscharakteristik der Anfahrreibung für $v = 0,4 \text{ mm/s}$ zunächst etwas ab und pendelt sich mit zunehmendem Gleitweg auf ein fast konstantes Niveau ein. Im Gegensatz dazu nehmen beim Lager $\emptyset 250 \text{ mm}$, das unter den gleichen Versuchsbedingungen geprüft wurde, die Anfahrreibungszahlen beginnend von einem niedrigen Niveau zunächst zu und erreichen nach 1086 m Gleitweg nahezu gleich große Werte wie beim Lager

Ø 75 mm. Dieses Angleichen der Reibungszahlen mit zunehmendem Gleitweg ist auf den besseren Schmierungs Zustand des größeren Lagers zu Bewegungsbeginn zurückzuführen, wie bereits im Abschnitt 5.1.2 ausgeführt wurde. Die Reibungscharakteristik des Lagers Ø 250 mm, das in den Versuchsabschnitten "Gleiten 1" mit $v = 150 \text{ mm/s}$ geprüft wurde, zeigt mit wachsendem Gleitweg ansteigende Tendenz. Die gemessenen Reibungszahlen sind auch um ein Vielfaches größer als bei der kleinen Verschiebegeschwindigkeit $v = 0,4 \text{ mm/s}$. Daraus kann auf zunehmenden Verschleiß geschlossen werden, der insbesondere in den Versuchsabschnitten mit hoher Verschiebegeschwindigkeit wegen des großen $p \cdot v$ -Wertes eingetreten sein muß. Ein Zeichen hierfür ist auch die relativ starke Temperaturzunahme am Rand der Gleitplatte (vgl. Anlage 61). Außerdem haben bei diesem Versuch in den Versuchsabschnitten mit $v = 2 \text{ mm/s}$ die Reibungszahlen nur unwesentlich zugenommen.

Verformungs- und Verschleißmessungen

Die Ergebnisse der Verformungs- und Verschleißmessungen sind für alle 3 Versuche in Anlage 68 angegeben. Die Gewichtsabnahme der Ronden durch PTFE-Verschleiß ergab sich etwa zu 1,1 bis 2,3 ‰ des Ursprungsgewichts. Bei den vorliegenden Versuchen hat demnach über einen Gesamtgleitweg von 2205 m ein relativ geringer Verschleiß von PTFE stattgefunden.

Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen

Das Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen geht aus den Bildern 34 bis 46 (Anlagen 55, 56, 59, 60, 63 bis 65) hervor.

Die Gleitflächen der aust. Stahlbleche zeigen feine, dünne Kratzspuren in Gleitrichtung, die überwiegend am Rand des Nachschmierbereichs der Schmiertaschen liegen. An den Gleitflächenrändern hat sich außen helles, weiter innen dunkel verfärbtes Fett abgelagert, das mit feinen, kaum sichtbaren PTFE-Verschleißpartikeln vermischt ist. Ein Fetthof mit deutlich sichtbarem Fettfilm zwischen den Schmiertaschenabdrücken, wie in den Kurzzeitversuchen der Versuchsreihe A1 bei den größeren Lagerdurchmessern beobachtet, ist auf den Gleitblechen nicht mehr vorhanden.

Beim Lager \varnothing 75 mm haften zwei plättchenförmige PTFE-Verschleißpartikel auf dem Gleitblech (Bild 56). Der bei der Gleitbewegung von den Schmier-taschen erfaßte Nachschmierbereich hebt sich dort von der übrigen Gleit-fläche bei entsprechendem Lichteinfall durch ein blankeres, etwas dunkle-res Aussehen ab. Bei den dazwischen liegenden, schlechter geschmierten und heller erscheinenden Flächen handelt es sich vermutlich um einen Fett- bzw. Ölfilm mit eingelagerten, feinsten PTFE-Verschleißpartikeln.

Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag haben sich nur auf dem Gleitblech des Lagers D250 P30 V 150/2,0 gebildet, und zwar vorwiegend im Randbereich der Gleitfläche sowie an solchen, schlechter nachgeschmierten Stellen, wo sich am Scheibenrand angeschnittene Schmiertaschen befinden oder wo die Schmiertaschen in Gleitrichtung weiter vom Scheibenrand entfernt liegen. Bei diesem Versuch wurde auch beobachtet, daß solche Trockenlaufstellen nur in den Versuchsabschnitten mit $v = 150$ mm/s entstanden. In jedem nachfolgendem Versuchsabschnitt mit $v = 2$ mm/s verschwanden sie wieder während der ersten Gleitbewegungen. Die Nachschmierung der Gleitfläche muß demnach bei der kleinen Verschiebegeschwindigkeit wirksamer gewesen sein, was auch die niedrigen Reibungszahlen und deren geringe Zunahme in diesen Versuchsabschnitten erklärt.

Die PTFE-Ronden zeigen eine geringe Wulstbildung am Außenrand. Die Tiefe der angeschnittenen, bzw. nur wenige Millimeter vom Scheibenrand entfernten Schmiertaschen hat sich bis auf 0,4 mm bzw. 1 mm verkleinert. In Scheibenmitte beträgt sie rund 1,3 bis 1,4 mm. Auf den PTFE-Gleitflächen sind streifenartige Verschleißspuren in Verschieberichtung vorhanden, die sich an den Schmiertaschenrändern stärker ausbildeten als in den übrigen Bereichen.

Auf der PTFE-Scheibe \varnothing 75 mm (Bild 37) sind jene zwei Stellen deutlich sichtbar, an denen sich plättchenartige Verschleißpartikel gelöst hatten und die auf dem Gleitblech haften blieben.

Im Gegensatz zu den beiden anderen untersuchten Gleitlagern, bei denen die PTFE-Oberfläche nach den Versuchen matt weiß glänzten, sind beim Lager D250 P30 V 0,4/2,0 auf der PTFE-Gleitfläche in Gleitrichtung verlaufende, dunklere Streifen vor allen im mittleren Scheibenteil zu erkennen (Bilder 39 bis 42). Dabei handelt es sich um einen dünnen, jedoch gut sichtbaren Fettfilm, der mit feinsten PTFE-Verschleißprodukten vermischt ist. Diese

geringen Fettmengen zwischen den Schmiertaschen dürften die Überreste des bei Gleitbeginn im Scheibeninnern vorhandenen Fetthofs sein. Dieser Bereich wird ja durch das dort vorhandene Fettpolster zwischen den Schmiertaschen zunächst besser geschmiert. Mit zunehmendem Gleitweg läßt diese Wirkung durch das Herausarbeiten von Fett aus dem Gleitspalt beim Hin- und Herbewegen nach, so daß der Fetthof immer kleiner wird, und die Reibungszahlen wie beobachtet zunehmen. Aus der PTFE-Oberfläche dieses Lagers lassen sich nach dem Versuch durch Überstreichen mit dem Fingernagel unter leichtem Druck dünne, feine PTFE-Fäden ablösen, was ebenfalls den Verschleiß von PTFE anzeigt.

Bei allen drei Lagern hat sich das in den Schmiertaschen verbliebene und das beim Trennen der Gleitflächen am Gleitblech haftende Fett durch das Einlagern von herausgelösten Kleinstpartikeln aus der Blechoberfläche dunkelgrau bis schwarz verfärbt. Die Fettkonsistenz hat sich ebenfalls durch Abscheiden von Öl geändert. Das entnommene Fett ist zäh plastisch, die Fettkuchen aus den Schmiertaschen sind zwischen den Fingern knetbar und besitzen auf der Rückseite einen dünnen Ölfilm.

5.2.3 Zusammenfassung (Versuchsreihe A2)

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die beiden mit Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4 und 2,0 mm/s, jedoch bei verschieden großem Verschiebeweg je Hub geprüften Gleitlager Ø 75 und Ø 250 mm nach ca. 1100 m zurückgelegtem Gleitweg ein fast gleiches Reibungsverhalten zeigten, wobei die maßgebenden Reibungszahlen beim Anfahren bis zu einem Gesamtgleitweg von etwa 2200 m nahezu konstant und unter 1 % blieben.

Bei beiden Lagern waren nach den Versuchen Verschleißspuren auf den Gleitflächen festzustellen, die sich als Kratzer im Gleitblech und durch PTFE-Abtrag äußerten. Die verschleißbedingte Gewichtsabnahme war jedoch noch gering und lag unter 1,5 ‰ des ursprünglichen Gewichts der PTFE-Scheiben. Trotz dieser Anzeichen von beginnendem Verschleiß und trotz des Fettverbrauchs bei der Gleitbewegung sowie der Änderung der Fettkonsistenz infolge Ölabscheidens blieb die Schmierung wegen der Schmierstoffspeicherung bis zu einem Gleitweg über rund 2200 m wirksam.

Das Lager \emptyset 250 mm, das abschnittsweise mit Verschiebegeschwindigkeiten von 150 und 2,0 mm/s untersucht wurde, hatte ein anderes Reibungsverhalten. Die Reibungszahlen nahmen beim Anfahren mit der hohen Verschiebegeschwindigkeit, beginnend mit 1,1 %, mit wachsendem Gleitweg zu und erreichten nach ca. 2200 m Werte von 5 %. In den Versuchsabschnitten mit der niedrigen Verschiebegeschwindigkeit von 2 mm/s blieben die Reibungszahlen jedoch unter 1 %, wobei mit zunehmendem Laufweg keine nennenswerte, starke Vergrößerung der Reibungszahlen eintrat.

Der Verschleiß machte sich durch Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag und Kratzern im Gleitblech sowie durch Abrasion von PTFE bemerkbar. Die durch den Verschleiß bewirkte Gewichtsabnahme betrug 2,3 ‰ des Ursprungsgewichts der PTFE-Ronde.

Dieser Versuch hat gezeigt, daß die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungszahl nach längerem Gleitweg stark zunehmen kann. Dabei war sicherlich auch der relativ große Verschiebeweg je Hub von ± 75 mm und der damit verbundene erhöhte Fettverbrauch von Einfluß.

5.3 Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern Ø 250 mm über 10024 m Gesamtgleitweg (Versuchsreihe D)

5.3.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Zur Simulierung von langsamen, größeren Lagerbewegungen infolge Temperatur ($v = 0,1 \text{ mm/s}$, $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$) und schnellen, kleinen Verschiebungen infolge Verkehrslasten ($v = 25 \text{ mm/s}$, $s_0 = \pm 2,5 \text{ mm}$), die beispielsweise an den Auflagern von Brücken entstehen können, wurden insgesamt drei Gleitlager mit PTFE-Ø 250 mm bei einer mittleren Pressung von 30 N/mm^2 unter den in Anlage 69 angegebenen Bedingungen geprüft. Jeder Versuch wurde in 8 gleichartige, aufeinanderfolgende Versuchsabschnitte I bis VIII mit jeweils 1253 m Gleitweg unterteilt. Jeder Versuchsabschnitt war wiederum aufgegliedert in die Unterabschnitte "Gleiten 1" mit 3 m Gleitweg für langsame Temperaturbewegungen und "Gleiten 2" für schnelle Bewegungen aus Verkehr. Die Vorbelastungszeit vor Beginn der ersten Gleitbewegung betrug 24 Stunden, die Standzeit vor jedem Wechsel der Gleitgeschwindigkeit 1 Stunde.

Verformungs-, Verschleiß- und Temperaturmessungen wurden wie bei den Kurzzeitversuchen der Versuchsreihe A1 (vgl. Abschnitt 5.1) durchgeführt.

Der erste Versuch wurde nach 6265 m Gesamtgleitweg abgebrochen, da relativ viel PTFE ausgetrieben worden war, und deshalb das Aussehen der PTFE-Ronde interessierte.

Der zweite und dritte Versuch wurde jeweils bis zum Erreichen eines Gesamtgleitweges von ca. 10000 m gefahren, die Gesamtdauer eines Versuchs betrug dabei etwa 9 Tage.

5.3.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse dieser drei Dauergleitprogrammversuche sind in den Anlagen 70 bis 89 tabellarisch sowie in Diagrammen und Bildern zusammengestellt.

Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und Größe der Reibungszahlen

Die jeweiligen zeitlichen Verläufe der Verschiebewiderstände und Verschiebewege ergaben sich qualitativ wie bei den Kurzzeitversuchen A1 mit $v = 0,4$ und 50 mm/s (vgl. z.B. Anlagen 10 und 11) und sind daher nicht nochmals dargestellt.

In den kurzen Versuchsabschnitten über 3 m Gleitweg mit den langsamen Lagerbewegungen traten sowohl beim Anfahren als auch bei jeder Richtungsänderung der Bewegung Reibungsspitzen auf.

Im Gegensatz dazu wurden solche ausgeprägte Reibungsspitzen in den 1250 m langen Versuchsabschnitten mit den kleinen, schnellen Verschiebungen nur beim Anfahren nach den Standzeiten ohne Bewegung beobachtet, bei Bewegungsumkehr fehlten sie oder waren nur ganz schwach ausgebildet. Dies rührt daher, daß an diesen Stellen der zeitliche Verlauf des Verschiebeweges infolge der Massenkräfte und der Trägheit des Prüfsystems eine etwas ausgerundete Form aufwies. Die Richtungsänderung der Bewegung erfolgte deshalb bei dieser relativ hohen Verschiebegeschwindigkeit nicht mehr plötzlich, sondern es fand ein weicherer Übergang statt, da zum Abbremsen und Wiederbeschleunigen des Gleitschiebers eine kurze Zeitspanne (ca. $0,006$ s) benötigt wurde.

Die ausgewerteten, maßgeblichen maximalen Reibungszahlen sowie die an der zugänglichen Schmalseite der Gleitplatte mit einem Fühler gemessenen Oberflächentemperaturen sind in den Tabellen der Anlagen 70, 74 und 80 in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg je Versuchsabschnitt aufgeführt.

Die zugehörigen Verläufe der Reibungszahlen sind in den Diagrammen der Anlagen 71, 75 und 81 grafisch aufgetragen, wobei für den Versuch Nr. 2 der Übersichtlichkeit halber nicht alle Versuchsabschnitte mit aufgenommen wurden.

Aus den genannten Anlagen geht hervor, daß in den Versuchsabschnitten "Gleiten 1" mit den langsamen und größeren Lagerbewegungen die größten Reibungszahlen jeweils beim Anfahren nach der Standzeit auftreten. Nach wenigen Hüben wird ein praktisch konstantes Reibungsniveau erreicht, das sich nach dem Durchfahren des ersten Versuchsabschnitts im weiteren Versuchsablauf nur noch wenig ändert.

In den Versuchsabschnitten "Gleiten 2" mit den schnellen und kürzeren Verschiebungen stellen sich die max. Reibungszahlen nicht immer direkt am Beginn der Gleitbewegung nach der Standzeit ein. Oft ergeben sich dort die Größtwerte erst nach etwa 10 bis 20 Doppelhüben. Zur besseren Anschaulichkeit wurden in den Diagrammen nur die Maximalwerte aufgetragen. Nach Durchlaufen des Maximums fallen auch hier die Reibungszahlen ab und erreichen in den einzelnen Versuchsabschnitten bis zum jeweiligen Abschnittsende ebenfalls ein nahezu konstantes Niveau. Allerdings zeigen die Reibungszahlen mit zunehmenden aufaddierten Gleitwegen, also bei höheren Abschnittsnummern, steigende Tendenz.

Zur Verdeutlichung der Versuchsergebnisse sind die maximalen Reibungszahlen, die zu Beginn und am Ende der einzelnen Versuchsabschnitte erreicht wurden, in Abhängigkeit vom aufaddierten Gleitweg für alle 3 Versuche in der Tabelle von Anlage 87 zusammengefaßt und in den Anlagen 88 und 89 grafisch aufgetragen.

Die Reibungscharakteristik der Anfahrreibung bei langsamer Lagerbewegung zeigt Größtwerte (im Mittel aller 3 Versuche 0,73 %) bei der ersten Gleitbewegung nach der 24stündigen Vorbelastungszeit. Nach rd. 1250 m Gleitweg ist das Reibungsniveau fast um die Hälfte niedriger (ca. 0,4 %) und ändert sich über längere Laufwege praktisch nicht mehr. Die zugehörigen Reibungszahlen am Ende von "Gleiten 1" sind über die gesamte Gleitweglänge ebenfalls nahezu konstant und liegen bei rund 0,2 %.

Ganz anders verhält sich die Anfahrreibung in den Versuchsabschnitten "Gleiten 2" mit der schnellen Verschiebegeschwindigkeit bei kleinen Lagerbewegungen. Dort nehmen die bei Abschnittsbeginn nach der einstündigen Standzeit gemessenen Reibungszahlen zunächst von etwa 0,7 % (Mittelwert der 3 Versuche) auf ca. 1 % zu. Zwischen 1250 m und ungefähr 5000 bis 6000 m Gleitweg bleibt dieser Wert nahezu konstant, danach zeigt die Reibungscharakteristik ansteigende Tendenz. Die am Abschnittsende von "Gleiten 2" ermittelten Reibungszahlen nehmen mit wachsendem Gleitweg annähernd linear zu, sie sind jedoch wesentlich kleiner als jene bei Bewegungsbeginn mit der schnellen Verschiebung.

Temperaturentwicklung beim Gleiten

Während des Gleitens mit den kurzen, schnellen Lagerbewegungen stieg die Temperatur der Gleitplatte jeweils deutlich an (vgl. Anlagen 72, 76 und 82). In der nachfolgenden einstündigen Standzeit und während des daran anschließenden etwa 8 Stunden dauernden Versuchsabschnitts "Gleiten 1" kühlte sich die Gleitplatte jeweils wieder fast auf Raumtemperatur ab. Der Temperaturanstieg beim schnellen Gleiten nahm mit größer werdendem Gleitweg immer mehr zu. So wurde in den ersten Versuchsabschnitten von "Gleiten 2" eine Temperaturänderung von etwa 6 bis 9 °C festgestellt, während sie im letzten Versuchsabschnitt des Versuchs Nr. 3 beispielsweise rund 15,5 °C betrug. Die örtlichen Temperaturen in der Gleitfläche waren sicherlich höher als die genannten, an der Schmalseite der Gleitplatte gemessenen Werte. Die ermittelten Reibungszahlen in den Versuchsabschnitten "Gleiten 2" sind daher bei den ersten Gleitbewegungen nur wenig, in den nachfolgenden Hüben jedoch günstig beeinflusst.

Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen

Das Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen geht aus den Bildern 47 bis 62 (Anlagen 73, 77 bis 79, 83 bis 86) hervor.

Die Gleitflächen der austenitischen Stahlbleche zeigen feine, dünne, in Gleitrichtung verlaufende Kratzspuren, die nur im spiegelnden Licht erkennbar sind und überwiegend am Rand des Nachschmierbereichs der Schmieraschen liegen. An den äußeren Rändern der Gleitflächen haftet Fett, das stark mit PTFE-Partikeln vermischt ist.

Die Endlage der PTFE-Scheiben nach den Versuchen hebt sich vom übrigen Bereich der Gleitflächen durch entsprechende Fettablagerungen aus den Schmieraschen ab. Da die Versuche jeweils mit den kleinen und schnellen Lagerbewegungen beendet wurden, ist auch die Lage der Scheibenränder an den Ablagerungen einer mehlartigen, weißen Substanz erkennbar. Dabei handelt es sich überwiegend um flockenartige PTFE-Verschleißprodukte, die jedoch noch etwas mit Fett vermischt sind.

Bei den Versuchen Nr. 1 und Nr. 2 ist im Innern des Scheibenabdrucks jeweils ein Fetthof mit deutlich sichtbarem Fettfilm zwischen den Schmiertaschenabdrücken vorhanden, der jedoch bei Versuch Nr. 3 nur noch andeutungsweise in Erscheinung tritt. Diese etwas schlechtere Schmierung des Innenbereichs machte sich bei Versuch Nr. 3 durch geringfügig höhere Reibungszahlen beim schnellen Gleiten bemerkbar.

Außerhalb der Fetthöfe sind auf den aust. Blechen örtlich hellere PTFE-Auftragungen zwischen den Schmiertaschenabdrücken zu erkennen. Der von den Schmiertaschen bei der schnellen Gleitbewegung von $\pm 2,5$ mm erfaßte Nachschmierbereich hebt sich bei entsprechendem Lichteinfall durch ein blankeres, etwas dunkleres Aussehen von der Umgebung ab. Dies tritt jedoch im Bereich des Fetthofs nicht auf, wie nach örtlichem Säubern des Gleitblechs festgestellt wurde.

Nach den Versuchen zeigen die PTFE-Ronden an den Außenrändern geringe Wulstbildungen von 0,2 bis 0,4 mm.

Die Schmiertaschen haben sich im Versuchsverlauf durch Nachfließen von PTFE vor allem im Randbereich der Scheiben verkleinert. Die Schmiertaschentiefen liegen dort zwischen 0,4 bis 1 mm bei Schmiertaschendurchmessern von 5 bis 6 mm. Im Scheibeninnern tritt diese Verkleinerung nicht sehr stark in Erscheinung. Dort sind nach den Versuchen noch Tiefen von 1,2 bis 1,6 mm bei Taschendurchmessern von etwa 6,5 bis 7,3 mm vorhanden. Die PTFE-Gleitflächen zwischen den Schmiertaschen weisen in Gleitrichtung verlaufende, kurze Verschleißspuren mit örtlichem PTFE-Rückübertrag auf. Die Verschleißstellen liegen neben den Schmiertaschen in solchen Zonen, wo sich die Nachschmierbereiche benachbarter Schmiertaschen infolge der geringen Bewegung von $\pm 2,5$ mm beim schnellen Gleiten nicht mehr überdecken. Im Bereich des Fetthofs, also im mittleren Teil der Scheiben, sind derartige, durch Schabwirkung entstandene Verschleißspuren bei den Versuchen Nr. 1 und 2 praktisch gar nicht feststellbar, beim Versuch Nr. 3 nur an wenigen Stellen. Der Verschleiß hat demnach bei den schnellen und kurzen Gleitbewegungen vorwiegend in der schlechter geschmierten Zone außerhalb des Fetthofs stattgefunden. In dieser Außenzone sind im PTFE bei entsprechendem Lichteinfall auch sichelförmige Bereiche neben den Schmiertaschen erkennbar, die beim Hin- und Herbewegen mit Fett aus den Taschen nachgespeist wurden.

Das nach den Versuchen in den Schmiertaschen verbliebene Fett hat sich farblich durch Einlagerung von Schleifpartikeln aus dem Gleitblech und in seiner Konsistenz durch Abgabe von Siliconöl verändert. Das Fett in den Schmiertaschen außerhalb des Fetthofs ist plastisch, mehr oder weniger stark mit PTFE-Partikeln angereichert und läßt sich zwischen den Fingern zu Röllchen kneten. Fettkuchen, die aus den Schmiertaschen am Scheibenrand stammen, sind infolge stärkerer Einlagerungen von PTFE-Verschleißprodukten heller und fester, nicht oder kaum mehr knetbar und zerbröckeln teilweise bei der Entnahme. Bei größerem Abstand zum Scheibenrand wird das Fett in den Schmiertaschen weicher. Im Scheibeninnern mit Fetthof ist es schmierig, enthält noch Siliconöl und ist kaum mit PTFE-Partikeln vermengt.

Verformungs- und Verschleißmessungen

Die Ergebnisse der Verformungs- und Verschleißmessungen sind für alle 3 Versuche in Anlage 90 angegeben.

Aus den Verformungsmessungen lassen sich überschläglich Gleitspaltänderungen während der Versuche von 0,30 bis 0,35 mm für die aufgebrachte spezifische Belastung von 30 N/mm^2 ermitteln. Dabei ergibt sich der größte Verformungsanteil von rund 0,21 bis 0,25 mm aus der Belastung mit F_v und der PTFE-Zusammendrückung während der 24stündigen Vorbela-stungszeit.

Aus den festgestellten Dickenänderungen der PTFE-Ronden von 0,11 bis 0,16 mm kann keine Verschleißgröße abgeleitet werden, da der Verschleiß örtlich aufgetreten ist und in solche Messungen sowohl bleibende plasti-sche Verformungen als auch Rückkriecheffekte nach dem Entlasten eingehen. Deshalb konnte auch keine eindeutige Beziehung zwischen Dicken- und Ge-wichtsänderung infolge Verschleiß hergestellt werden.

Als maßgebliche Verschleißgröße ist die Gewichtsabnahme der PTFE-Ronden während der Versuche anzusehen. Diese liegt im Versuch Nr. 1 bei $7,4 \text{ ‰}$ nach 6265 m Gleitweg und in den Versuchen Nr. 2 und 3 bei $9,5$ bzw. $15,5 \text{ ‰}$ nach 10024 m zurückgelegtem Gleitweg, wobei sich diese Angaben auf das ursprüngliche Gewicht der PTFE-Scheiben beziehen.

5.3.3 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen (Versuchsreihe D)

An PTFE-Gleitlagern in Brückenbauwerken treten langsame Lagerbewegungen infolge Wärmedehnungen des Überbaus und schnelle, kleine Lagerverschiebungen infolge Auflagerverdrehungen aus Verkehrslasten auf. Im Laufe der Lebensdauer eines Lagers können sich solche Relativverschiebungen zu beträchtlichen Gesamtgleitwegen aufsummieren, wobei bekanntlich der größte Anteil aus den Bewegungen infolge Verkehr verursacht wird und daher von vielen Parametern abhängig ist, wie z.B. Art und Häufigkeit des Verkehrs (PKW, SLW, Schienenfahrzeuge), Verkehrsdynamik, Steifigkeit der Konstruktion (Spannweite, Baumaterial, Bauart, Überbauhöhe am Auflager, etc.) Schwingungsverhalten des Überbaus, um nur einige der möglichen Einflußgrößen zu nennen.

Die Reibungszahl ist dabei pressungs-, weg- und geschwindigkeitsabhängig und wird zusätzlich von der Lagertemperatur beeinflusst. Eindeutige Kriterien zur wirklichkeitsnahen Beurteilung und Prüfung des Langzeitverhaltens von Gleitlagern unter Berücksichtigung aller maßgeblichen Einflußparameter fehlen bisher.

Zur Abschätzung des Langzeitverhaltens bei Raumtemperatur wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Dauergleitprogrammversuche mit geschmierten Gleitlagern \varnothing 250 mm über 6265 m (Versuch Nr. 1) und ca. 10000 m Gesamtgleitweg (Versuche Nr. 2 und 3) bei einer mittleren Flächenpressung von 30 N/mm^2 durchgeführt. Zur Simulierung von langsamen und schnellen Lagerbewegungen wurde jeder Versuch in einzelne Versuchsabschnitte unterteilt. Für die langsamen, größeren Lagerbewegungen infolge Temperatur wurden jeweils Versuchsabschnitte über 3 m Gleitweg mit einer konstanten Verschiebegeschwindigkeit von $0,1 \text{ mm/s}$ und einem Verschiebeweg je Hub von $\pm 75 \text{ mm}$ gewählt. Die einzelnen Versuchsabschnitte für die schnellen, kleinen Lagerbewegungen wurden jeweils über 1250 m Gleitweg bei einer mittleren Verschiebegeschwindigkeit von 25 mm/s und einer Wegamplitude von $\pm 2,5 \text{ mm}$ gefahren. Zwischen jedem Versuchsabschnitt wurde eine ein-stündige Bewegungsunterbrechung eingefügt.

Die maßgeblichen, maximalen Reibungszahlen treten in den einzelnen Versuchsabschnitten immer nach den Standzeiten ohne Bewegung direkt bei Gleitbeginn oder kurz danach auf. Bei Änderung der Bewegungsrichtung nach

länger anhaltenden ständigen Bewegungen ohne Bewegungsunterbrechung liegen die Reibungswerte niedriger und betragen nur etwa die Hälfte bis ein Drittel der Maximalwerte bei Gleitbeginn.

Beim langsamen Gleiten werden die größten Reibungszahlen (Mittelwert 0,73 %) bei der ersten Bewegung, also am Versuchsanfang nach der 24stündigen Vorbelastungszeit erreicht, wobei die Anfahrwerte relativ stark streuen. Danach ist das Reibungsniveau bei einstündiger Bewegungsunterbrechung wesentlich kleiner und bleibt mit zunehmendem Gleitweg annähernd konstant bei rd. 0,4 %.

Beim schnellen Gleiten weist die ermittelte Reibungszahl-Gleitweg-Abhängigkeit verschiedene kennzeichnende Bereiche auf. Zunächst erfolgt ein Reibungsanstieg von etwa 0,7 auf 1 %. Bei diesem Wert stabilisiert sich das Reibungsniveau und bleibt bis etwa 5000 bis 6000 m zurückgelegtem Gleitweg konstant. Danach nehmen die Reibungszahlen fast linear mit dem Gleitweg weiter zu und erreichen nach ca. 8800 m im Mittel rund 1,3 %, was nahezu dem doppelten Anfangswert entspricht.

Der Einfluß der Vorbelastungszeit auf die Größe der Anfahrrreibung bei der ersten Bewegung zeigt sich einerseits durch einen Vergleich mit dem bei der Versuchsreihe A1 nach einstündiger Vorbelastung bei $v = 0,4$ mm/s erhaltenen Mittelwert von 0,62 % gegenüber den erreichten 0,73 % bei 24stündiger Vorbelastung. Andererseits ergeben sich ebenfalls bei einstündiger Vorbelastungsdauer und der gleichen Verschiebegeschwindigkeit bei Gleitwegen über 1250 m Reibungszahlen von etwa 0,4 %.

Bereits nach der ersten Gleitphase mit der hohen Verschiebegeschwindigkeit wurden nach 1250 m Gleitweg die ersten Verschleißerscheinungen beobachtet. Während der schnellen Gleitbewegungen wurden feine PTFE-Verschleißprodukte insbesondere aus dem schlechter geschmierten Scheibenbereich außerhalb des im Scheibeninnern befindlichen Fetthofs gelöst und zusammen mit verbrauchtem Fett aus dem Gleitspalt herausgeschoben. Dieser Vorgang verstärkte sich mit zunehmendem Gleitweg. Der nach den Versuchen in den Schmiertaschen verbliebene Schmierstoff hat seine Konsistenz durch Abgabe von Siliconöl in den Gleitspalt verändert und ist besonders in den Scheibenrandzonen stark mit PTFE-Verschleißpartikeln angereichert. Die örtliche Lage der Verschleißstellen, die infolge der kleinen Verschiebungen außerhalb des Nachschmierbereichs von in Gleitrichtung benachbarten Schmiertaschen auftreten, zeigt den Einfluß der Wegamplitude auf den Verschleiß, der praktisch nur bei der schnellen Bewegung stattfand.

Die sowohl beim langsamen und schnellen Gleiten über längere Laufwege praktisch konstant bleibenden Reibungswerte nach dem Wiederanfahren können darauf zurückgeführt werden, daß sich in der Gleitfläche zwischen Neuentstehen von PTFE-Abrieb und Aufschmieren sowie Herausschieben von Verschleißteilchen unter Fettverbrauch ein Gleichgewichtszustand einstellt. Es liegt also ein stationäres Verschleißverhalten mit einer annähernd linearen Zunahme des Verschleißbetrages mit der Zeit vor. Das Ansteigen der Reibungszahlen nach 5000 bis 6000 m Gleitweg beim schnellen Gleiten weist auf zunehmenden Verschleiß bei abnehmender Schmierwirkung infolge Fettverbrauch, Konsistenzänderung und zusätzlicher Einlagerung von PTFE-Verschleißpartikeln in die Schmiertaschen hin.

Das beim langsamen Gleiten beobachtete, fast konstante und niedrige Reibungsniveau im gesamten untersuchten Gleitwegbereich ist durch die kleinere Verschiebegeschwindigkeit und den größeren Verschiebeweg je Hub bedingt. Bei Wegamplituden von ± 75 mm überdecken sich nämlich die Nachschmierbereiche benachbarter Schmiertaschen, außerdem wird beim Hin- und Herbewegen noch Schmiermittel weiter nach außen transportiert, so daß die Gleitfläche insgesamt besser geschmiert wird als bei kleinen Verschiebungen.

Die vorliegenden Versuche haben gezeigt, daß die schnellen und kurzhubigen Verschiebungen infolge Verkehrslasten das Reibungs- und Verschleißverhalten von Gleitlagern bei großen Gesamtgleitwegen von ca. 10000 m maßgeblich bestimmen. Die langsamen, größeren Lagerbewegungen infolge Temperatur sind wegen günstigerem Verhalten bezüglich des Verschleißes von untergeordneter Bedeutung, und zwar auch deshalb, weil im Laufe der Lebensdauer eines Lagers der Anteil der Temperaturbewegungen am gesamten aufaddierten Gleitweg relativ gering ist.

Zur Klärung, inwieweit die Verschiebegeschwindigkeit bei Verkehr die Anfahrreibungszahlen nach längeren zurückgelegten Gleitwegen beeinflusst, und ob sie auf die Größe der bei der Bemessung anzusetzenden Reibungskräfte von Bedeutung ist, können die Erhöhungsfaktoren $\mu_{v25}/\mu_{v0,1}$ herangezogen werden. Im Mittel ergeben sie sich zwischen ca. 1250 m und ca. 6270 m aufaddiertem Gleitweg nahezu konstant zu rund 2,65 und steigen danach auf rund 3,2 nach ca. 8800 m Gleitweg an. Das bedeutet, daß die

Anfahrreibungszahlen bei Raumtemperatur nach längeren Gleitwegen bei $v = 25 \text{ mm/s}$ etwa 3mal größer sein können als bei $v = 0,1 \text{ mm/s}$. Aus diesem Ergebnis sowie den Ergebnissen der Kurzzeitversuche der Versuchsreihe A1 ist begründet abzuleiten, daß bei Verschiebegeschwindigkeiten von 25 mm/s im Zusammenwirken mit tiefen Temperaturen von beispielsweise -35 °C wesentlich höhere Reibungszahlen zu erwarten sind als bei langsamen Verschiebegeschwindigkeiten.

Um das Langzeitverhalten von Brückengleitlagern endgültig beurteilen zu können, müssen sowohl die bei Verkehr auftretenden Verschiebewegamplituden, deren Häufigkeit und die daraus resultierenden Gesamtgleitwege insbesondere aber auch die tatsächlich auftretenden Verschiebegeschwindigkeiten bekannt sein. Untersuchungen, die zur Klärung dieser offenen Fragen beitragen sollen, werden zur Zeit von verschiedenen Institutionen durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen soll eine praxisgerechte Prüfung zur Vorhersage der Lebensdauer eines Gleitlagers unter wirklichkeitsnahen Bedingungen abgeleitet werden.

Dabei sollte, wie aus den vorliegenden Untersuchungen an Gleitlagern hervorgeht, neben der Pressungs-, Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit auch der Einfluß der Verschiebewegamplitude und des zu erwartenden Gesamtgleitweges sowie die Anordnung der Schmiertaschen zur Gleitrichtung und die Lagergröße berücksichtigt werden.

6 Untersuchungen an Elastomerlagern und Verformungsgleitlagern

6.1 Schubversuche an Elastomerlagern Ø 450 mm (Versuchsreihe B1)

6.1.1 Lageraufbau, Versuchsbedingungen, Versuchsdurchführung

An 3 bewehrten Elastomerlagern Ø 450 mm mit Einbaudicken von 99 bzw. 159 mm und unterschiedlichen Shore-A-Härten von ca. 50 bzw. 65 wurden Schubversuche durchgeführt, bei denen die Verschiebegeschwindigkeit v und die maximale Schubverformung $\tan\gamma$ variiert wurden. Aus Anlage 91 geht der Aufbau der Elastomerlager hervor. Außerdem sind dort auch die untersuchten Geschwindigkeits- und Schubverformungsbereiche angegeben.

Dieselben Elastomerlager wurden auch für die Versuche mit Verformungsgleitlagern (Versuchsreihe B2 bzw. C) verwendet. Die Schubversuche sollten dazu dienen, den Verformungswiderstand und den Sekantenmodul der Elastomerlager bei unterschiedlich großen Schubverformungen in Abhängigkeit von der Verschiebegeschwindigkeit zu ermitteln. Auch sollte der Einfluß der Shore-A-Härte untersucht werden. Da bei geschmierten Verformungsgleitlagern keine großen Schubverformungen zu erwarten sind, wurden diese bei den vorliegenden Schubversuchen auf $\tan\gamma \leq \pm 0,4$ begrenzt. Die mittlere Elastomerpressung wurde wie bei den Versuchen an Verformungsgleitlagern zu $9,26 \text{ N/mm}^2$ gewählt.

Nach dem Einbau in den Prüfstand (vgl. Anlagen 1 und 2) wurde jedes Lager dreimal zwischen $0,1 F_V$ und $F_V = 1473 \text{ kN}$ vertikal belastet, wobei die zugehörige Lagerstauchung gemessen wurde. Danach erfolgte die Durchführung der Schubversuche. Je untersuchtem Parameter wurden dabei mindestens 3 Doppelhübe aufgebracht. Während des Versuchsablaufs wurden Schubverformung und Schubwiderstand zeitabhängig gemessen und registriert. Außerdem wurden die Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramme mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Bei den hohen Verschiebegeschwindigkeiten von 50 und 150 mm/s mußten die Versuchswerte wegen der Trägheit des Schreibers und der damit verbundenen Gefahr der Verfälschung der Gleitwinkeldiagramme während des Versuchs zunächst von einem Rechner bei hoher Abtastfrequenz digital aufgenommen und in ihm gespeichert werden. Erst nach dem Versuch erfolgte dann die Wiedergabe der Diagramme mit entsprechend langsamer Zeichengeschwindigkeit des Schreibers.

6.1.2 Ergebnisse der Versuche an bewehrten Elastomerlagern \varnothing 450 mm (Versuchsreihe B1)

Stauchungen der Lager unter zentrischer Last

Druckverformungen entstehen bei bewehrten Elastomerlagern dadurch, daß Gummi zwischen den eingelegten Blechen seitlich herausgedrückt wird. Aus Versuchen ist das nichtlineare Druckverformungsverhalten bekannt, die Druckspannungen verlaufen mit zunehmender Stauchung progressiv. Das Hook'sche Gesetz ist damit nicht mehr gültig, bzw. es kann nur mit gewissen Einschränkungen angewandt werden.

Die Abhängigkeit von Druckspannungen und Stauchungen bewehrter Elastomerlager wird in der Literatur durch verschiedene Formeln beschrieben. Einige dieser Ansätze sind in Anlage 92 zusammengestellt und für runde Lager graphisch ausgewertet. Ein Vergleich zeigt einerseits große Streuungen der einzelnen Rechenansätze, andererseits aber auch die gemeinsame Abhängigkeit dieser Verformungsgesetze vom Verhältnis Durchmesser zur Elastomerschichtdicke (\varnothing/t) und vom Schubmodul G .

Aus den im Versuch gemessenen Lagerstauchungen und den bekannten mittleren Druckspannungen können mit den gegebenen Formeln rechnerische Schubmoduln G_R ermittelt werden (s. Anlage 93). Wie anhand der bereits festgestellten Abweichungen der verschiedenen Spannungs-Stauchungs-Gesetze nicht anders zu erwarten, streuen auch die derart bestimmten G_R -Werte je Lager relativ stark. Tendentiell läßt sich jedoch aus den Ergebnissen durch einen Vergleich der drei untersuchten, verschiedenen Elastomerlager die bekannte große Abhängigkeit des Schubmoduls von der Gummihärte, die in Shore-Einheiten gemessen wird, ablesen.

Ergebnisse der Schubversuche an bewehrten Elastomerlagern

Vor Mitteilung der Versuchsergebnisse ist folgendes zu bemerken:

Bei vorliegenden Schubversuchen wurden aufgrund der verwendeten Kraftmeßmethode (vgl. Anlage 1) die Schubwiderstände der Elastomerlager gemessen.

Diese Verschiebewiderstände F_R , aus denen die Schubspannungen mit $\tau = F_R/A$ ($A =$ Lagerfläche) berechnet wurden, entsprechen daher im schwingungstechnischen Sinne nicht den Erregerkräften, sondern den resultierenden Reaktionskräften aus Feder- und Dämpferwirkung, die nur bei niedrigen Verschiebegeschwindigkeiten den Erregerkräften entsprechen. Zur direkten Messung der Erregerkräfte, d.h. der Kraft mit der die Schubverformung aufgebracht wird, hätte zwischen Lager und Gleitschieber ein zweites, praktisch starres Kraftmeßelement angeordnet werden müssen, das jedoch wegen zu hoher Anschaffungskosten nicht zur Verfügung stand.

Im weiteren werden nun die Ergebnisse der Schubversuche mitgeteilt:

Die zeitlichen Verläufe von Schubwiderstand und Gleitwinkel sowie die Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramme (Hysterese-Kurven) sind in den Anlagen 94 und 95 bei Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4 und 150 mm/s und maximalen Gleitwinkeln von $\pm 0,4$ stellvertretend für ein Lager wiedergegeben. Die beiden anderen geprüften Lager zeigten qualitativ ähnliche Abhängigkeiten.

Der beim Nulldurchgang des Gleitwinkels sich aus der Hysterese ergebende Schubspannungswert betrug bei der niederen Verschiebegeschwindigkeit von 0,4 mm/s jeweils etwa das 0,12 bis 0,13fache von $\max \tau$. Bei höheren Verschiebegeschwindigkeiten waren keine eindeutigen Abhängigkeiten erkennbar.

In der Tabelle in Anlage 96 sind die jeweils im Versuch erreichten maximalen Schubspannungen $\max \tau$ in Abhängigkeit vom zugehörigen Gleitwinkel $\max \tan \gamma$ und der Verschiebegeschwindigkeit v zusammengestellt. Außerdem sind dort auch Sekantenschubmoduln G_S angegeben, die in Anlehnung an die bekannte Beziehung $G = \tau / \tan \gamma$ aus den Maximalwerten im Versuch ermittelt wurden. Diese G_S -Werte sind aber mit den bei der Bemessung von Elastomerlagern üblicherweise verwendeten Sehnenwerten des Schubmoduls (i.a. gemessen zwischen $\tan \gamma = 0,2$ und $0,9$) nicht identisch.

In den Diagrammen der Anlagen 97 bis 100 sind die Versuchsergebnisse graphisch dargestellt. Aus diesen Kurven lassen sich folgende allgemeine, bereits aus der Literatur bekannte Aussagen ableiten:

- Die max. Schubspannungen und die Sekantenschubmoduln nehmen mit wachsender Verschiebegeschwindigkeit, also steigender Frequenz zu.
- Der Sekantenschubmodul und damit die Lagersteifigkeit steigt mit abnehmender Schubverformung.
- Der Schubmodul ist stark von der Gummihärte abhängig und nimmt mit wachsender Härte zu (vgl. Anlage 100).
- Der Einfluß der Lagerdicke auf den Sekantenschubmodul ist relativ gering. (Anmerkung hierzu: Nach Anlage 100 sind die G_s -Werte des dickeren Lagers \emptyset 450x159 mm SH 50 (genauer SH 49) etwas kleiner als jene des dünneren Lagers \emptyset 450x99 mm SH 50 (genauer SH 51). Dies dürfte weniger auf die unterschiedliche Bauhöhe sondern mehr auf die etwas voneinander abweichende Shore-Härte SH der beiden Lager zurückzuführen sein).

Der in den Versuchen gemessene, zum jeweils größten Gleitwinkel gehörige Schubwiderstand läßt sich mit großer Genauigkeit durch folgenden Rechenansatz beschreiben:

$$\max \tau = a \cdot (\max \tan \gamma)^b$$

Die Faktoren a und b wurden für die 3 untersuchten Lager aus den Versuchsergebnissen ermittelt und sind folgender Tabelle zu entnehmen.

Lager	\emptyset 450x99 SH51			\emptyset 450x99 SH65		\emptyset 450x99 SH49	
v [mm/s]	0,4	50	150	0,4	150	0,4	150
a [N/mm^2]	0,468	0,56	0,562	0,858	1,01	0,447	0,568
b	0,802	0,766	0,694	0,851	0,74	0,847	0,747
untersuchter Bereich: $0,025 \leq \tan \gamma \leq 0,4$ v = Verschiebegeschwindigkeit, SH = Shore-A-Härte							

Bildet man mit den derart berechneten Werten die Vergrößerungsfaktoren $\tau_v/\tau_{v0,4}$ bzw. $G_{S,v}/G_{S,v0,4}$, d.h. den Quotienten von τ bzw. G_S bei der Verschiebegeschwindigkeit $v = 50$ bzw. 150 mm/s zum entsprechenden Wert bei $v = 0,4$ mm/s, so ergibt sich das Diagramm in Anlage 101. Auch hier zeigt sich der bereits festgestellte Anstieg der Sekantenschubmoduln mit wachsender Verschiebegeschwindigkeit und abnehmendem Gleitwinkel.

Die Versuchsergebnisse können weiterhin formelmäßig zusammengefaßt werden. Ein Vergleich der ermittelten, in obiger Tabelle angegebenen Werte von a und b zeigt, daß beide Faktoren geschwindigkeitsabhängig sind, wobei der Faktor a zusätzlich noch von der Shore-Härte beeinflusst wird. Dies läßt sich mit den vereinfachten Ansätzen

$$a = k \cdot v^g \quad \text{und} \quad b = m \cdot v + n$$

ausdrücken. Die Abhängigkeit der Gummihärte kann in Anlehnung an Angaben in der Literatur zu $k = c \cdot e^{SH/d}$ näherungsweise erfaßt werden.

Nach Bestimmung der einzelnen Koeffizienten aus den Versuchsergebnissen ergibt sich folgende Formel:

$$\max \tau = 0,065 \cdot e^{SH/25} \cdot v^{0,033} \cdot (\max \tan \gamma)^{b' - 0,0007v}$$

(τ in N/mm^2 , v in mm/s, SH = Shore-A-Härte)

Der Faktor b' gilt bei sehr niedriger Verschiebegeschwindigkeit und entspricht etwa dem Faktor b in vorstehender Tabelle. Er lag bei den Versuchen zwischen 0,8 und 0,85 und kann daher zu etwa 0,82 angenähert werden.

Mit obiger Formel sind die vorliegenden Versuchsergebnisse für Verschiebegeschwindigkeiten bis 150 mm/s und Schubverformungen bis $\tan \gamma = 0,4$ genau genug beschreibbar. Ob diese empirische Formel allgemeine Gültigkeit besitzt, müßte allerdings durch weitere Versuche überprüft werden.

6.2 Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten, zentrisch belasteten Verformungsgleitlagern (Versuchsreihe B2)

6.2.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Der Aufbau der Verformungsgleitlager geht aus Anlage 4 hervor und wurde bereits in Abschnitt 4 (s. 8 und 9) ausführlich beschrieben. Bei allen geprüften Lagern war der PTFE-Druchmesser mit 250 mm und der Durchmesser des Verformungsteils (bewehrtes Elastomerlager) mit 450 mm konstant. Die PTFE-Ronden und Gleitbleche wurden für jeden Versuch ausgewechselt und durch neue Teile ersetzt. Die zuvor in Schubversuchen geprüften Elastomerlager (vgl. Abschnitt 6.1) wurden mehrmals wiederverwendet.

Das durchgeführte Versuchsprogramm sowie die einzelnen Versuchsbedingungen sind in der Tabelle von Anlage 102 zusammengestellt.

Die Verformungsgleitlager "VGL 450x99 SH 50" (Elastomerlager: Einbauhöhe 99 mm, Shore-A-Härte ca. 50°) wurden bei Verschiebegeschwindigkeiten des Gleitschiebers von $v = 0,4, 50, 150$ und 2000 mm/s geprüft. Zu Vergleichszwecken wurden die Lager "VGL 450x90 SH 65" (Elastomerlager: Einbauhöhe 99 mm, Shore-A-Härte 65°) und "VGL 450x159 SH 50" (Elastomerlager: Einbauhöhe 159 mm, Shore-A-Härte ca. 50°) zusätzlich bei Verschiebegeschwindigkeiten von $v = 150$ mm/s untersucht. Die mittlere PTFE-Pressung im Versuch lag jeweils bei 30 N/mm^2 , die entsprechende Elastomerpressung bei $9,26 \text{ N/mm}^2$. Die Vorbelastungszeit betrug in jedem Versuch 1 Stunde, der Verschiebeweg ± 75 mm und der Gesamtgleitweg ca. 30 m bzw. 100 m.

Die vorgenommenen Messungen sind ebenfalls in Anlage 102 angegeben. Eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung sowie die Meßgrößenbezeichnungen zeigt Anlage 103.

Die Versuche erfolgten analog zu den Kurzzeitversuchen an Gleitlagern der Versuchsreihe A1. Weitere detaillierte Angaben zur Versuchsdurchführung finden sich daher in Abschnitt 5.1.1 (s. S. 10ff).

6.2.2 Versuchsergebnisse

Zeitlicher Verlauf der Verschiebewiderstände und der Schubverformungen der Elastomerlager

Typische zeitliche Verläufe der Verschiebewiderstände $F_H(t)$ und der Elastomerverformung $s_{EL}(t)$ in der Gleitfuge sind in den Anlagen 104, 108, 110, 112 und 113 für Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4, 50, 150 und 2000 mm/s wiedergegeben.

Die größten Verschiebewiderstände und Elastomerlagerauslenkungen traten jeweils beim Anfahren zu Versuchsbeginn auf und zeigten sich durch ausgeprägte Kraft- bzw. Verformungsspitzen.

Bei Bewegungsumkehr wurden in den nachfolgenden Hüben keine derart hohen Kraftspitzen mehr beobachtet. Die Verschiebewiderstände blieben auch nach 30 m bzw. 100 m aufaddiertem Gleitweg immer unterhalb der Anfahrwerte.

Verhalten der Verformungsgleitlager beim Verschiebevorgang

Um das Reibungs- und Verformungsverhalten der Lager detailliert beschreiben zu können, wurden einige Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramme der als Verformungsteil wirkenden Elastomerlager (Anl. 105, 112(c), 113(c)) sowie die Verschiebewiderstände in Abhängigkeit vom Gleitschieberweg und von der Relativverschiebung in der Gleitfuge aufgezeichnet (Anl. 106, 109, 111, 112(b), 113(b)).

In Anlage 107 sind die beim Verschieben mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,4$ mm/s stattfindenden Vorgänge an Hand schematischer Diagramme ausführlich erläutert.

Für hohe Verschiebegeschwindigkeiten von $v = 2000$ mm/s sind entsprechende Diagramme in den Anlagen 112 und 113 angegeben.

Beim Anfahren aus der Ruhestellung mit geringer Verschiebegeschwindigkeit zeigen die Verformungsgleitlager ein etwas anderes Verhalten als bei den höheren Verschiebegeschwindigkeiten von $v = 50, 150$ und 2000 mm/s:

Bei kleinem v wird sowohl der größte Verschiebewiderstand bzw. die größte Reibungskraft als auch die maximale Schubverformung des Elastomerlagers nach Ende der Haftphase bei Gleitbeginn erreicht, also wenn in der Gleitfuge gerade erste Relativbewegungen auftreten.

Bei höherem v haben in der Gleitfuge bereits Relativbewegungen stattgefunden, bevor Verschiebewiderstand und Elastomerverformung ihren Größtwert erreichen. Diese Relativverschiebungen in der Gleitfuge sind geschwindigkeitsabhängig und betragen etwa 1 mm bei $v = 50$ mm/s, 3 bis 4 mm bei $v = 150$ mm/s und etwa 8 mm bei $v = 2000$ mm/s.

Das geschilderte Verhalten wird damit erklärt, daß sich höhere Verschiebegeschwindigkeiten infolge der Trägheit des Systems erst allmählich aufbauen können. Nach Beendigung der Hafttreibungsphase, während der keine Relativbewegungen in der Gleitfuge auftreten, nimmt die Verschiebegeschwindigkeit weiter zu, so daß die Verschiebewiderstände und damit die Reibungskräfte trotz Gleiten ebenfalls weiter anwachsen. Aus dem zeitlichen Verlauf von Gleitschieberweg und Relativverschiebung bei den Versuchen mit $v = 2000$ mm/s (Anl. 112 und 113) ist abzulesen, daß Verschiebewiderstand und Elastomerauslenkung Größtwerte annehmen, kurz bevor der Gleitschieber über eine längere Wegstrecke mit nahezu konstanter, maximaler Geschwindigkeit von etwa 2000 mm/s bewegt wird.

Infolge des zwar kurzzeitigen, jedoch allmählichen Anstiegs der Gleitschiebergeschwindigkeit in der Anfahrphase ist auch die Geschwindigkeit, mit der das Elastomerlager verschoben wird, geringer als die max. Gleitschiebergeschwindigkeit, was bei den Versuchsauswertungen auch festgestellt wurde. Dabei spielt die Schubsteifigkeit des Elastomerlagers eine Rolle: Je weicher das Lager (größere Einbauhöhe, kleinere Shore-Härte) desto später wird der max. Verschiebewiderstand bzw. die größte Reibungskraft erreicht; umso höher ist daher auch die Geschwindigkeit der Schubauslenkung des Elastomerlagers. Bei Bewegungsumkehr liegen ähnliche Verhältnisse vor.

Größe der Verschiebewiderstände und der Schubverformungen der Elastomerlager, Abhängigkeit vom Gleitweg (Gleitwegcharakteristik)

In den Anlagen 114 bis 125 sind die maßgeblichen Versuchswerte wie Reibungszahl und Schubspannung τ , Gleitwinkel $\tan\gamma$ und Sekantenschubmodul G_s für alle 18 Versuche dieser Versuchsreihe in Abhängigkeit vom

Gleitweg tabellarisch angegeben und in Diagrammen dargestellt. Außerdem sind die in etwa erreichten maximalen Verschiebegeschwindigkeiten der Elastomerlager sowie die mit einem Fühler gemessenen Temperaturen an der Schmalseite der Gleitplatte zum jeweiligen Versuchsbeginn und am Versuchsende in die Tabellen mit aufgenommen.

In der Tabelle von Anlage 126 sind die Mittelwerte oben genannter Größen für alle Versuche dieser Versuchsreihe zusammenfassend aufgeführt.

Die Reibungszahlen wurden dabei aus den gemessenen Verschiebewiderständen F_H und den aufgebrachten Vertikallasten F_V nach der Beziehung $\mu = F_H/F_V$ ermittelt. Die Schubspannungen τ der Elastomerlager ergeben sich dann zu $\tau = \mu \cdot \sigma_{EL}$, wobei σ_{EL} die mittlere Pressung der Elastomerlager infolge der Vertikallast angibt. Die Gleitwinkel $\tan \gamma$ wurden aus den gemessenen maximalen Schubverformungen der Elastomerlager s_{EL} und mit der bekannten Nettodicke T_N der Elastomerlager zu $\tan \gamma = s_{EL}/T_N$ berechnet.

Aus den angeführten Diagrammen und Tabellen ist abzulesen, daß sowohl die max. Reibungszahlen und die zu ihnen affin verlaufenden Größtwerte der Schubspannungen als auch die max. Schubausslenkungen nach den beim Anfahren vorhandenen Höchstwerten bei der nachfolgenden Bewegungsumkehr auf ein Minimum abfallen und danach mit zunehmendem Gleitweg wieder allmählich ansteigen. Auch nach 30 bzw. 100 m Gesamtgleitweg werden die Anfahrwerte nicht mehr erreicht, da die Zeitspanne ohne Bewegung in der Gleitfuge bei Bewegungsumkehr wesentlich geringer ist als bei der planmäßigen, einstündigen Vorbelastungszeit vor dem Anfahren.

Die Sekantenschubmoduln sind über den gesamten Gleitweg wenig veränderlich. Die etwas niedrigeren Werte nach der ersten Bewegung rühren daher, daß die Schubverformungen bei geringer Kraftänderung während des Gleitens meist wieder etwas zunehmen, die ausgewerteten Daten sich jedoch immer auf die Maximalwerte von Kraft und Verformung beziehen.

Wie bei Verformungsgleitlagern nicht anders zu erwarten, sind die Schubausslenkungen bzw. Gleitwinkel des Verformungsteils aufgrund der niedrigen Reibungszahlen des Gleitlagers und damit der geringen auf das Elastomerlager übertragenen Schubkräfte klein.

Die Größe von Gleitwinkel und Sekantenschubmodul hängt dabei von der Steifigkeit der Elastomerlager ab, also insbesondere von der Shore-Härte. Dies zeigt ein Vergleich der drei bei gleicher Verschiebegeschwindigkeit von 150 mm/s geprüften, jedoch mit unterschiedlich steifen Verformungsteilen versehenen Lager (vgl. Anl. 127 bzw. Tab. Anl. 126).

Die Reibungszahlen werden durch die Steifigkeit der Elastomerlager kaum merklich bzw. nur insofern beeinflusst, daß - wie bereits geschildert - die effektive Verschiebegeschwindigkeit bei Erreichen der größten Reibungskraft sich mit der Steifigkeit etwas ändert.

Die im Versuch erreichten Gleitwinkel können unter gewissen Einschränkungen mit Hilfe der im Abschnitt 6.1.2 für Elastomerlager abgeleiteten Beziehungen, die allerdings nur bis zu Verschiebegeschwindigkeiten von 150 mm/s gültig sind, berechnet werden.

Mit gegebener Schubbeanspruchung des Elastomers, die durch die im Versuch erreichte Reibungszahl bekannt ist, ergeben sich mit den genannten Formeln beim Anfahren rechnerische Gleitwinkel, die mit den Versuchswerten relativ gut übereinstimmen. Wenn man in die Formeln statt der max. Gleitschiebergeschwindigkeit jene Geschwindigkeit einsetzt, mit der das jeweilige Elastomerlager verschoben wurde, werden noch bessere Übereinstimmungen festgestellt.

Die rechnerischen Gleitwinkel bei Bewegungsumkehr sind kleiner als im Versuch, auch wenn man wiederum die gegenüber der max. Gleitschiebergeschwindigkeit wesentlich geringere Verschiebegeschwindigkeit des Elastomerlagers verwendet. Dies wird darauf zurückgeführt, daß in der Gleitphase die Schubverformungen sich wieder etwas vergrößerten, ihre Maximalwerte jedoch ausgewertet wurden.

Geschwindigkeitsabhängigkeit der Versuchswerte, Erhöhungsfaktoren

Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungszahl, der Schubverformung und des Sekantenschubmoduls geht für die Verformungsgleitlager "VGL 450x99 SH 50" aus den Diagrammen in Anlage 128 hervor. Mit wachsender Verschiebegeschwindigkeit nehmen die genannten Größen, deren Mittelwerte aus jeweils 3 gleichartigen Versuchen aufgetragen sind, erwartungsgemäß zu.

Zur Beschreibung der Geschwindigkeitsabhängigkeit können sog. Erhöhungsfaktoren (Quotient aus dem Versuchswert bei $v = 50, 150$ und 2000 mm/s zum Wert bei $v = 0,4$ mm/s) gebildet werden. Deren Verlauf und Größe (Anl. 129 und 130) lassen folgendes erkennen:

Die Reibungszahlen beim Anfahren nehmen mit wachsender Verschiebe-
geschwindigkeit prozentual mehr zu als die Gleitwinkel. Grund hierfür ist
der nicht proportionale Zusammenhang von Gleitwinkel und Schubspannung,
wie bereits aus den Schubversuchen an Elastomerlagern allein hervorging
(vgl. Abschnitt 6.1.2).

Der Erhöhungsfaktor der mittleren Anfahrreibungszahl kann mit der Bezie-
hung

$$\frac{\mu_{A1,v}}{\mu_{A1,v0,4}} = 1,21 \cdot v^{0,21}$$

für den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich in relativ guter
Übereinstimmung mit den mittleren Versuchswerten abgeschätzt werden.

Für vergleichbare Gleitlager mit gleicher PTFE-Pressung und gleichem
PTFE-Durchmesser (vgl. Anl. 48 und 49) ergaben sich die Erhöhungsfaktoren
der Anfahrreibung teils nur halb so groß wie jene für Verformungsgleitla-
ger. Dieses zunächst nicht schlüssige Ergebnis ist jedoch auf folgendes
zurückzuführen:

Bei den geprüften Verformungsgleitlagern lag die Anfahrreibung bei der
kleinen Verschiebe-
geschwindigkeit von $0,4$ mm/s, also die Bezugsgröße zur
Bildung der Erhöhungsfaktoren im Mittel lediglich bei $0,28$ %, während bei
den Gleitlagern der entsprechende Bezugswert $0,62$ % betrug. Gründe hier-
für konnten im Rahmen vorliegender Versuche nicht gefunden werden.

Im Gegensatz dazu waren bei den höheren Verschiebe-
geschwindigkeiten der-
art große Unterschiede zwischen den Reibungszahlen vergleichbarer Gleit-
und Verformungsgleitlager nicht mehr feststellbar. Daher sollte bei bei-
den Lagerarten von gleichem oder ähnlichem geschwindigkeitsabhängigen
Reibungsverhalten ausgegangen werden.

Obige Ausführungen zeigen, daß für die Größe der Erhöhungsfaktoren insbesondere der Bezugswert bei kleiner Verschiebegeschwindigkeit eine wesentliche Rolle spielt. Bei der Ableitung geschwindigkeitsabhängiger Erhöhungsfaktoren sind jedoch auch die Streuungen der Reibungswerte der Einzelversuche vom jeweiligen Mittelwert der unter gleichen Versuchsbedingungen durchgeführten Versuche zu berücksichtigen. Solche Streuungen fielen bei Gleitlagern oft wesentlich größer aus als bei Verformungsgleitlagern.

Aus den dargelegten Gründen wird vorgeschlagen, die aus den Raumtemperaturversuchen an Verformungsgleitlagern abgeleitete, oben angegebene Beziehung auch für die Erhöhungsfaktoren der Anfahrreibung von Gleitlagern im Sinne einer oberen Grenze für Kurzzeitversuche zu verwenden.

Diese Vorgehensweise wird durch folgende Zusatzuntersuchungen (vgl. Anl. 131), weitgehend bestätigt:

In [13] wird vom IBAC (Institut für Bauforschung TH Aachen) über Versuche an einem ausgebauten Brückengleitlager mit unterschiedlichen Verschiebegeschwindigkeiten von 0,04 bis 8 mm/s berichtet. Die aus diesen Versuchsergebnissen berechneten Erhöhungsfaktoren zeigen gleiche Tendenz, liegen aber etwas über der hier vorgeschlagenen Grenzkurve (Anl. 131). Dies könnte durch die Gleitwegabhängigkeit bedingt sein, unter Umständen könnte es auch an der dort verwendeten Meßmethode liegen, da die beim Verschieben auftretenden Massenkräfte überschläglich durch Reibversuche ohne große vertikale Auflast berücksichtigt wurden.

In [9] werden ebenfalls geschwindigkeitsabhängige Reibversuche beschrieben, die an der BAM in Berlin in einem Tribometer bei umlaufender Bewegung mit einer ungeschmierten Gleitpaarung (PTFE-Stahl 100 Cr 6) bei kleinen Pressungen durchgeführt wurden. Obwohl diese Versuche an sich nicht vergleichbar sind mit den hier vorliegenden Kurzzeitversuchen, zeigt sich im unteren Geschwindigkeitsbereich insgesamt eine befriedigende Übereinstimmung mit oben erwähntem Vorschlag.

Weiterhin können zur Absicherung die eigenen Dauergleitprogrammversuche der Versuchsreihe A2 und D herangezogen werden, die abschnittsweise mit Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4 und 2,0 mm/s bzw. 0,1 und 25 mm/s über Gesamtgleitwege von etwa 2,2 km bzw. 10 km vorgenommen wurden. Ab etwa 500 m bzw. 1,2 km Gleitweg sind die Erhöhungsfaktoren direkt aufeinanderfolgender Versuchsabschnitte relativ wenig veränderlich, sie sind

jedoch größer als im jeweils ersten Versuchsabschnitt, also bei kurzem Gleitweg. Nach ca. 6 km Gleitweg ist bei der Versuchsreihe D wiederum zunehmende Tendenz festzustellen. Auch beim Dauergleitprogrammversuch der Versuchsreihe A2, der mit $v = 2 \text{ mm/s}$ und relativ kurzen, zwischengeschalteten Versuchsabschnitten mit $v = 150 \text{ mm/s}$ gefahren wurde, ergeben sich nach 2,2 km Gleitweg wesentlich höhere Faktoren als zu Versuchsbeginn und in den Kurzzeitversuchen. Die Erhöhungsfaktoren für die Verschiebegeschwindigkeit sind demnach gleitwegabhängig und ändern sich zwischen etwa 1 km bis 6 km Gleitweg nicht sehr stark, wenn $v = 25 \text{ mm/s}$ nicht überschritten wird.

Da die entsprechenden Erhöhungsfaktoren in der Nähe der aus den Kurzzeitversuchen ermittelten, oberen Grenzkurve liegen, gleichzeitig aber auch die Versuchsergebnisse des IBAC und der Versuchsreihe D in etwa abdecken, wird vorgeschlagen, diese Grenzkurve auch für längere Gleitwege, jedoch nur bis zu $v = 25 \text{ mm/s}$ und mehr im Sinne einer unteren Grenze zu benutzen.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, daß es infolge der bei Reibversuchen naturgemäß vorhandenen Streuungen schwierig ist, Erhöhungsfaktoren anzugeben, die die Geschwindigkeitsabhängigkeit von Reibungszahlen bei gleichzeitiger Berücksichtigung des Gleitwegeinflusses exakt beschreiben können. Der dargelegte Vorschlag kann daher lediglich zur Abschätzung dienen.

Verformungsmessungen

Die am Gleitteil im unbelasteten Zustand mit einer Schieblehre gemessenen PTFE-Überstände aus dem Aufnahmetopf lagen vor den Versuchen im Mittel bei 2,25 mm, nach den Versuchen bei 2,08 mm. Die mittleren Überstandsänderungen betragen 0,17 mm und waren bei den Versuchen über 100 m Gesamtgleitweg geringfügig größer als bei 30 m Gleitweg. Gegenüber den entsprechenden Messungen an den Gleitlagern der Versuchsreihe A1 ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede.

Die Zusammendrückeungen der Verformungsgleitlager bei Belastung von einer Vorlast von $0,1 F_v$ bis zur Endlast F_v (entsprechende PTFE-Pressung = 30 N/mm^2 , Elastomerpressung = $9,26 \text{ N/mm}^2$) sowie die Verformungszunahmen während der einstündigen Vorbelastungszeit bis zum Beginn der Gleitversuche waren erwartungsgemäß von der Lagersteifigkeit, also der Shore-Härte des Elastomers und der Bauhöhe der Elastomerlager, abhängig. Die Messungen erbrachten folgende Ergebnisse:

Lager	Lagerstauchung bei Belastung von $0,1 F_v$ auf F_v	Verformungszunahme während $t_v = 1 \text{ Std.}$	Dim.
VGL 450x99 SH 50	2,33	0,13	mm
VGL 450x99 SH 65	1,45	0,10	mm
VGL 450x159 SH 50	3,65	0,15	mm

Die angegebenen Mittelwerte beziehen sich auf die Gesamtlagerstauchungen. In ihnen sind daher additiv die Verformungen der PTFE-Ronden und der Elastomerlager enthalten. Berücksichtigt man bei der Belastung PTFE-Zusammendrückeungen von ca. $0,25 \text{ mm}$, die gemäß den Messungen an Gleitlagern zu erwarten sind, werden etwa gleich große Elastomerlagerstauchungen erhalten wie bei den Versuchen an den Elastomerlagern (vgl. Abschnitt 6.1.2).

Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen, Verschleiß

Der Zustand einiger repräsentativer Gleitflächen nach 30 m bzw. 100 m Gesamtgleitweg geht aus den Bildern in den Anlagen 132 bis 137 hervor.

Die Gleitflächen der Verformungsgleitlager zeigten im Aussehen und im Verschleißverhalten keine wesentlichen Unterschiede gegenüber den Gleitflächen gleichartig geprüfter Gleitlager der Versuchsreihe A1, für die bereits ausführliche Zustandsbeschreibungen und zugehörige Erläuterungen vorliegen (vgl. S. 17 bis 25). Die wesentlichen Untersuchungsergebnisse werden daher nochmals in aller Kürze stichwortartig wie folgt zusammengefaßt:

PTFE-Ronden

- Geringe Wulstbildung am Scheibenaußenrand
- Verkleinerung der Schmiertaschen, insbesondere im Randbereich
- örtliche Verschleißspuren auf der Gleitfläche, in Gleitrichtung streifenartig entlang ausgezeichneter Linien verlaufend, vorwiegend im Rondenrandbereich und nur bei Versuchen mit höheren Verschiebegeschwindigkeiten vorhanden
- PTFE-Verschleiß gering wegen kleiner Gesamtgleitwege (Gewichtsverlust kleiner als 1⁰/100 des Rondenursprungsgewichts, Dickenänderung geringer als 1 % der Ursprungsdicke)

Austenitisches Gleitblech

- Feine Kratzspuren auf der Gleitfläche
- Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag am Gleitflächenrand, nur bei Versuchen mit höheren Verschiebegeschwindigkeiten vorhanden

Schmierfett

- Graufärbung des Schmierstoffs, mit wachsendem Gleitweg und höheren Verschiebegeschwindigkeiten zunehmend
- Fettverteilung auf den PTFE-Gleitflächen ungleichmäßig, Bildung einer besser geschmierten Zone im Scheibeninnern (Fetthof), Größe des Fetthofs abnehmend bei längerem Gleitweg, größerer Verschiebungsamplitude, höherer Flächenpressung und Verschiebegeschwindigkeit

Eine detaillierte Beurteilung und Beschreibung der beobachteten Erscheinungen kann, wie bereits erwähnt, den Ausführungen auf den Seiten 20 bis 25 entnommen werden.

6.3 Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten, exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern (Versuchsreihe C)

6.3.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Das durchgeführte Versuchsprogramm geht aus Anlage 138 hervor. Danach wurden 3 geschmierte Verformungsgleitlager (PTFE-Ø 250 mm, Elastomerlager Ø 450 x 99 mm mit Shore-A-Härte von ca. 50) bei einer Verschiebegeschwindigkeit von 0,4 mm/s und einer mittleren PTFE-Pressung von 30 N/mm² geprüft.

Durch einen Keil, der zwischen Elastomerlager und dem unteren Drucktisch der Prüfanlage angeordnet wurde (vgl. Anlage 103), sollte der Einfluß einer Lagerverdrehung untersucht werden. Die Keilneigung wurde in Anlehnung an den in den Zulassungen für den zulässigen Drehwinkel angegebenen Wert zu $\tan\alpha = 0,005$ gewählt. Die Versuche Nr. 1 und Nr. 2 wurden bis zu einem Gesamtgleitweg von 30 m durchgeführt, der Versuch Nr. 3 bis 100 m Gesamtgleitweg. Der Versuch Nr. 2 wurde als Dauergleitprogrammversuch bis zum Erreichen von ca. 2200 m Gesamtgleitweg fortgesetzt (vgl. Abschnitt 6.4). Die vorgenommenen Messungen sind ebenfalls in Anlage 138 angegeben.

6.3.2 Versuchsergebnisse

Im zeitlichen Verlauf der Meßgrößen sowie im Reibungs- und Verschleißverhalten zeigten sich qualitativ keine wesentlichen Unterschiede gegenüber jenen Verformungsgleitlagern, die zentrisch belastet waren, also ohne Keil bei einer Verschiebegeschwindigkeit von 0,4 mm/s in der Versuchsreihe B2 geprüft wurden.

Die Diagramme in Anlage 139, in denen exemplarisch die Abhängigkeit des Verschiebewiderstandes vom Gleitwinkel und von der Verschiebung des Gleitschiebers für ein exzentrisch belastetes Lager wiedergegeben ist, bestätigen bei Vergleich mit den entsprechenden Diagrammen in den Anlagen 105 und 106 obige Aussage.

Die ausgewerteten Versuchsdaten sind in den Anlagen 140 bis 143 in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg aufgetragen, wobei in Anlage 143 zum Vergleich auch die Mittelwerte der zentrisch belasteten Lager mit aufgenommen sind.

Daraus ist zunächst abzulesen, daß das Reibungsniveau bei exzentrischer Belastung der Verformungsgleitlager über den gesamten Gleitwegbereich höher liegt als bei zentrischer Belastung. Ob dies allein auf die Lastexzentrizität zurückzuführen ist, steht damit jedoch nicht eindeutig fest. Denn einerseits sind wiederum die vorhandenen Streuungen der Einzelversuche zu berücksichtigen, andererseits lagen auch die Oberflächentemperaturen der Gleitplatten bei vorliegenden Versuchen etwas tiefer als bei den Versuchen unter zentrischer Last, woraus sich ebenfalls, allerdings nur geringfügige höhere Reibungszahlen ableiten lassen. Darüber hinaus ergibt ein Vergleich mit den Reibungszahlen entsprechender Gleitlager ohne Verformungsteil (vgl. Anlage 21), die zentrisch mit derselben Verschiebegeschwindigkeit bei gleicher mittlerer PTFE-Pressung geprüft wurden und gleiche PTFE-Durchmesser besaßen, daß die mittlere Anfahrreibung solcher Gleitlager noch höher liegt, und die Reibungswerte von Gleit- und exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern bei Bewegungsumkehr praktisch einander entsprechen, also daraus kein wesentlicher Einfluß der Lastexzentrizität ableitbar ist.

Auch das Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen (vgl. Anlage 144) ähnelte dem von zentrisch belasteten Gleit- und Verformungsgleitlagern. Die Lastexzentrizität machte sich lediglich durch die außermittige Lage des besser geschmierten Rondeninnenbereichs (Fetthof) sowie durch einen etwa 0,5 mm größeren Wulst am höher belasteten Rand der PTFE-Scheiben bemerkbar.

Als Ergebnis obiger Ausführungen ist daher festzuhalten, daß die geprüften Verformungsgleitlager, deren Verformungsteile durch einen Keil um 0,005 verdreht bzw. schräggestellt waren, gegenüber ähnlichen, jedoch zentrisch belasteten Gleit- und Verformungsgleitlagern keine wesentlichen Unterschiede im Reibungsverhalten erkennen ließen.

6.4 Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur über 2205 m Gesamtgleitweg an geschmierten, zentrisch und exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern

6.4.1 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Wie bereits in den Abschnitten 6.2 und 6.3 erwähnt, wurde jeweils ein Versuch der Versuchsreihe B2 (ohne Keil) und ein Versuch der Versuchsreihe C (mit Keil, Keilneigung $\tan\alpha = 0,005$) als Dauergleitprogrammversuch weitergeführt. Versuchsbedingungen und Versuchsablauf sind in Anlage 145 angegeben.

Analog zur Versuchsreihe A2 mit Gleitlagern ohne Verformungsteil wurden auch diese Versuche in einzelne Versuchsabschnitte unterteilt. Die mit "Gleiten 1" bezeichneten Versuchsabschnitte wurden jeweils mit einer Verschiebegeschwindigkeit von $v = 0,4 \text{ mm/s}$ bis zu einem Gleitweg von 33 m durchgeführt, bei den mit "Gleiten 2" bezeichneten Versuchsabschnitten war die Verschiebegeschwindigkeit jeweils $v = 2 \text{ mm/s}$ und der Gleitweg 510 m. Die Abschnitte "Gleiten 1" und "Gleiten 2" wurden mehrmals aneinandergesetzt, bis ein Gesamtgleitweg von ca. 2205 m erreicht war.

Vor jeder Änderung der Gleitgeschwindigkeit wurde eine einstündige Standzeit ohne Bewegung zwischengeschaltet. Der Verschiebeweg des Gleitschiebers betrug beim Gleiten $\pm 75 \text{ mm}$. Die Vertikallast $F_V = 1473 \text{ kN}$ (mittl. PTFE-Pressung 30 N/mm^2) wurde während der gesamten Versuchsdauer konstant gehalten.

6.4.2 Versuchsergebnisse

Reibungs- und Verformungsverhalten

Die zeitliche Abhängigkeit von Verschiebewiderstand, Elastomerverformung, Gleitschieberweg und Relativbewegung in der Gleitfuge entsprach beim jeweiligen Anfahren nach der einstündigen Standzeit den von den Kurzzeitversuchen her bekannten Verläufen. Es bildeten sich dabei stets ausgeprägte Haftreibungsspitzen aus. Bei Bewegungsumkehr stellten sich teils

kleine Reibungsspitzen ein, manchmal waren solche jedoch nur noch andeutungsweise vorhanden. In den Gleitphasen nahmen die Schubverformungen der Elastomerlager bei geringer Änderung der Verschiebewiderstände weiter zu.

In den Tabellen der Anlagen 146 (Versuch B2, ohne Keil) und 149 (Versuch C, mit Keil) sind die ausgewerteten Versuchsdaten, die sich immer auf die erreichten Maximalwerte von Verschiebewiderstand und Elastomer-
verformung beziehen, in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg je Versuchsabschnitt aufgeführt. Die zugehörigen graphischen Darstellungen sind in den Anlagen 147, 148 und 150, 151 zu finden.

In den mit $v = 2 \text{ mm/s}$ durchgeführten Versuchsabschnitten (Gleiten 2) treten die größten Reibungszahlen und Elastomer-Schubverformungen immer beim Anfahren nach der einstündigen Standzeit auf. Danach fallen die Werte ab und sind auf längere Gleitstrecken bis zum jeweiligen Abschnittsende nahezu konstant. Beim Lager B2 (ohne Keil) unterscheiden sich dabei die Reibungsniveaus der höheren Versuchsabschnitte nur wenig, während beim Lager C (mit Keil) zunehmende Tendenz mit dem zurückgelegten Gesamtgleitweg zu erkennen ist.

Davon abweichend zeigen die mit $v = 0,4 \text{ mm/s}$ gefahrenen Versuchsabschnitte (Gleiten 1) eine andere Reibungscharakteristik und einen anderen gleitwegabhängigen Verlauf der Schubverformungen. Insbesondere beim Lager C (mit Keil) steigen Reibungszahl und Schubverformung ab Versuchsabschnitt II, also nach 543 m zurückgelegten Gesamtgleitweg, nach dem Anfahren zunächst an, erreichen einen Höchstwert und fallen danach zum jeweiligen Abschnittsende hin wieder etwas ab. Beim Lager B2 (ohne Keil) tritt dies nur in den Versuchsabschnitten II und III auf. Gründe hierfür konnten zunächst keine gefunden werden.

Beim Lager C (mit Keil) jedoch ist dieses ungewohnte Verhalten eindeutig auf die Instabilität des Elastomerlagers zurückzuführen. Denn jeweils einige Doppelhübe nach dem Anfahren wurde beobachtet, daß sich das Elastomerlager bei der Hin- und Herbewegung nicht nur in, sondern auch quer zur Gleitrichtung verformte, wobei die Schubausslenkungen in Querrichtung unregelmäßig groß waren und teils bis zu $\pm 10 \text{ mm}$ betragen. Diese Querschubverformungen erfolgten während der Gleitphasen unkontinuierlich und waren bei Bewegungsumkehr am größten. Sie verliefen nicht nur einsinnig in eine Richtung sondern je nach Bewegungsrichtung der Gleitplatte entweder zur Lagervorderseite oder zur Lagerrückseite hin. Auch in den Versuchsabschnitten mit $v = 2 \text{ mm/s}$ waren solche Querverschiebungen festzustellen, jedoch fielen sie kleiner aus als wie in den Abschnitten mit $v = 0,4 \text{ mm/s}$.

Durch das beschriebene Auswandern des Verformungsteils quer zur Gleitrichtung entstanden auf dem Gleitblech, das nur in der vorgegebenen Verschieberichtung des Gleitschiebers hin- und herbewegt wurde, unterschiedliche Gleitbahnen. Aus diesem Grund nahm das Reibungsniveau in den mit $v = 0,4 \text{ mm/s}$ durchgeführten Versuchsabschnitten nach dem jeweiligen Anfahren zunächst zu und fiel nach einem Einlaufweg von etwa 5 m zum jeweiligen Abschnittsende hin wieder etwas ab.

In Anlage 152 ist der Verlauf der Anfahrreibungszahlen, die sich nach der jeweils einstündigen Standzeit ohne Bewegung einstellten, sowohl für die beiden untersuchten Verformungsgleitlager als auch für das gleichartig geprüfte Gleitlager ohne Verformungsteil (Versuchsreihe A2, vgl. Abschnitt 5.2) in Abhängigkeit vom aufaddierten Gleitweg aufgetragen. Aus der Darstellung ist folgendes zu erkennen:

- Die Anfahrreibung bei einer Verschiebegeschwindigkeit von $v = 2 \text{ mm/s}$ ist erwartungsgemäß bei jedem Lager größer als bei $v = 0,4 \text{ mm/s}$. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Anfahrreibung tritt also deutlich in Erscheinung.
- Hinsichtlich der Gleitwegabhängigkeit nimmt die Anfahrreibung bis zu etwa 1000 m zurückgelegtem Gleitweg insbesondere bei $v = 2 \text{ mm/s}$ relativ stark zu, danach deutet sich eine stabilisierende Tendenz an.
- Das Reibungsniveau des Gleitlagers A2 ohne Verformungsteil ist insgesamt etwas höher als jenes der Verformungsgleitlager B2 und C. Die Abweichungen dürften jedoch noch im Bereich der bei Reibversuchen üblichen Streuungen liegen, so daß daraus keine wesentlichen Unterschiede im Anfahrreibungsverhalten von Gleit- und Verformungsgleitlagern ableitbar sind.
- Das durch einen Keil exzentrisch belastete Verformungsgleitlager C zeigt ab 500 m Gleitweg beim Anfahren nach einer einstündigen Bewegungsunterbrechung kein wesentlich anderes Reibungsverhalten als das zentrisch belastete Verformungsgleitlager B2 ohne Keil.

PTFE-Verformungen und Verschleißmessungen

Die Überstände der PTFE-Ronden aus dem Aufnahmetopf, gemessen im unbelasteten Zustand vor und nach dem jeweiligen Versuch, änderte sich beim Lager B2 (ohne Keil) um rund 0,2 mm, beim Lager C (mit Keil) am stärker gedrückten Rand um etwa 0,3 mm und an der gegenüberliegenden Seite um rund 0,15 mm.

Die örtlich an verschiedenen Stellen der Randzone festgestellte, maximale Dickenabnahme der PTFE-Scheiben lag bei beiden Lagern im Mittel bei etwa 1,5 % der Ursprungsdicke. An der höher beanspruchten Keilseite des Lagers C war sie nur geringfügig höher.

Die verschleißbedingte Gewichtsabnahme der PTFE-Ronden ergab sich bei beiden Lagern zu etwa 1⁰ /₁₀₀ des Ursprungsgewichts. Es hat demnach über einen Gesamtgleitweg von 2205 m ein relativ geringer Verschleiß von PTFE stattgefunden.

Ein Vergleich der oben angeführten Werte mit den entsprechenden Ergebnissen, die am Gleitlager A2 ohne Verformungsteil bei zentrischer Last unter sonst gleichen Prüfbedingungen erhalten wurden (vgl. Abschnitt 5.2.2), zeigt keine wesentlichen Unterschiede, so daß auch hier von ähnlichem Verschleißverhalten von Gleit- und Verformungsgleitlagern ausgegangen werden kann.

Aussehen der Gleitflächen nach dem Versuch

Der Zustand der Gleitflächen nach den Versuchen, also nach 2205 m zurückgelegtem Gesamtgleitweg, geht aus den Bildern in den Anlagen 153 bis 155 hervor.

Auf den Gleitflächen der austenitischen Stahlbleche sind feine, dünne Kratzspuren in Gleitrichtung bei spiegelndem Licht zu erkennen. Beim Lager C (mit Keil) sind diese Kratzspuren infolge der zusätzlichen Schubauslenkungen des Verformungsteils quer zur Gleitrichtung unterschiedlich gerichtet (Anlage 155, Bild 81). In den sichelförmigen Bereichen neben der Scheibenendlage ist ein dünner, streifenartiger, bei entsprechendem Lichteinfall in den Spektralfarben schimmernder Fett- oder Ölfilm sichtbar. Die Fettablagerungen an den Gleitflächenrändern sind außen hell wie die ursprüngliche Fettfarbe. Weiter innen ist das abgelagerte Fett grau, örtlich auch schwarz durch Einlagerung von Schleifpartikeln aus dem Gleitblech verfärbt und ist mit kaum wahrnehmbaren, ganz feinen PTFE-Verschleißprodukten vermischt. Im Scheibeninnenbereich ist kein Fetthof mit deutlich sichtbarem Fettfilm zwischen den Schmieraschenabdrücken mehr erkennbar.

Die Wulstbildung am Scheibenaußenrand der PTFE-Ronden ist gering. Beim Lager C (mit Keil) ist der Wulst am stärker gedrückten Rand etwas größer und beträgt rd. 0,8 mm. Angeschnittene Schmiertaschen am Scheibenrand besitzen nur noch eine geringe Tiefe und sind teilweise fast eingeebnet. Die PTFE-Gleitflächen zeigen in Verschieberichtung streifenartige Verschleißspuren, die an den Schmiertaschenrändern stärker hervortreten. Durch Überstreichen mit dem Fingernagel unter leichtem Druck lassen sich örtlich feine PTFE-Verschleißpartikel aus der PTFE-Oberfläche ablösen.

Das in den Schmiertaschen verbliebene Fett hat sich grau bis schwarz verfärbt, seine Konsistenz ist zäh plastisch. Entnommene Fettkuchen besitzen auf der Rückseite einen dünnen Ölfilm. Die Schmiertaschen sind nicht mehr vollständig mit Fett gefüllt, der Fettspiegel liegt etwas tiefer als die PTFE-Oberfläche (vgl. Anlage 155, Bild 82). Dies weist auf die Fettentnahme bzw. den Fettverbrauch während des Gleitversuchs hin.

6.4.3 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In Dauergleitprogrammversuchen mit abschnittsweise konstanter Verschiebegeschwindigkeit von 0,4 und 2 mm/s wurden zwei Verformungsgleitlager (PTFE- \emptyset = 250 mm, Elastomerlager \emptyset = 450 mm) bei einer mittleren PTFE-Pressung von 30 N/mm² über einen Gesamtgleitweg von ca. 2200 m bei Raumtemperatur geprüft. Der Verschiebeweg je Hub betrug \pm 75 mm. Das Lager B2 war zentrisch belastet, während das Lager C durch Schrägstellung des Verformungsteils mit einem Keil der Neigung 0,005 exzentrisch belastet war. Durch diese Versuche sollte über längere Gleitwege sowohl das Reibungs- und Verschleißverhalten von Verformungsgleitlagern gegenüber Gleitlagern ohne Verformungsteil als auch der Einfluß einer ständigen Lastexzentrizität bei Verformungsgleitlagern untersucht werden.

Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Hinsichtlich Anfahrreibung nach Bewegungsunterbrechung und Verschleißverhalten sich zentrisch belastete Gleitlager und zentrisch oder exzentrisch belastete Verformungsgleitlager etwa gleich. Die verschleißbedingte Gewichtsabnahme der PTFE-Ronden betrug bei allen drei Lagern ca. 1 ‰ des Ursprungsgewichts. Im Aussehen der Gleitflächen nach dem Versuch waren keine großen Unterschiede vorhanden.

Bei Verformungsgleitlagern kann jedoch eine Besonderheit infolge der Instabilität des aus einem bewehrten Elastomerlager bestehenden Verformungsteils auftreten: Durch zusätzliche Auslenkungen des Verformungsteils quer zur Verschieberichtung des Gleitblechs werden die Reibungszahlen bei Bewegungsumkehr und in der Gleitphase ungünstig beeinflusst, was besonders beim Lager C mit Keil beobachtet werden konnte.

Diese Erscheinung kann insofern verallgemeinert werden, daß beispielsweise bei allseits beweglichen Gleitlagern die Verschiebung nicht immer in derselben Richtung erfolgt, sondern unterschiedliche Gleitrichtungen vorkommen können. Hat sich nun bereits eine Hauptgleitrichtung mit entsprechend gerichteten Verschleiß-Kratzspuren im Gleitblech und der PTFE-Gleitfläche ausgebildet und treten von dieser Richtung abweichende Lagerverschiebungen auf, so sind dabei größere Reibungszahlen zu erwarten. Das heißt: Eine nachträgliche Änderung der Gleitrichtung bewirkt größere Reibungszahlen.

7 Gesamtzusammenfassung und Ergebnisse weiterer Zusatzuntersuchungen

7.1 Aufgabenstellung

Im Bauwesen (Hoch- und Brückenbau) wird der Kunststoff Polytetrafluoräthylen (PTEE) insbesondere wegen seiner niedrigen Reibungszahl und seinem günstigen Verschleißverhalten vor allem bei Gleitlagern (i.a. Gleitteil kombinierter Lagerformen wie Verformungsgleitlager, Topfgleitlager, Kalottengleitlager etc.) eingesetzt. Dabei wird heute nahezu ausschließlich die Gleitpaarung PTFE weiß/austentischer Stahl, geschmiert mit Silicofett und Schmierstoffspeicherung mittels fettgefüllter, in die PTFE-Platten eingelassener, kalottenförmiger Schmiertaschen verwendet.

Die Aufgabe von Gleitlagern in einem Bauwerk besteht darin, möglichst zwängungsarme Verschiebungen zwischen einzelnen Bauteilen zu ermöglichen. Solchen Relativbewegungen wirken Gleitwiderstände entgegen, die nach der üblichen Annahme direkt proportional zur lotrechten Lagerkraft sind, mit der Reibungszahl als Proportionalitätsfaktor. Die Reibungszahl ist dabei keine Konstante, sondern eine von Pressung, Temperatur, Verschiebegeschwindigkeit, aufaddiertem Gleitweg und anderen Einflüssen abhängige Größe. Auch ist bei der im Bauwesen vorherrschenden Bewegungsform "hin- und hergehende Verschiebung" (oszillierendes Gleiten) zu unterscheiden zwischen der nach kürzeren oder längeren Standzeiten ohne Bewegung beim Übergang vom Haften zum Gleiten bzw. bei sehr hohen Verschiebegeschwindigkeiten kurz danach sich einstellenden Anfahrreibung (i.a. obere Grenze des Lagerbewegungswiderstandes) und der üblicherweise niedrigeren Gleitreibung während der Verschiebung.

Bisherige Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Gleitlagern wurden vor allem im Rahmen von Güteüberwachungen und im Zusammenhang mit bauaufsichtlichen Zulassungen an Modellagerscheiben mit $\varnothing 75$ mm bei Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4 und 2 mm/s bis zu Temperaturen von -35 °C durchgeführt.

Bei der Güteüberwachung von PTFE, Gleitblech und Fett werden in Kurzzeitversuchen über 20 m Gleitweg folgende Anforderungen an die Anfahrreibungszahlen gestellt:

$T = +21$ °C : $\mu_A \leq 0,012$	Mittl. Flächenpressung : 30 N/mm ²
$T = 0$ °C : $\mu_A \leq 0,018$	Verschiebegeschwindigkeit: 0,4 mm/s
$T = -35$ °C : $\mu_A \leq 0,035$	Vorbelastungszeit : 1 Stunde

In Dauergleitprogrammversuchen wird die Brauchbarkeit der Gleitwerkstoffe und des Schmierfettes für zulassungspflichtige PTFE-Gleitlager über längere Gleitwege bis zu etwa 5 km nachgewiesen. Dabei wird der größte Teil des Gesamtgleitwegs bei Raumtemperatur und mit $v = 2 \text{ mm/s}$ zurückgelegt. In zwischengeschalteten, kurzen Versuchsabschnitten über 20 m Gleitweg wird die Temperatur bis zu $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ stufenweise variiert. Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens liegen inzwischen wenige weitere Modellagerversuche bis zu 20 km Gesamtgleitweg vor.

In den Zulassungen für PTFE-Gleitlager sind folgende, pressungsabhängige Rechenwerte für Reibungszahlen im Temperaturbereich von etwa $+21 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben:

PTFE-Pressung	10	20	30 N/mm^2
Reibungszahl	0,06	0,04	0,03

Diese Werte wurden aus den erwähnten Laborversuchen an Modellgleitlagern abgeleitet und müssen daher alle weiteren im Betrieb möglichen Einflüsse abdecken.

Aufgrund aufgetretener Lagerschäden, die im letzten Jahrzehnt insbesondere an Brückenbauwerken festgestellt wurden, erhielt in Anbetracht der erheblichen Instandsetzungskosten beim Lageraustausch der Forschungsbereich "Lagertechnik" wesentliche Impulse. Neben anderen Ursachen wurden die Lagermängel auch auf die Diskrepanz zwischen den tatsächlich im Bauwerk auftretenden, noch unzureichend bekannten Lagerbeanspruchungen und den an Modellagern in Laborversuchen berücksichtigten Beanspruchungsparametern zurückgeführt.

Über die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungszahlen von PTFE-Gleitlagern liegen bisher nur wenige Informationen vor. Nach allgemeiner Auffassung können bei Brücken je nach Bauart Verschiebegeschwindigkeiten bis zu etwa 25 mm/s aus Verkehrslasten insbesondere infolge LKW und Schienenfahrzeugen auftreten. Im Lastfall Erdbeben sind Gleitgeschwindigkeiten bis zu etwa 200 mm/s , beim Reaktorbau im Lastfall Flugzeugabsturz bis zu etwa 2000 mm/s zu erwarten.

Die Bemessung der Lager und der angrenzenden Bauteile erfolgt in der Regel mit den Reibungszahlen in den Zulassungen, d.h. ohne Berücksichtigung des Einflusses der genannten hohen Verschiebegeschwindigkeiten. Die Hauptzielrichtung der vorliegenden Untersuchungen war daher, für Gleit- und Verformungsgleitlager die Abhängigkeit der Reibungszahlen von der Verschiebegeschwindigkeit experimentell zu untersuchen. In den Versuchen wurden punktuell auch Lagerpressung, Lagergröße, Lastexzentrizität und Gesamtgleitweg variiert.

7.2 Versuchsprogramm

In einer speziell entwickelten Versuchseinrichtung (Anlagen 1 und 2), wurden Gleit- und Verformungsgleitlager (Anlagen 4 und 8) bei hin- und hergehender Bewegung in Kurzzeitversuchen mit Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4 , 50, 150 und 2000 mm/s geprüft. In den Versuchen an Gleitlagern wurde der Einfluß der Pressung und des PTFE-Durchmessers zusätzlich untersucht.

Dauergleitprogrammversuche über ca. 2200 m aufaddiertem Gleitweg mit abschnittsweise veränderlicher Verschiebegeschwindigkeit sollten über das Reibungsverhalten von Gleit- und Verformungsgleitlagern nach längeren Gleitwegen Auskunft geben.

Um das Langzeitverhalten von Brückengleitlagern zu untersuchen, wurden an Gleitlagern mit 250 mm PTFE-Durchmesser Dauergleitprogrammversuche über ca. 10 km aufaddiertem Gleitweg durchgeführt. Zur Simulation von langsamen, größeren Lagerbewegungen infolge Temperatur und schnellen, kleinen Verschiebungen infolge Verkehr wurde der Gleitweg in einzelne Versuchsabschnitte unterteilt, in denen die Verschiebegeschwindigkeit 0,1 mm/s bzw. 25 mm/s und die Wegamplitude ± 75 mm bzw. $\pm 2,5$ mm betrug.

Der Einfluß einer ständigen Lastexzentrizität auf das Reibungsverhalten von Verformungsgleitlagern wurde punktuell bei einer niedrigen Verschiebegeschwindigkeit von 0,4 und 2 mm/s durch Schrägstellung des Verformungsteils mit einem Keil (Neigung 0,005) in Kurzzeitversuchen über 30 bzw. 100 m und in einem Dauergleitprogrammversuch über rd. 2200 m erfaßt.

In einigen Kurzzeitversuchen an zentrisch belasteten Verformungsgleitlagern wurden außerdem Shore-Härte und Einbauhöhe der als Verformungsteil verwendeten Elastomerlager variiert. Begleitende Schubversuche an diesen Elastomerlagern mit Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4, 50 und 150 mm/s und Schubverformungen bis zu $\tan \gamma = 0,4$ wurden vorangestellt.

Eine Gesamtübersicht über das Versuchsprogramm enthält Anlage 3. Alle Lager wurden bei Raumtemperatur geprüft.

7.3 Versuchsergebnisse

7.3.1 Reibversuche an Gleit- und Verformungsgleitlagern

Reibungsverhalten

Die wesentlichen Ergebnisse der Kurzzeit- und Dauergleitprogrammversuche, die mit wenigen Ausnahmen bei einer Vorbelastungszeit von jeweils einer Stunde und mit je 3 Versuchen je untersuchter Parameterkombination vorgenommen wurden, sind in den Anlagen 49, 107, 130, 131, 152, 156 und 157 zusammenfassend dargestellt. Folgende Aussagen zum Reibungsverhalten von Gleit- und Verformungsgleitlagern bei Raumtemperatur lassen sich aus den Versuchsergebnissen ableiten:

- Die bekannte Abnahme der Reibungszahl bei zunehmender PTFE-Pressung wird auch für höhere Verschiebegeschwindigkeiten bestätigt (Anlage 156).
- Mit zunehmendem Lagerdurchmesser zeigen die Reibungszahlen in den Kurzzeitversuchen fallende Tendenz (Anlage 156). Wie und ob sich dieser Geometrieinfluß über längere Gleitwege verändert, konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht eindeutig geklärt werden.
- Mit wachsender Verschiebegeschwindigkeit nehmen die Reibungszahlen zu (Anlage 49, 130). Der Geschwindigkeitseinfluß kann durch sogenannte Erhöhungsfaktoren beschrieben werden (Anlage 131). Er verstärkt sich mit zunehmendem Gleitweg.
- Nach längerer Vorbelastungsdauer unter konstanter Vertikallast ohne Gleitbewegung werden die Anfahrreibungszahlen größer.
- Mit zunehmendem Gleitweg wächst die Anfahrreibung an. Bei Raumtemperatur und $v = 2$ und 25 mm/s erreicht sie nach 1 bis 2 km Gleitweg ein erstes, nahezu konstantes Reibungsniveau und nimmt nach 5 bis 6 km Gleitweg weiter zu (Anlage 152, 157). Die Reibungszahlen bei Bewegungsumkehr steigen bis 10 km praktisch linear an (Anlage 157), besitzen also eine andere Reibungscharakteristik als die Anfahrreibung.

- Die geprüften Verformungsgleitlager zeigen in den Kurzzeit- und Dauer-
gleitprogrammversuchen ein ähnliches Reibungs- und Verschleißverhalten
wie die Gleitlager (Anlagen 49, 130, 152).

Die Schubverformungen und Sekantenschubmoduln des Verformungsteils (be-
wehrtes Elastomerlager) nehmen wie die Reibungszahlen mit der Verschie-
begeschwindigkeit zu (Anlage 130).

Unterschiedliche Shore-Härten und Einbauhöhen des Verformungsteils än-
dern bei zentrischer Belastung die Größe der Reibungszahl praktisch
nicht, während die Schubverformungen und Sekantenschubmoduln von beiden
Größen beeinflußt werden (Anlage 127).

Bei Verformungsgleitlagern hat eine Lastexzentrizität bei Verschiebege-
schwindigkeiten von 0,4 und 2,0 mm/s keinen wesentlichen Einfluß auf
Anfahrreibung und Verschleiß (Anlage 152). Bei solchen Lagern können
jedoch Schubauslenkungen des Verformungsteils quer zur Gleitrichtung
infolge Instabilität der Elastomerlager auftreten, wodurch die Rei-
bungszahlen während der Gleitbewegung größer werden. Bei Abweichung der
Verschiebung von der Hauptgleitrichtung können sich also größere Rei-
bungszahlen einstellen.

Gleitspaltänderungen

Damit ein Gleitlager immer funktionsfähig bleibt, dürfen sich Gleitblech
und PTFE-Aufnahme niemals direkt berühren. Die Gleitspalthöhe, d.h. der
lichte Abstand zwischen Gleitblech und PTFE-Aufnahme bzw. die Überstands-
höhe der PTFE-Scheibe aus der Stahlfassung, ist daher eine wichtige Größe
und ist in den Zulassungen durchmesserabhängig festgelegt. Einerseits
darf sie wegen der bekannten Kaltflußneigung des PTFE (Wulstbildung)
nicht zu groß sein, weswegen ja eine Kammerung der Scheiben erfolgt, an-
dererseits muß aus Sicherheitsgründen noch eine gewisse Mindesthöhe vor-
handen sein, die infolge elastischen und plastischen PTFE-Verformungen
und Verschleiß auch nach längeren Gleitwegen nicht unterschritten wird.
Auch Durchbiegungen der Gleitplatte und des Gleitblechs verkleinern die
Gleitspalthöhe. Zur Abschätzung von Gleitspaltänderungen wurden daher
während der Versuche entsprechende Verformungsmessungen durchgeführt.

Bei zügiger Lastaufbringung können PTFE-Zusammendrückungen aus der bekannten Scheibendicke von rd. 4,5 mm und mit Hilfe des Elastizitätsgesetzes mit mittleren Sekantenmoduln von etwa $E = 375 \text{ N/mm}^2$ für eine mittlere Pressung von $p = 15 \text{ N/mm}^2$, $E = 660 \text{ N/mm}^2$ für $p = 30 \text{ N/mm}^2$ und $E = 700 \text{ N/mm}^2$ für $p = 45 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden, wobei Schwankungsbreiten des E-Moduls bis zu etwa $\pm 20 \%$ auftreten können.

Anschließende Zusatzverformungen unter konstanter Vertikallast ergaben sich bei einer Belastungsdauer von 1 Stunde bzw. 24 Stunden zu maximal 0,04 mm. Während der ca. 9 Tage dauernden Reibversuche über 10 km Gleitweg erhöhten sich die PTFE-Verformungen unter einer konstanten spezifischen Pressung von 30 N/mm^2 infolge Verschleiß und plastischem Verhalten des PTFE zusätzlich um etwa weitere 0,1 mm. In diesen Langzeitversuchen wurden aus den Verformungsmessungen Gleitspaltänderungen von etwa 0,35 mm bestimmt. Die Gleitspalthöhe hat sich also ausgehend von rd. 2,1 mm im unbelasteten Zustand auf ca. 1,75 mm nach 10 km Gleitweg verringert.

Bei exzentrischer Belastung von Verformungsgleitlagern sind am stärker gedrückten PTFE-Rand zusätzliche Druckverformungen von etwa 0,1 mm nach 2 km Gleitweg zu erwarten.

Gleitspaltverminderungen infolge Verformungen der Gleitplatte und des Gleitblechs z.B. bei Auflagerung auf verformungsfähigem, örtlich hochbeanspruchtem Beton wurden in den Versuchen nicht erfaßt, können jedoch im Bauwerk auftreten und müssen daher zusätzlich berücksichtigt werden.

Aussehen der Gleitflächen nach den Versuchen, Verschleiß

Nach den Versuchen wurden alle Lager geöffnet, fotografisch dokumentiert und der Zustand der Gleitflächen augenscheinlich beurteilt. Die beobachteten Erscheinungen können stichwortartig wie folgt beschrieben werden:

PTFE-Ronden:

- Geringe Wulstbildung am Scheibenrand im nicht gekammerten Bereich (Wulstbreite abhängig von Pressung, Gleitweg bzw. Belastungsdauer, Lastexzentrizität)

- Verkleinerung der Schmiertaschen besonders im Randbereich der Ronden
- Örtliche, in Gleitrichtung streifenartig verlaufende Verschleißspuren in schlechter geschmierten Zonen, vorwiegend im Rondenrandbereich entlang der Schmiertaschenränder
- Verschleißbedingte Gewichtsabnahme der Ronden (maximal ca. 15 ‰ des Ursprungsgewichts nach 10 km Gleitweg)
- Dickenänderungen durch PTFE-Verschleiß und plastische PTFE-Verformungen

Austentisches Gleitblech:

- Kratzspuren in Gleitrichtung, meist entlang des Laufbereichs der Schmiertaschenränder
- Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag (nur bei hoher Verschiebegeschwindigkeit am Gleitflächenrand)

Schmierfett:

- Grau- bis Schwarzfärbung des ursprünglich weißen Schmierstoffs infolge Einlagerung metallischer Partikel (Verfärbungsgrad zunehmend mit der Beanspruchung; Eingilbung des Fettes nach längerer Lichteinstrahlung)
- Ungleichmäßige Fettverteilung auf den PTFE-Gleitflächen mit größeren PTFE-Durchmessern als 75 mm: Bildung einer besser geschmierten Zone im Scheibeninnern (Fetthof)
- Änderung der Fettkonsistenz durch Ölverlust und Anreicherung mit Verschleißpartikeln bei Langzeitversuchen
- Fettverbrauch (Abnahme der in der Gleitfläche vorhandenen Fettmenge)

7.3.2 Schubversuche an Elastomerlagern

Die begleitenden Schubversuche an den bei den Reibversuchen als Verformungsteil verwendeten, bewehrten Elastomerlagern ergaben einen Anstieg von Sekantenschubmodul und Schubwiderstand mit wachsender Verschiebegeschwindigkeit und abnehmendem Gleitwinkel (Anlage 101). Der maximale Schubwiderstand der geprüften Elastomerlager kann bis zu Verschiebegeschwindigkeiten von 150 mm/s und Gleitwinkeln bis $\tan \gamma = 0,4$ aus der empirischen Formel

$$\max \tau \approx 0,065 \cdot e^{SH/25} \cdot v^{0,033} \cdot (\max \tan \gamma)^{0,82-0,0007 \cdot v}$$

(τ in N/mm^2 , v in mm/s , SH = Shore-A-Härte)

ermittelt werden.

7.4 Erläuterung des Reibungs- und Verschleißverhaltens geschmierter Gleitlager

Bei der vorliegenden Schmierkonzeption handelt es sich um keine Dauerschmierung, sondern um eine einmalige Schmierung, deren Wirksamkeit mit der Benutzungsdauer je nach Größe der Beanspruchungsparameter mehr oder weniger abnimmt. Eine Nachschmierung der Gleitflächen kann lediglich durch das in den Schmiertaschen gespeicherte Fett erfolgen.

Bei neu geschmierten Lagern wird vermutlich der größte Teil der Last zunächst hydrostatisch bei ruhender Belastung oder hydrodynamisch bei zusätzlicher Gleitbewegung durch das in der Gleitfläche enthaltene Fett übertragen und nur ein geringer Teil durch sich direkt berührende Rauigkeitsspitzen. Das Fett in den Schmiertaschen und die sie umgebenden Bereiche stehen dabei unter etwa gleich hohem Druck, der jedoch im Scheibeninnern kleiner ist als im Randbereich, wie mit Hilfe von Druckmeßfolien an PTFE-Durchmessern von 250 mm nachgewiesen wurde. Die Fettverteilung in der Gleitfläche entspricht etwa der Pressungsverteilung: In den Bereichen höheren Drucks in Randnähe ist nur noch ein dünner Schmierfilm vorhanden, während im Scheibeninnern mit der niedrigeren Pressung sich ein deutlicher "Fetthof" mit mehr Schmierstoff neben den Schmiertaschen zeigt. Bei den kleinen Lagerdurchmessern von 75 mm fehlt dieses Fettpolster, was entweder auf eine andere Pressungsverteilung oder auf eine über den ganzen Scheibendurchmesser reichende, stärkere Fettverdrängung während der einstündigen Vorbelastungszeit zurückgeführt wird, so daß sich höhere Anfahrreibungszahlen mit kleiner werdendem Lagerdurchmesser ergeben.

Die Größe des Fetthofs im Scheibeninnern nimmt mit zunehmender Flächenpressung und Verschiebegeschwindigkeit sowie mit wachsendem Gleitweg ab, wobei der Verschiebeweg je Hub ebenfalls eine Rolle spielt: So war beispielsweise bei einer Verschiebungsamplitude von ± 75 mm und einer Verschiebegeschwindigkeit von $v = 2$ mm/s der Fetthof bereits nach ca. 2 km Gleitweg nahezu verschwunden, während bei $\pm 2,5$ mm Hub und $v = 25$ mm/s auch noch nach 10 km Gleitweg ein besser geschmierter Innenbereich mit geringem Verschleiß zu erkennen war. Der Schmierzustand der Gleitfläche wird also nicht nur von der Pressung, der Verschiebegeschwindigkeit und

dem Lagerdurchmesser beeinflußt, sondern auch vom aufaddierten Gleitweg und vom Verschiebeweg je Hub, von denen wiederum der Fettverbrauch, d.h. die während der Hin- und Herbewegung aus dem Gleitspalt nach außen abgegebene Fettmenge abhängig ist.

Aufgrund der festgestellten Pressungs- und Schmiermittelverteilung beginnt der Verschleiß, der sich durch örtliche Kratzer im Gleitblech und durch örtlichen PTFE-Abtrag äußert, bei größeren Lagerdurchmessern in der Randzone und zwar vorwiegend in solchen Bereichen, die nicht mehr von den bei der Gleitbewegung überstrichenen Nachschmierbereichen der Schmiertaschen erfaßt werden. Daher sollte die Anordnung des Schmiertaschenrasters zur Gleitrichtung so gewählt werden, daß ein möglichst großer Teil der PTFE-Gleitfläche nachgeschmiert wird (z.B. wie in Anlage 8).

Die Verschleißerscheinungen werden durch die mit der Beanspruchungsdauer abnehmende Schmierwirkung und weitere Vorgänge verursacht. Infolge der bei der Hin- und Herbewegung stattfindenden, ständigen Fettabgabe aus dem Gleitspalt läßt örtlich die hydrodynamische Wirkung mit der Zeit nach, so daß es in den schlechter geschmierten Zonen immer mehr direkte Kontaktstellen zwischen PTFE und Gleitblech geben wird. Es wird weiter vermutet, daß der Fettdruck in den Schmiertaschen durch die ständige Fettentnahme allmählich absinkt, somit immer weniger Fett aus den Schmiertaschen in den Gleitspalt eingespeist und die aufgebrachte Last zunehmend auf die Bereiche neben den Schmiertaschen umgelagert wird. Die beobachtete Verkleinerung der Schmiertaschen im Randbereich der größeren Ronden wird hauptsächlich auf das plastische Nachfließen von PTFE-Material infolge dieser Fettdruckverminderung, weniger auf Verschleißabtrag zurückgeführt.

Je nach Beanspruchungsgrad nehmen außerdem Zähigkeit und Konsistenz des Schmierstoffs mit wachsendem Gleitweg zu. Als Ursache hierfür wird ein Abscheiden von Siliconöl sowie eine Anreicherung des Fettes mit PTFE-Verschleiß- und metallischen Partikeln vermutet, deren Einlagerung in das Fett eine Verfärbung hervorruft. Durch die metallischen Feinstpartikel kann ein zusätzlicher Kornreibverschleiß an weniger gut geschmierten Stellen stattfinden.

7.5 Tribologisches System Gleitlager

Die bei Reibungs- und Verschleißprozessen auftretenden, komplexen Vorgänge können mit Hilfe der in der Tribologie angewandten Systemanalyse (vgl. DIN 50320) beschrieben werden.

In Anlage 158 werden die komplizierten Zusammenhänge am Beispiel eines Versuchsgleitlagers erläutert:

Auf die Struktur des Tribosystems, das durch die beteiligten Stoffe gebildet wird, wirkt ein Beanspruchungskollektiv ein, wodurch infolge Wechselwirkung der Elemente Verschleiß erzeugt wird. Die Verschleißkenngrößen und damit auch die Reibungszahlen sind dabei keine Systemkonstanten sondern von zahlreichen Parametern, insbesondere auch von Größe, Art und zeitlichem Ablauf der Einwirkungen abhängig.

Die wichtigsten Einflußgrößen auf die Anfahrreibungszahlen geschmierter Gleitlager sind in Anlage 159 nochmals zusammengestellt.

7.6 Zusatzuntersuchungen

In Anlage 160 sind die Ergebnisse umfangreicher, zusätzlicher Auswertungen der eigenen Versuche und von Versuchen aus der Literatur (vgl. [1], [11], [13]) angegeben. Es wurde dabei versucht, zunächst verschiedene Einzeleinflußgrößen bei jeweils konstant gehaltenen anderen Parametern rechnerisch zu erfassen. Zur Überlagerung der hier untersuchten Einflußparameter - Pressung, Temperatur, Verschiebegeschwindigkeit und PTFE-Durchmesser - wird ein Produktansatz vorgeschlagen. Der Einfluß von Vorbelastungs- bzw. Standzeiten ohne Gleitbewegung und der Einfluß des Gesamtgleitweges konnte in die Formeln nicht mit einbezogen werden. Ausgehend von einem bekannten Bezugswert der Anfahrreibung, der sich nach einem bestimmten Gleitweg bei einer bestimmten Standzeit eingestellt hat, können daher die Auswirkungen oben erwähnter Einflüsse mit den angegebenen Rechenansätzen lediglich zum selben Zeitpunkt abgeschätzt werden.

Infolge der Vielzahl weiterer Einflußgrößen und der dadurch bedingten Streuungen bei Reibversuchen können die vorgeschlagenen Ansätze nur als Arbeitshypothese zur qualitativen Trendvorhersage dienen. Weitere Erkenntnisse und Feststellungen, die sich bei diesen Auswertungen ergaben, sind in Anlage 160 ebenfalls mit aufgeführt.

7.7 Schlußbemerkungen

Reibung und Verschleiß geschmierter Gleitlager hängen von sehr vielen Einflußparametern ab. Insbesondere die Auswirkungen einer gleichzeitigen Überlagerung der Einflüsse Pressung, Temperatur, PTFE-Durchmesser, Standzeit und Verschiebegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom aufaddierten Gleitweg sind noch wenig bekannt. Auch fehlen bisher entsprechende Vergleichskenngößen, die alle wesentlichen Einflüsse auf Reibung und Verschleiß erfassen. Der in der Literatur oft zitierte $p \cdot v$ -Wert kann allein nicht maßgebend sein, da darin andere, wesentliche Größen nicht enthalten sind. Als zusätzliche Verschleißkenngöße könnte beispielsweise auch die geleistete Reibarbeit zur Beurteilung von Verschleißvorgängen mit herangezogen werden.

In Laborversuchen werden sich je nach Größe und zeitlichem Ablauf der gewählten Beanspruchung entsprechende Reibungs- und Verschleißverhältnisse einstellen. Dabei können wohl einzelne Einflußparameter studiert werden, die Ergebnisse sind jedoch lediglich für die vorgegebenen Versuchsbedingungen gültig. Ohne genauere Kenntnis der tatsächlichen Beanspruchung eines Lagers im Bauwerk ist daher eine Vorhersage des Reibungs- und Verschleißverhaltens aufgrund von Versuchen allein nur bedingt möglich. Beispielsweise können bei Brückengleitlagern infolge Verkehrslasten bekanntlich große Gesamtgleitwege zustande kommen. Mit den in den Normen zur Bauwerksbemessung festgelegten Lastannahmen können die zu erwartenden Gesamtgleitwege und sonstigen Einflußgrößen jedoch nicht realistisch genug abgeschätzt werden. Von wievielen Zusatzparametern allein das tatsächliche Beanspruchungskollektiv eines Brückengleitlagers abhängig ist, zeigt die schematische Zusammenstellung in Anlage 161. Entsprechende Untersuchungen an eingebauten Brückenlagern, die zur Klärung dieser offenen Fragen beitragen sollen, werden zur Zeit von verschiedenen Institutionen durchgeführt.

Die Lebensdauer eines Gleitlagers im Bauwerk ist wegen der komplexen Zusammenhänge und wegen der zahlreichen, sich überlagernden Einflüsse nur schwer vorhersagbar. Gleitlager sind daher als Verschleißteile anzusehen, welche im Laufe der Zeit überprüft und nach längerer, bisher nicht vorherbestimmbarer Betriebsdauer möglicherweise gewartet, repariert oder ausgewechselt werden müssen. Diesbezügliche Forderungen sind in den einschlägigen Normen enthalten.

Bei der Bauwerks- und Bauteilbemessung muß der entwerfende Ingenieur sich darüber bewußt sein, daß die Reibungszahl keine konstante Größe darstellt. Zur Ermittlung der Verschiebewiderstände von PTFE-Gleitlagern sind daher entsprechende Grenzwertbetrachtungen anzustellen, mit denen günstige oder ungünstige Wirkungen erfaßt und die jeweils für einzelne Bauteile maßgeblichen Überlagerungskombinationen abgeschätzt werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Eggert, Grote, Kauschke: "Lager im Bauwesen", Band I: Entwurf - Berechnung - Vorschriften, 1974, Verlag Wilh. Ernst & Sohn
- [2] Andrä, Beyer, Wintergerst: "Versuche und Erfahrungen mit neuen Kipp- und Gleitlagern", Der Bauingenieur, 37 (1962), Heft 5, S. 174 ff.
- [3] Andrä, Leonhardt: "Neue Entwicklungen für Lager von Bauwerken, Gummi- und Gummitopflager", Die Bautechnik 39 (1962), Heft 2, S. 37 ff.
- [4] Wellinger, Uetz, Hakenjos: "Gleitreibungsversuche mit Teflon", VDI-Z. 104 (1962), Nr. 28, S. 1434 ff.
- [5] Uetz, Hakenjos: "Gleitreibungsuntersuchungen mit Polytetrafluoräthylen bei hin- und hergehender Bewegung", Die Bautechnik 44 (1967), Heft 5, S. 159 ff.
- [6] Uetz, Hakenjos: "Gleitreibungs- und Gleitverschleißversuche an Kunststoffen", Kunststoffe, 59. Jahrg. (1969), H. 3, S. 161 ff.
- [7] Hakenjos, Richter: "Dauergleitreibungsverhalten der Gleitpaarung PTFE weiß/Austenitischer Stahl für Auflager im Brückenbau", Straße-Brücke-Tunnel 1975, H. 11, S. 295 ff.
- [8a] Maissen, A.: "Versuche mit Brückenlagern" Schweizerische Bauzeitung, 96 (1978), Heft 13, S. 222 ff.

- [8b] Maissen, A.: "Reibungswiderstand von PTFE-Gleitlagern, Einfluß von Alterung und Verschmutzung", Prüfungsbericht Nr. 45 873, CH-Dübendorf: EMPA, 1982
- [9] Mittmann, Czichos: "Reibungsmessungen und Oberflächenuntersuchungen an Kunststoff-Metall-Gleitpaarungen", Materialprüfung 1975, Nr. 10, S. 366 ff.
- [10] Müller-Rochholz, Fiebrich: "Eine Prüfeinrichtung für Baulager-Anforderungen, Konzeption, Realisierung, Leistungen", Materialprüfung 23 (1981), Nr. 2, S. 37 ff.
- [11] Hakenjos, Gerber: "Langzeit-Reibungs- und Verschleißversuche mit PTFE-Gleitlagern, Gleitpartner austenitischer Stahl in Ausführungsart III d", Forschungsbericht aus dem Bauforschungsbereich des Instituts für Bautechnik in Berlin, MPA Stuttgart 1984
- [12] Hakenjos, Richter, Gerber, Wiedemeyer: "Untersuchung der Bewegungen von Brückenbauwerken infolge Temperatur und Verkehrsbelastung am Beispiel einer Stahlbrücke", Stahlbau 1985, H. 2, S. 55 ff.
- [13] Döpmeier, Schwamborn: "Ermittlung der vorhandenen Reibungszahlen bei PTFE-Gleitlagern nach langer Betriebsdauer", Forschungsbericht F 204 des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen, 1987, Auftraggeber: BMV

- [14] Sasse, H.R.: "Gleit- und Verformungslager im Hoch- und Brückenbau", VDI-Berichte Nr. 384, 1980, S. 103 ff
- [15] Eggert, H.: "Vorlesungen über Lager im Bauwesen", 1981, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin-München
- [16] Eggert, Hakenjos: "Die Wirkungsweise von Kalottenlagern", Der Bauingenieur 49 (1974), S. 93 ff
- [17] Rahlwes, K.: "Lagerung und Lager von Bauwerken", Beton-Kalender 1985, Teil II, S. 543 ff
- [18] Pfohl, H.: "Reaktionskraft am Festpunkt von Brücken aus Bremslast und Bewegungswiderständen der Lager", Der Bauingenieur 58 (1983), S. 853 ff
- [19] Hehn, K.-H.: "Prüfeinrichtung zur Untersuchung von Lagern", VDI-Z. 118 (1976), Nr. 3-Februar (I)
- [20] Müller, Dickerhoff: "Untersuchung der zulässigen Lagerplattendurchbiegung und Verformung", Teil I u. II, Forschungsbericht des Instituts für Beton und Stahlbeton der Universität Karlsruhe (TH), 1976 und 1978, Auftraggeber: BMV, IfBt Berlin
- [21] Dickerhof, Hehn, Rösch: "Lagerplatten-Bruchversuche", Forschungsbericht des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH), 1985, Auftraggeber: IfBt Berlin

- [22] Dickerhof, K.: "Bemessung von Brückenlagern unter Gebrauchslast", Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1985
- [23] N.N. "Die Normenreihe DIN 4141 - Lager im Bauwesen", Kurzfassung von Referaten mehrerer Autoren, Veranstaltungunterlagen zur Fachveranstaltung Nr. F-40-306-043-6 im Haus der Technik e.V., Essen, März 1986
- [24] Petersen, C.: "Zur Beanspruchung moderner Brückenlager - Eine Parameterstudie", Festschrift J. Scheer zum 60. Geburtstag, TU Braunschweig, März 1987
- [25] Franz, G.: "Gummilager für Brücken", VDI-Z.101 (1959) Nr. 12, April
- [26] Topaloff, B.: "Gummilager für Brücken - Berechnung und Anwendung", Der Bauingenieur 39 (1964), Heft 2, S. 50 ff
- [27] Flohrer, Stephan: "Bemessungsdiagramme für die Querkraftkräfte bei Elastomerlagern", Die Bautechnik 52 (1975), H. 9, S. 296 ff und H. 12, S. 420 ff
- [28] Lohmann, D.: "Beiträge zur Berechnung der Elastomere-Lager", Die Bautechnik 55 (1978), H. 1, S. 19 ff und H. 6, S. 190 ff; Die Bautechnik 56 (1979), H. 5, S. 163 ff
- [29] Kamming, W.: "Elastomer-Lager für Pendelstützen - Einfluß der Lager auf die Beanspruchung der Stützen", Der Bauingenieur 55 (1980), S. 455 ff

- [30] Battermann, W.: "Möglichkeiten der Einflußnahme auf die Eigenschaften von Elastomerlagern zur funktionsgerechten Auflagerung von Betonbauteilen", Betonwerk + Fertigteil-Technik 1978, H. 1, S. 37 ff
- [31] Battermann, Köhler: "Elastomere Federung - Elastische Lagerungen", 1982, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin-München
- [32] Kordina, Nölting: "Zur Auflagerung von Stahlbetonbauteilen mittels unbewehrter Elastomerlager", Der Bauingenieur 56 (1981), S. 41 ff
- [33] Kordina, Osteroth: "Zur Auflagerung von Stahlbetonbauteilen mittels unbewehrter und bewehrter Elastomerlager", Der Bauingenieur 59 (1984), S. 461 ff
- [34] Müller, Sasse, Thormälen: "Stützenstöße im Stahlbeton - Fertigteilbau mit unbewehrten Elastomerlagern", DAFStb, Heft 339, 1982, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin-München
- [35] Rössler, G.: "Verteilung der Pressung in der Fuge von elastomer-gelagerten Bauteilen", Forschungsbericht F 233 des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen (Hrsg.), 1986

ANLAGEN

Verzeichnis der Anlagen

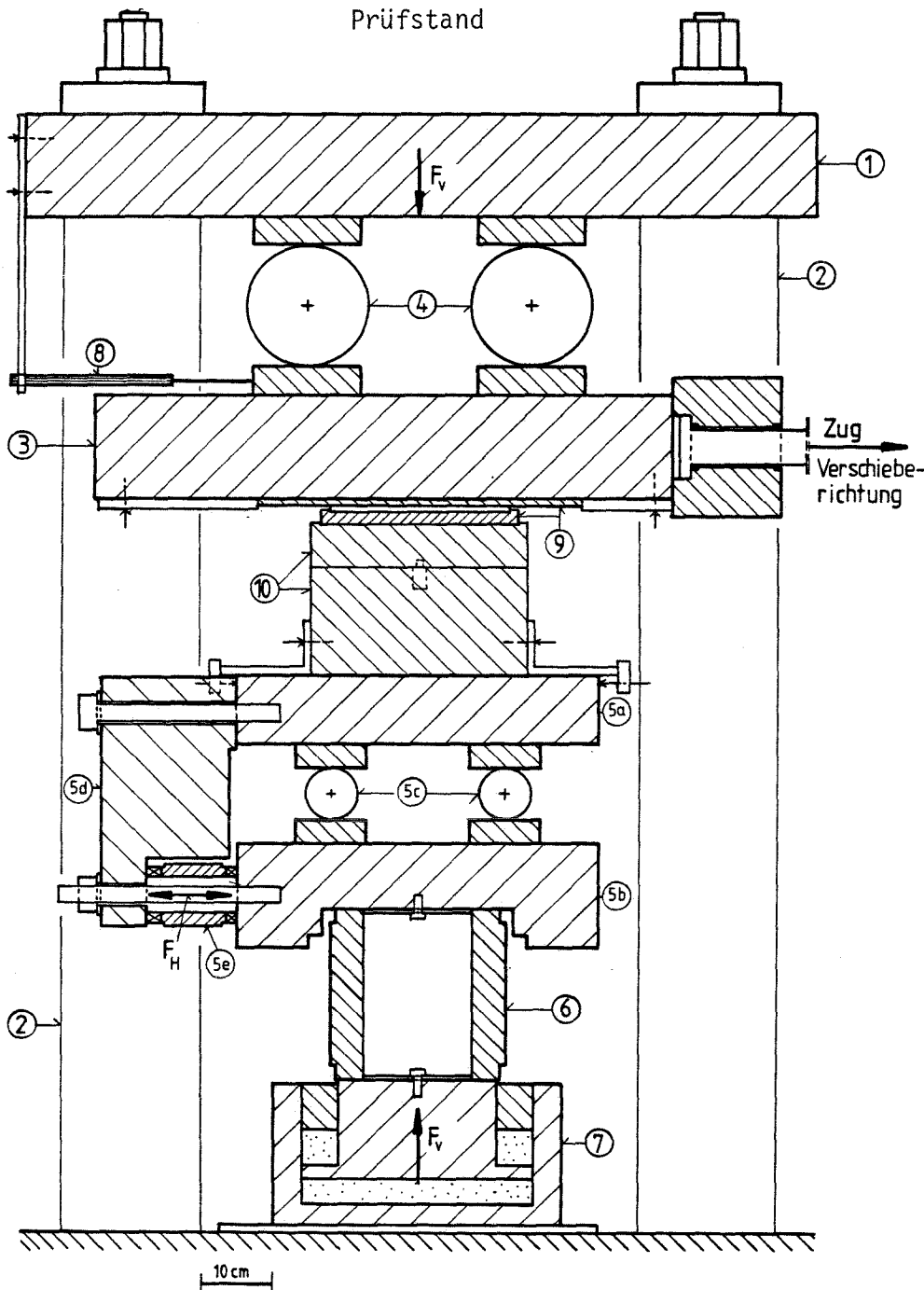
	Anlagen
Versuchsaufbau.....	1 - 2
Versuchsprogramm.....	3
Versuchskörper, verwendete Werkstoffe.....	4 - 8
Versuchsreihe A1 : Kurzzeitversuche an geschmierten Gleitlagern..	9 - 51
Versuchsreihe A2 : Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über ca. 2200 m Gesamtgleitweg....	52-68
Versuchsreihe D : Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über ca. 10000 m Gesamtgleitweg...	69-90
Versuchsreihe B1 : Schubversuche an bewehrten Elastomerlagern....	91-101
Versuchsreihe B2 : Kurzzeitversuche an geschmierten, zentrisch belasteten Verformungsgleitlagern.....	102-137
Versuchsreihe C : Kurzzeitversuche an geschmierten, exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern.....	138-144
Versuchsreihe B2/C: Dauergleitprogrammversuche an geschmierten, zentrisch und exzentrisch belasteten Verfor- mungsgleitlagern über 2205 m Gesamtgleitweg...	145-155
Abhängigkeit der Anfahrreibung von der PTFE-Pressung, der Ver- schiebegeschwindigkeit und vom PTFE-Durchmesser.....	156
Abhängigkeit der Anfahrreibung vom Gleitweg.....	157
Beschreibung von Reibungs- und Verschleißvorgängen mit Hilfe der Systemanalyse.....	158
Zusammenstellung und schematischer Verlauf wichtiger Einflußgrößen auf die Anfahrreibung.....	159
Rechnerische Abschätzung einiger Einflußgrößen auf die Anfahr- reibung aufgrund von weiteren Versuchsauswertungen.....	160
Abhängigkeit des Belastungskollektivs eines Brückengleitlagers....	161

Versuchsaufbau

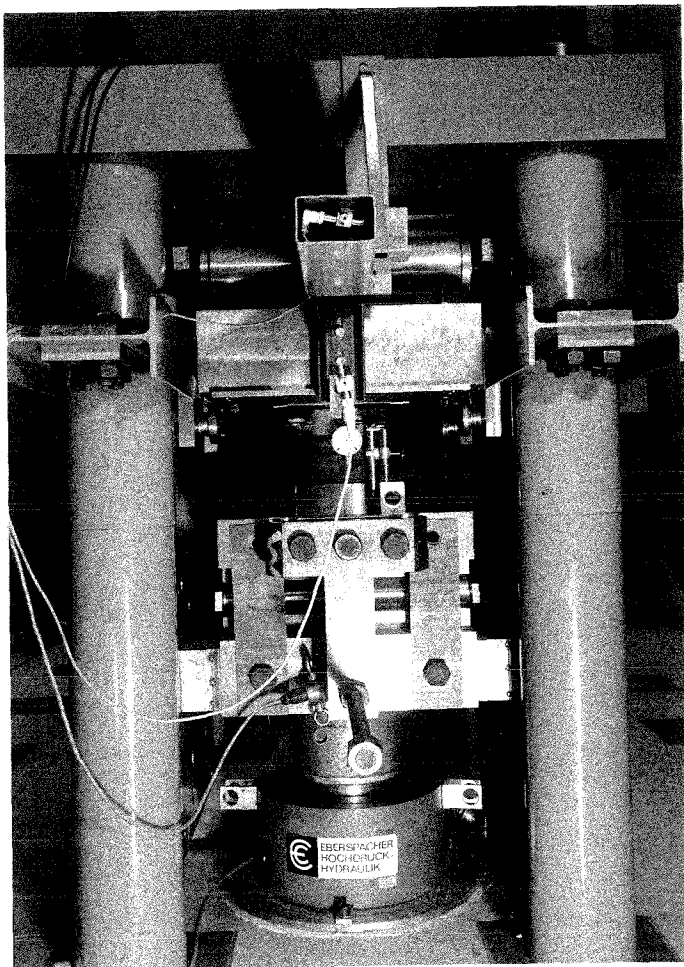
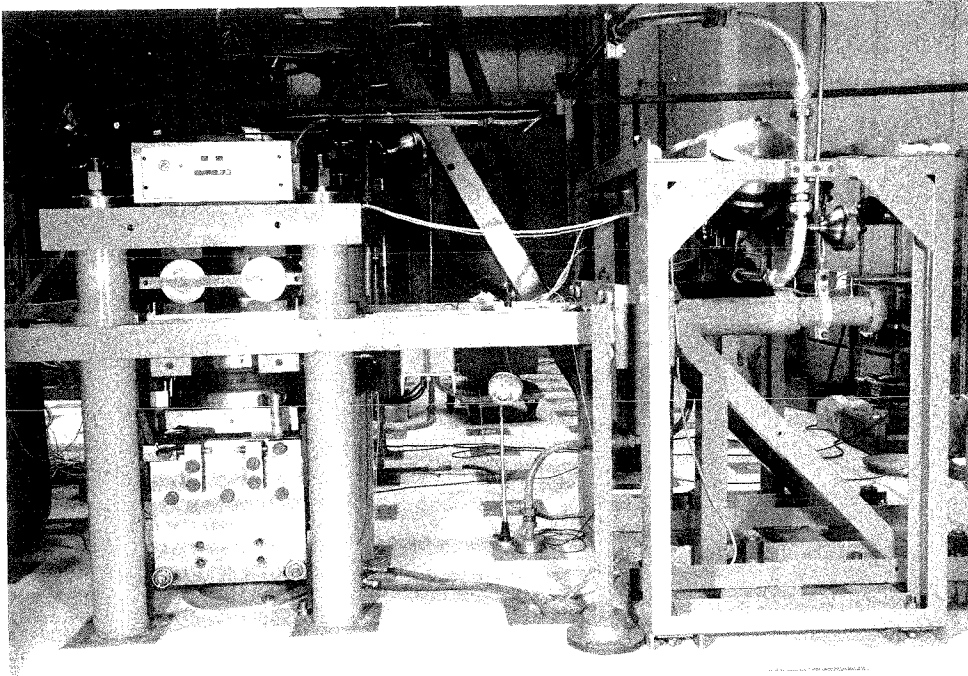
Versuchsprogramm

Versuchskörper, verwendete Werkstoffe

Versuchsaufbau



- ① oberes Haupt
- ② Vertikalpfosten (vorgespannt)
- ③ Gleitschieber (horizontal auf Rollen geführt)
- ④ oberes Rollenlager
- ⑤ Meßlager mit
 - ⑤a oberem Drucktisch
 - ⑤b unterem Drucktisch
 - ⑤c Rollenlager
 - ⑤d Verbindungsteil
 - ⑤e Kraftmeßdose MS40 zur Messung der Horizontalkraft F_H
- ⑥ Kraftmeßdose MS 400 zur Messung der Vertikalkraft F_V
- ⑦ hydraulische Presse zum Aufbringen der Vertikallast F_V
- ⑧ induktiver Wegaufnehmer zur Messung des Gleitschieberweges s
- ⑨ Lager und Gleitteil
- ⑩ Auffütterungen



Versuchsanlage

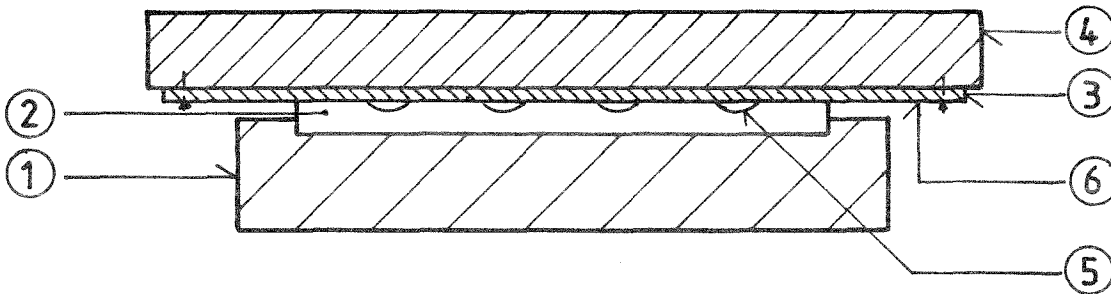
- Gesamtansicht
(links: Prüfstand
rechts: horizontal angeordneter Hydraulikzylinder mit Druckspeichern zum Aufbringen der Horizontalkraft F_H und Horizontalverschieben des Gleitschiebers
- Detailansicht des Prüfstandes von der Seite mit oberem Haupt, Rollenlager, Gleitschieber, Prüfling, Auffütterungen, Meßlager, Kraftmeßdose, Vertikalpresse

Bilder 1 und 2: Versuchsanlage mit eingebautem Verformungsgleitlager

Gesamtübersicht über das Versuchsprogramm

Versuchsreihe (vgl. Leistungsbe- schreibung Ziffer)	A 1 (2 a)	A 2 (2 a+)	B 1 (2 b)	B 2 (2 b)	C (2 c)	D (2 d)
Lager	Gleitlager (geschmiert, ohne Verformungsteil)		Elastomerlager (bewehrt)	Verformungs- gleitlager (geschmiert)	Verformungs- gleitlager (geschmiert)	Gleitlager (geschmiert, ohne Verf.teil)
PTFE: Ø (Soll) [mm] Dicke = 4,5 mm Spalthöhe = 2 mm	75,150,250,450	75, 250	-	250	250	250
Gleitpartner	aust. Stahlblech, 2,5 mm ver- schraubt und geschmiert		-	aust. Stahlblech, 2,5 mm verschraubt und geschmiert		
Elastomerlager: Ø (Soll) [mm] Einbauhöhe [mm] Elastomerdicke [mm] Shore-A	- - - -	- - - -	450 99, 159 71, 115 ~50, ~65, ~50	450 99, 159 71, 115 50, ~65, ~50	450 99 71 ~50	- - - -
Versuchsart	Kurzzeitversuche bei RT	Dauergleit- progr.vers. bei RT	Kurzzeitversuche bei RT (Schubversuche)	Kurzzeit- u. Dauergleit- programmversuche bei RT		Dauergleit- progr.vers. bei RT
Anzahl der Versuche	57	3	32	18	3	3
Belastung (vertikal)	zentrisch	zentrisch	zentrisch	zentrisch	exzentrisch (Keil)	zentrisch
mittlere PTFE- Pressung [N/mm ²]	15; 30; 45	30	-	30	30	30
mittlere Elastomer- Pressung [N/mm ²]	-	-	9,26	9,26	9,26	-
Vorbelastungszeit [h]	1;	1;	-	1;	1;	24; (1)
Weg-Zeit-Funktion (ohne Leerlaufspiel)	linear	linear	linear	linear	linear	linear
Verschiebeweg [mm]	+5;+20;+75;+100	+5; +75	$\tan \gamma$ $\pm 0,025 + \pm 0,4$	+75	+75	+75 u. + 2,5
Gesamtgleitweg [m]	30; 100	2200	-	30; 100; 2200	30; 100; 2200	~10000
Gleitschieberge- schwindigkeit [mm/sec]	0,4; 50; 150; ~2000	0,4; 150; u. 2,0	0,4; 50; 150;	0,4; 50; 150; 2000 0,4 u.2,0	0,4 0,4 u. 2,0	0,1 u. 25

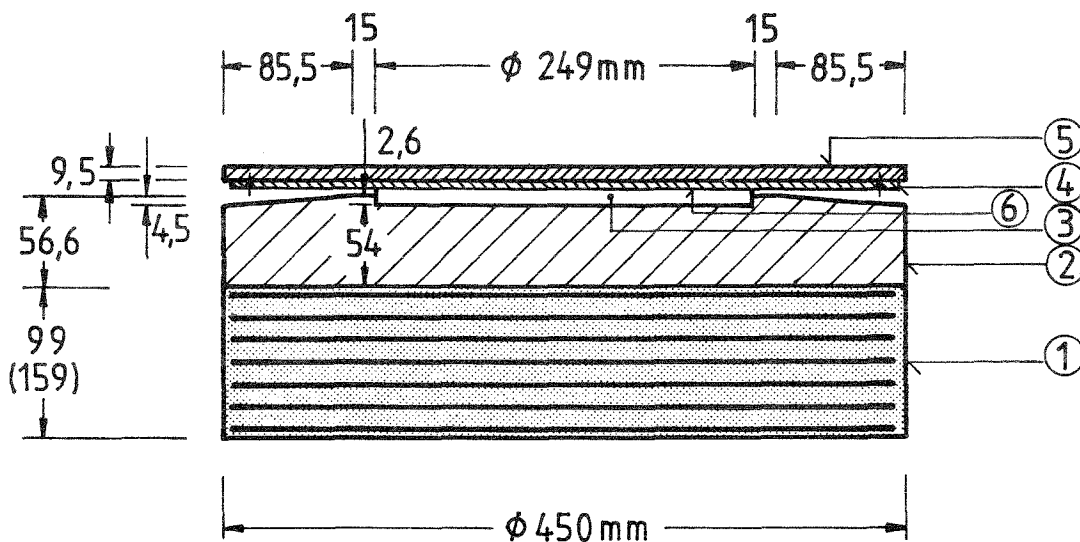
PTFE-Gleitlager



- ① PTFE-Aufnahme
- ② PTFE-Ronde
- ③ Gleitblech
- ④ Gleitplatte
- ⑤ Schmier Tasche mit Siliconfett
- ⑥ Gleitfläche

(Abmessungen vgl. Anlage 6 u. 7)

Verformungsgleitlager

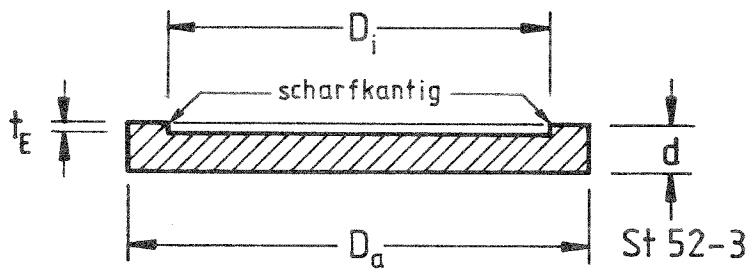


- ① Bewehrtes Elastomerlager $\varnothing 450 \times 99$ bzw. $\varnothing 450 \times 159$ mm
- ② PTFE-Aufnahme $\varnothing 450 \times 56,6$ mm, St 52-3
- ③ PTFE-Ronde $\varnothing 250 \times 4,5$ mm mit Schmier Taschen
- ④ Gleitblech $440 \times 270 \times 2,5$ mm, aust. Stahl
- ⑤ Gleitplatte $450 \times 300 \times 9,5$ mm, St 52-3
- ⑥ Gleitfläche

Übersicht der verwendeten Werkstoffe:

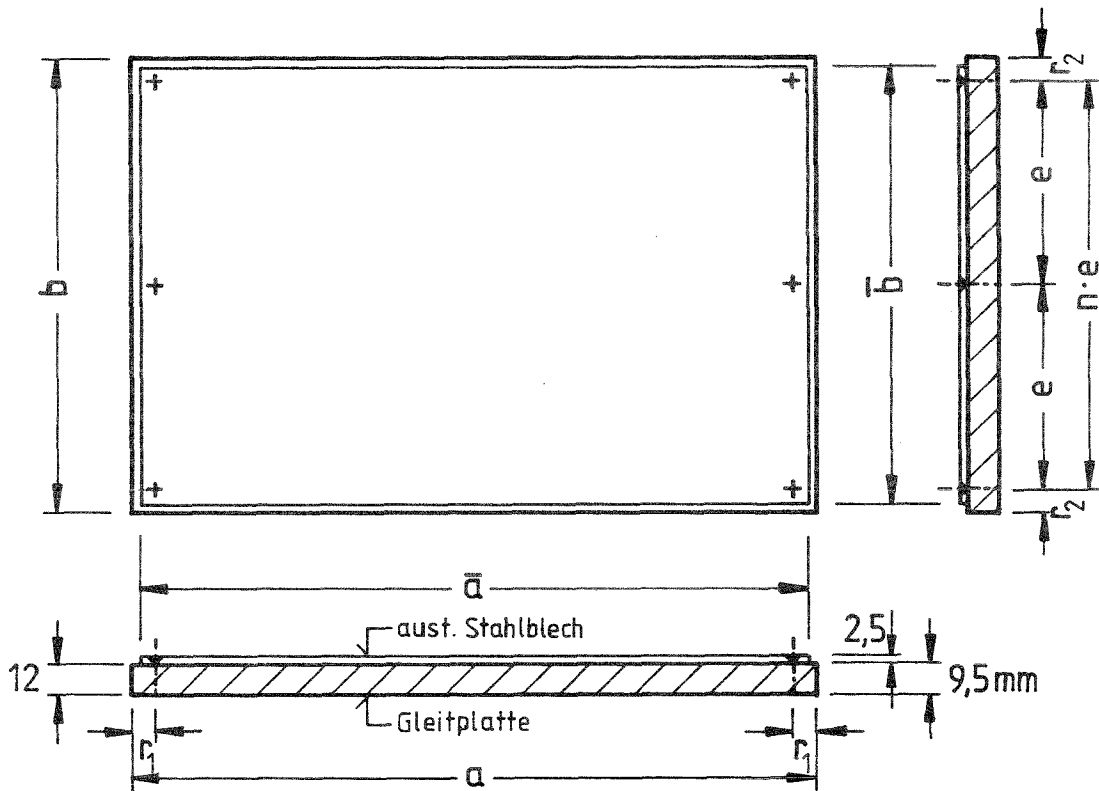
- Lagerscheiben:
(Grundkörper) PTFE weiß, frei gesintert, Brückenlagerqualität
Dicke 4,5 mm + 0,3; rund; Ø 75, Ø 150, Ø 250, Ø 450;
mit eingepprägten Schmiertaschen (Ø 8 mm, Tiefe 2 mm,
versetzt auf jeden zweiten Punkt eines rechtwinkligen
Rasters mit 7,5 bzw. 13,5 mm Abstand);
entnommen aus 3 Chargen;
fremdüberwacht durch MPA Stuttgart (vgl. Anhang)
- PTFE-Aufnahmen: St 52-3, rund, Abmessungen vgl. Anlage 6
Einlaßtiefe für PTFE-Ronden = 2,6 mm,
Innenkanten scharfkantig ausgebildet
- Gleitplatten: St 52-3, rechteckig, Dicke 9,5 mm,
planparallel bearbeitet
- Aust. Stahlblech: Material X5 CrNiMo 1810, Werkst.-Nr. 1.4401,
(Gegenkörper) Dicke 2,5 mm; Abmessungen vgl. Anlage 7
Gleitfläche einseitig geschliffen und hochglanzpoliert,
mit Papierschutzfolie beklebt, Rauhtiefe der
Gleitfläche $R_{\max} < 0,5 \mu\text{m}$, Härte 205 HV1;
entnommen aus 1 Charge;
fremdüberwacht durch MPA Stuttgart (vgl. Anhang);
mit Gleitplatte verschraubt
- Schmierstoff: Siliconfett (Syntheso 8002),
(Zwischenstoff) Brückenlagerqualität,
entnommen aus 1 Charge,
fremdüberwacht durch MPA Stuttgart (vgl. Anhang)
- Elastomerlager: Durchmesser 450 mm, Einbaudicken 99 mm und 159 mm;
bewehrt mit 4 mm dicken Bewehrungsblechen,
Shore-A-Härten ~50 und 65 genaue Daten vgl. Anlage 91

Abmessungen der runden PTFE-Aufnahmen



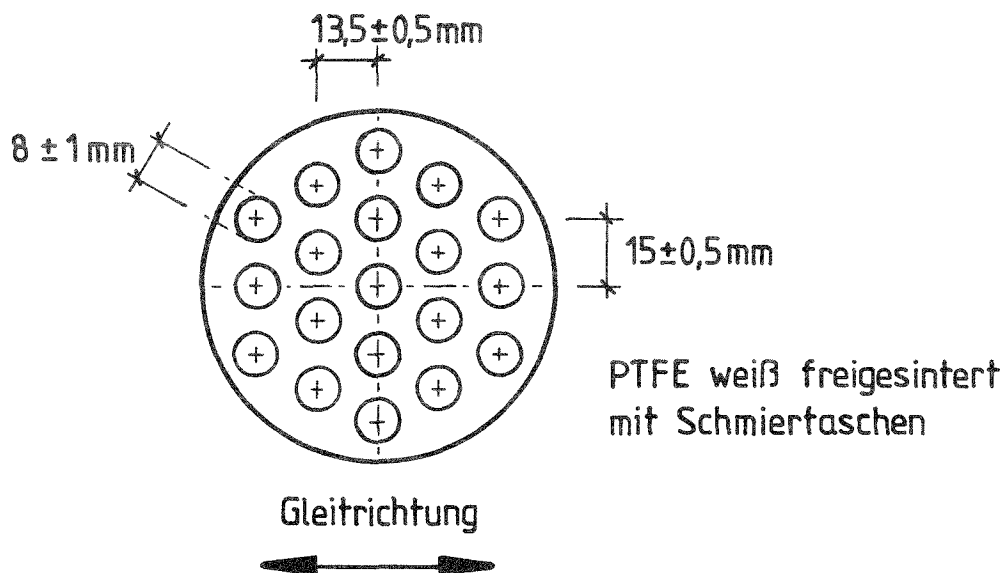
PTFE-Aufnahme	Für PTFE-Soll-Ø [mm]				
	Ø 75	Ø 150	Ø 250	Ø 450	Ø 250
D_a [mm]	100	175	275	475	450
D_i [mm]	74,1	149,2	249	449	249
d [mm]	20	20	20	20	56,6
t_E [mm]	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Bem.	Für Versuche an geschmierten Gleitlagern ohne Verformungsteil				Für Verformungsgleitlager

Abmessungen der Gleitplatten und aust. Stahlbleche

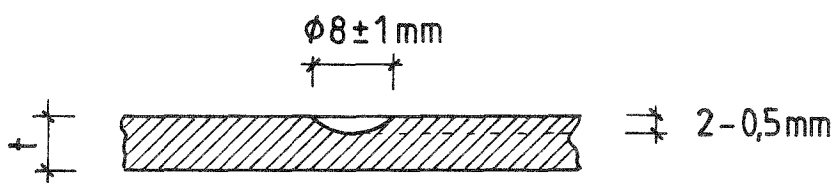


	PTFE-Soll- \emptyset [mm]			
	\emptyset 75	\emptyset 150	\emptyset 250	\emptyset 450
Gleitplatte, $a \times b$ [mm]	165x130	250x180	450x300	750x470
aust. Blech $\bar{a} \times \bar{b}$ [mm]	125x100	230x170	440x270	740x470
<u>Bohrungen M5:</u>				
Anzahl	3	3	4	7
Abstand e [mm]	35	70	80	70
Randabstand r_1 [mm]	30	15	15	15
Randabstand r_2 [mm]	30	20	30	25
Gleitweg [mm]	± 5	± 20	± 75	± 100

Draufsicht auf eine PTFE-Scheibe (schematisch)



Schnitt durch eine Schmiertasche



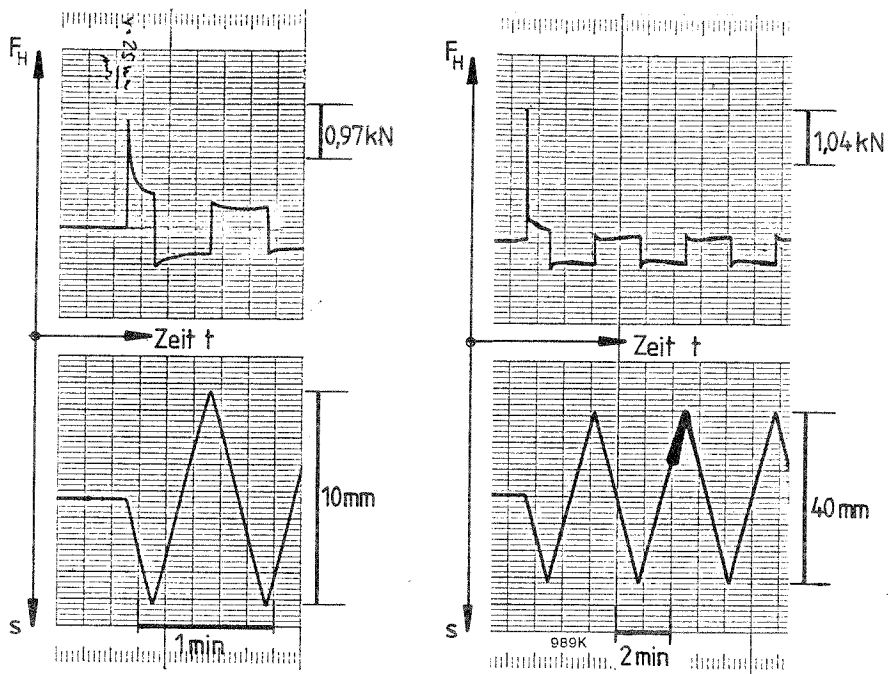
Anordnung der Schmiertaschen zur Gleitrichtung
 in den Versuchen und Schmiertaschenausbildung

Versuchsreihe A1: Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern

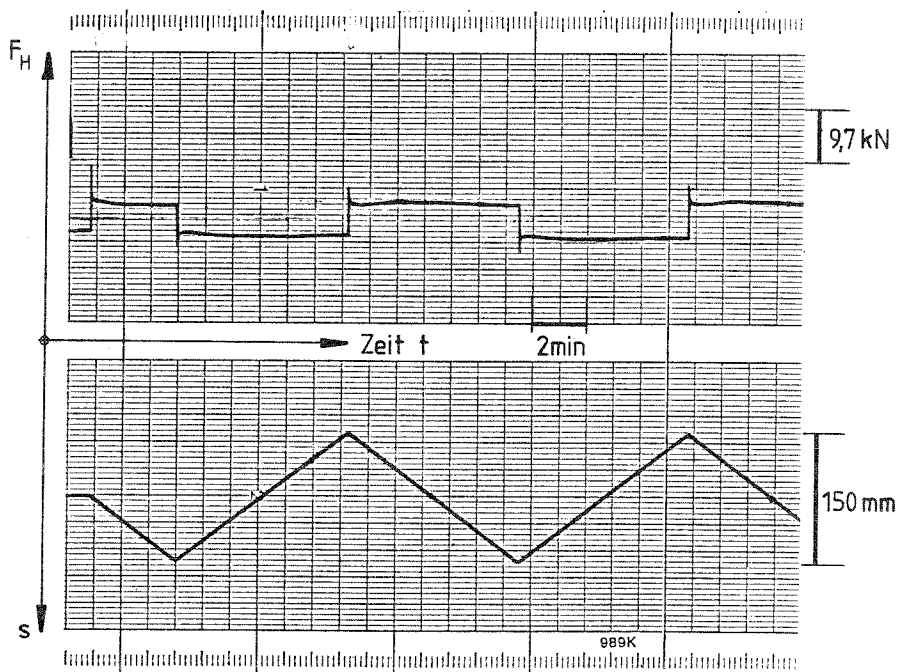
Versuchsreihe A1

Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern
(PTFE weiß/aust. Stahl, Schmierung mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung)

v [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	p [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	p · v-Wert [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	PTFE-Durchmesser [mm]			
			∅ 75	∅ 150	∅ 250	∅ 450
			Anzahl der Versuche			
0,4	15	6	3	-	3	-
	30	12	2+(1)	3	2+(1)	-
	45	18	3	-	3	-
50	15	750	-	-	3	-
	30	1500	-	-	3	-
	45	2250	-	-	-	-
150	15	2250	-	-	3	3
	30	4500	-	3	2+(1)	-
	45	6750	-	-	3	-
~2000	15	~30000	-	-	3	-
	30	~60000	3	3	3	-
	45	~90000	-	-	3	-
Vorbelastungszeit t_v		[h]	1	1	1	1
Verschiebeweg s_0		[mm]	±5	±20	±75	±100
			(± 75 bei v = 2000 mm/s)			
Gesamtgleitweg S		[m]	30;30;100	30;30;100	30;30;100	30;30;100
Vorgegebene Weg-Zeit-Funktion n des Gleitschiebers			linear ohne Leerlaufspiel (trapezartig bei v = 2000 mm/s)			
Messungen			<ul style="list-style-type: none"> - Verschiebewiderstand F_H (t) mit Kraftmeßdose MS 40 - Gleitschieberweg s(t) mit induktivem Wegaufnehmer - Dicken- und Gewichtsänderung der PTFE-Ronden (Verschleiß) soweit mit vorh. Geräten meßbar - Temperatur T der Gleitplatte 			
<p>v = Verschiebegeschwindigkeit des Gleitschiebers p = F_v/A_N = mittlere PTFE-Pressung F_v = Vertikallast; A_N = Nennfläche der PTFE-Ronden im unbelasteten Zustand</p>						
(.) Diese Versuche werden in der Versuchsreihe A2 als Dauergleitprogrammversuch bis ca. 2 200 m Gesamtgleitweg weitergeführt.						
<p>Versuchsbezeichnung: A1 - D ... P ... V ... Nr.; (A1 = Versuchsreihe; D = PTFE-∅ in mm; p = mittl. PTFE-Pressung in N/mm²; v = Verschiebungsgeschw. in mm/s)</p>						



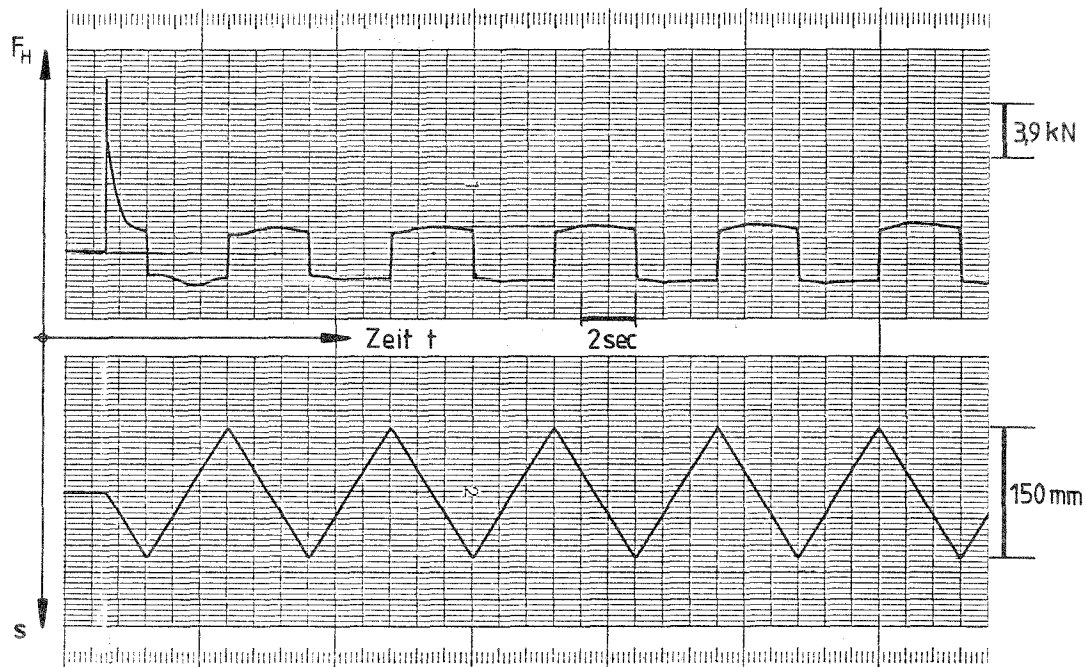
Versuch A1-D75 P45 V0,4 Nr.2 | Versuch A1-D150 P30 V0,4 Nr. 2



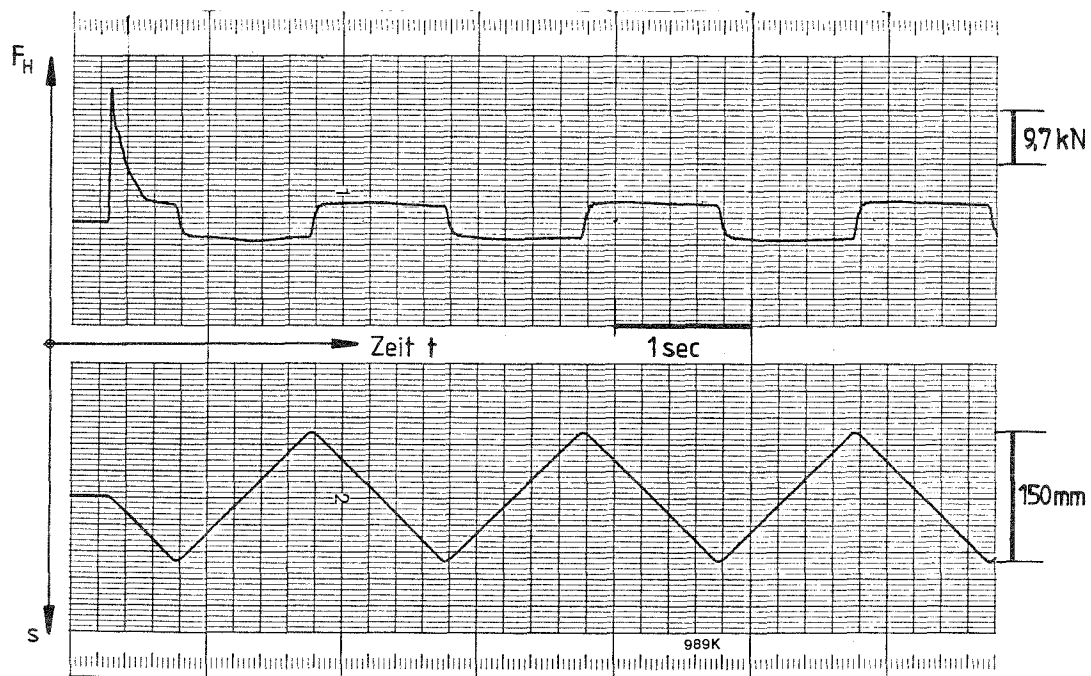
Versuch A1-D250 P45 V0,4 Nr.2

Versuchsreihe A1:

Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H u. des Verschiebeweges s bei einer Gleitgeschwindigkeit von $v = 0,4 \text{ mm/s}$



Versuch A1-D 250 P30 V50 Nr.1

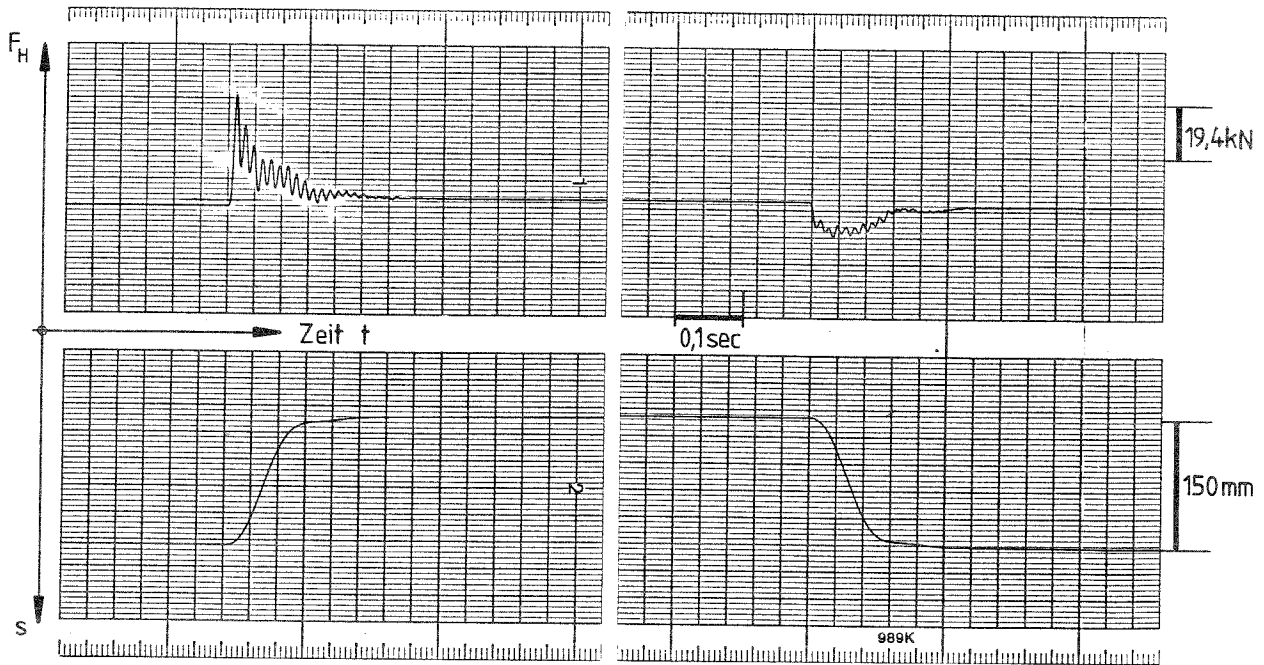


Versuch A1-D 250 P45 V150 Nr.2

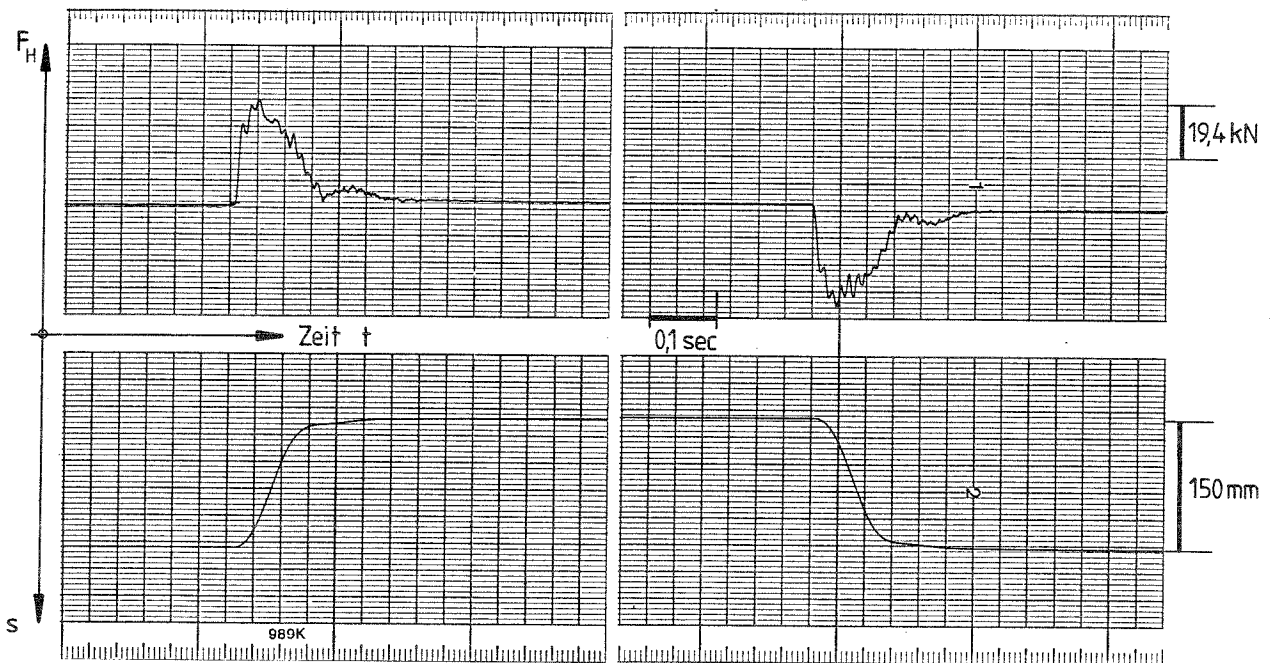
Versuchsreihe A1:

Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H und des Verschiebeweges s bei einer Gleitgeschwindigkeit von $v = 50 \text{ mm/s}$ u. 150 mm/s

erster Doppelhub



letzter Doppelhub nach 30m Gesamtgleitweg

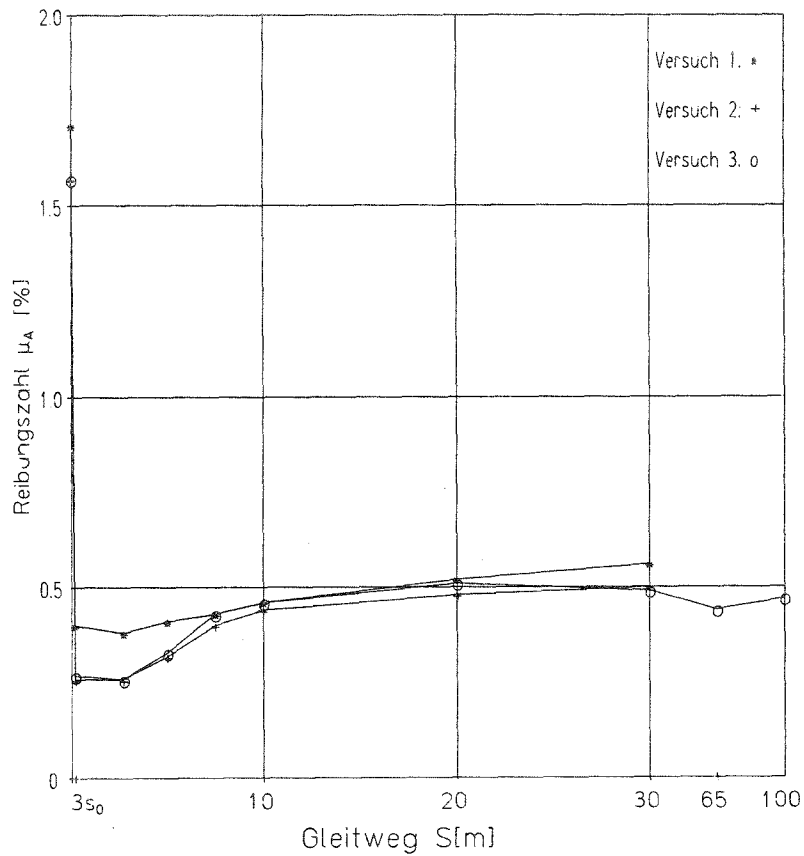


Versuch A1-D 250 P45 V2000 Nr.2

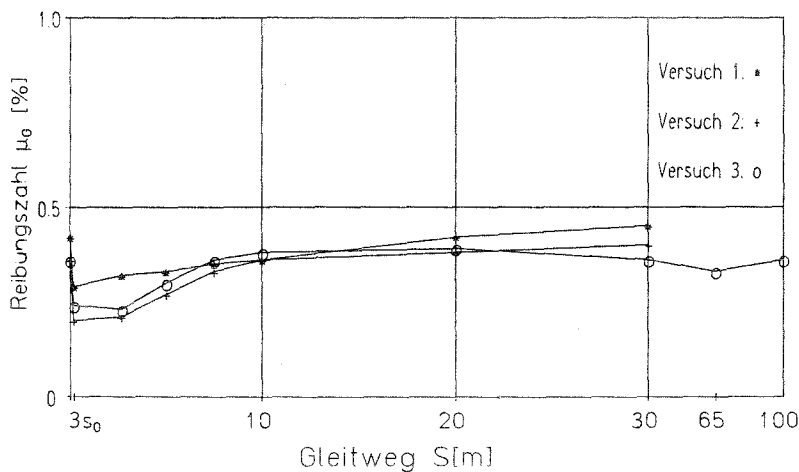
Versuchsreihe A1:

Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H und des Verschiebeweges s bei einer Gleitgeschwindigkeit von $v=2000 \text{ mm/s}$

Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D 75 P15 V0.4 F _v = 66,3 kN s ₀ = ± 5 mm T = 20,5-23,5°C f = 0,02/s	1	μ _A [%]	1.71	0.40	0.38	0.41	0.43	0.46	0.52	0.56		
		μ _G [%]	0.42	0.29	0.32	0.33	0.35	0.36	0.42	0.45		
	2	μ _A [%]	1.57	0.26	0.26	0.32	0.40	0.44	0.48	0.50		
		μ _G [%]	0.36	0.20	0.21	0.27	0.33	0.36	0.38	0.40		
	3	μ _A [%]	1.57	0.27	0.26	0.33	0.43	0.46	0.51	0.49	0.44	0.47
		μ _G [%]	0.36	0.24	0.23	0.30	0.36	0.38	0.39	0.36	0.33	0.36
	Mit- tel	μ _A [%]	1.62	0.31	0.30	0.35	0.42	0.45	0.50	0.52		
		μ _G [%]	0.38	0.24	0.25	0.30	0.35	0.37	0.40	0.40		

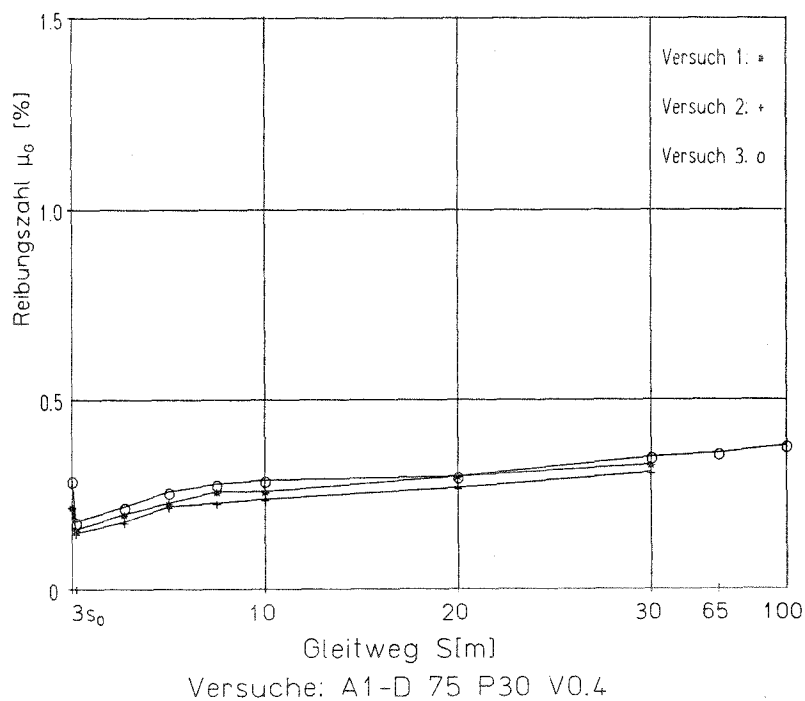
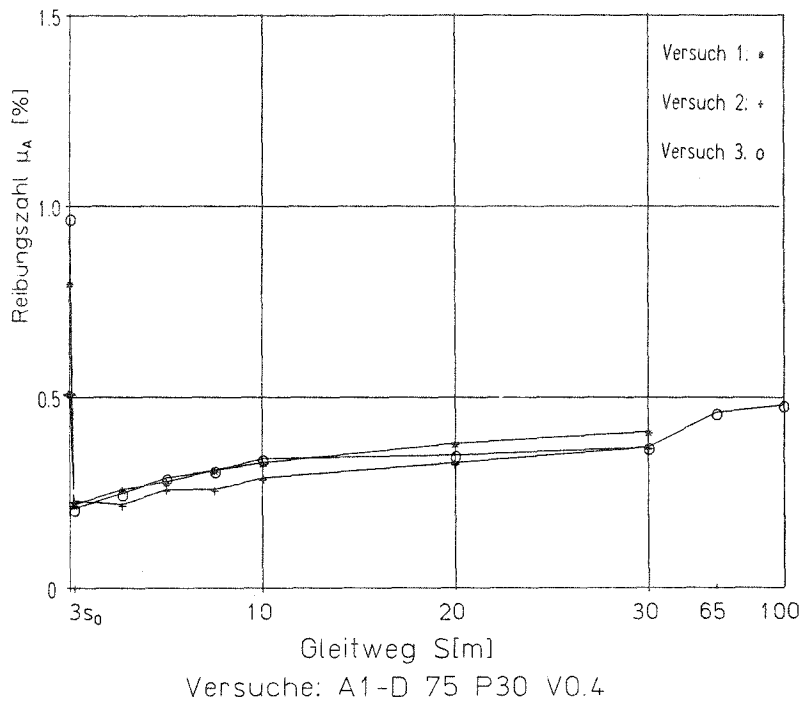


Versuche: A1-D 75 P15 V0.4

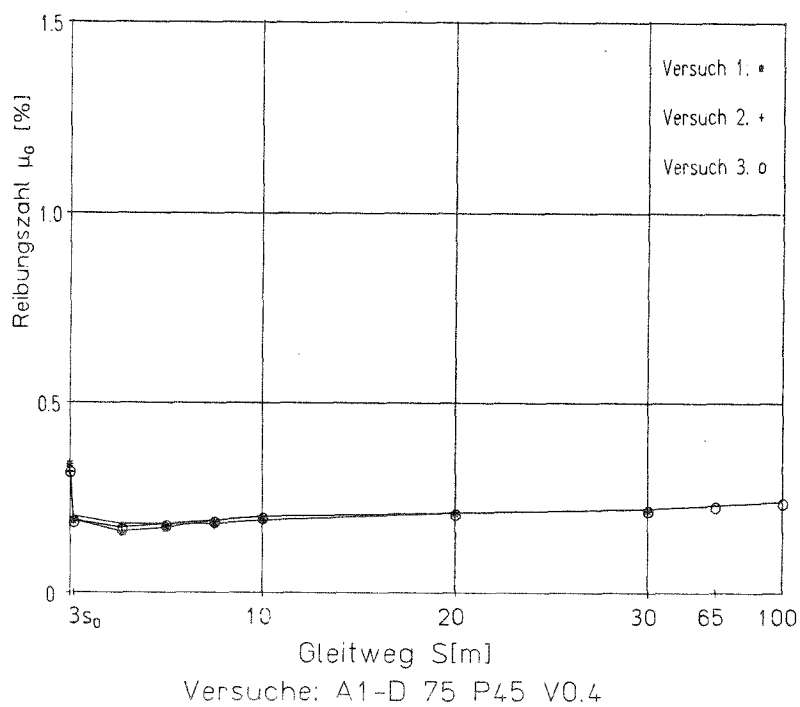
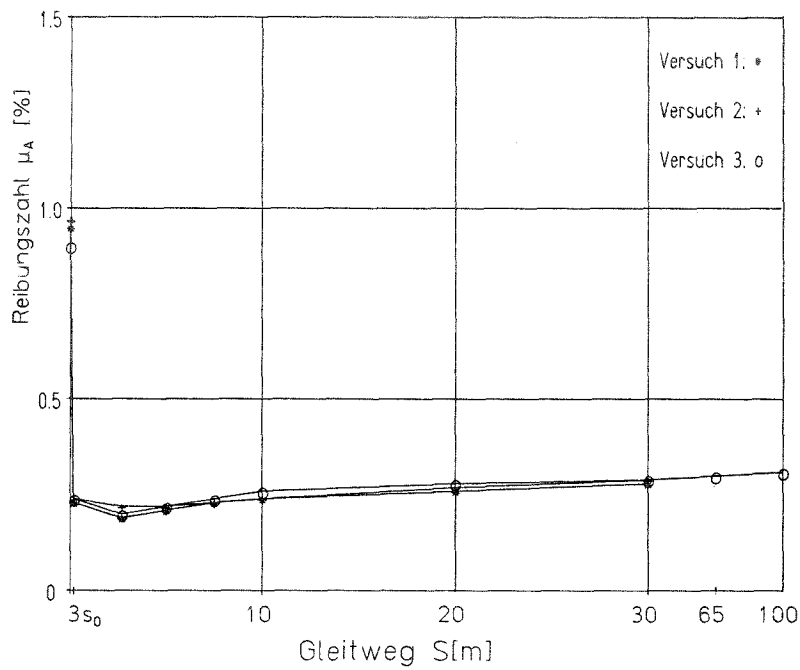


Versuche: A1-D 75 P15 V0.4

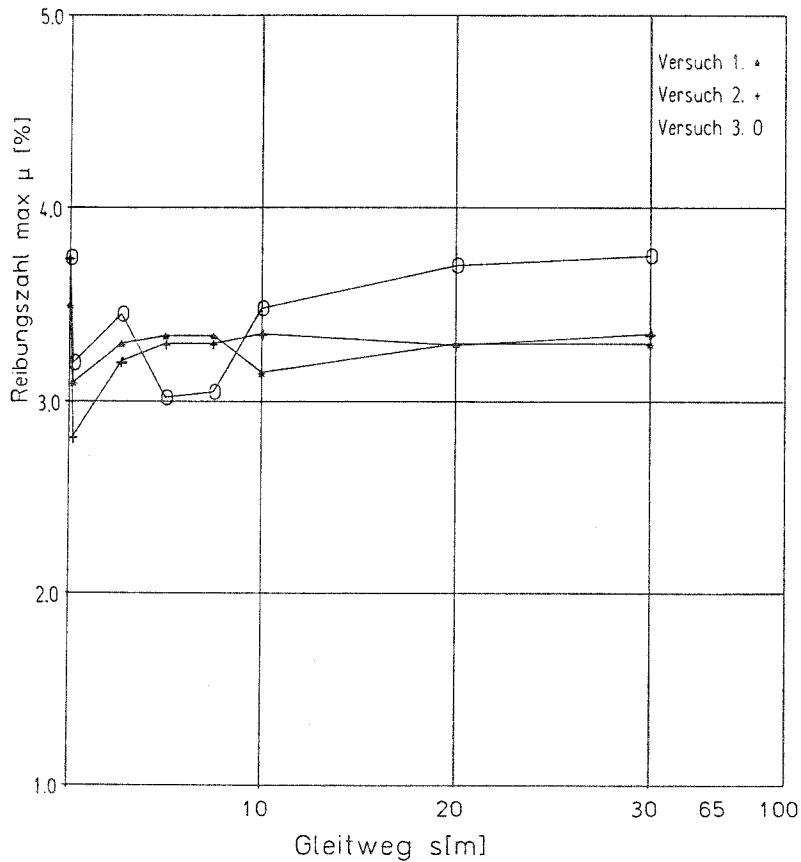
Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D 75 P30 V0.4 F _v = 132,5 kN s ₀ = ± 5 mm T = 19- 20°C f = 0,02/s	1	μ _A [%]	0.80	0.22	0.26	0.28	0.31	0.33	0.38	0.41		
		μ ₀ [%]	0.22	0.16	0.20	0.23	0.26	0.26	0.30	0.33		
	2	μ _A [%]	0.51	0.23	0.22	0.26	0.26	0.29	0.33	0.37		
		μ ₀ [%]	0.22	0.15	0.18	0.22	0.23	0.24	0.27	0.31		
	3	μ _A [%]	0.97	0.21	0.25	0.29	0.31	0.34	0.35	0.37	0.46	0.48
		μ ₀ [%]	0.29	0.18	0.22	0.26	0.28	0.29	0.30	0.35	0.36	0.38
	Mit- fel	μ _A [%]	0.76	0.22	0.24	0.28	0.29	0.32	0.35	0.38		
		μ ₀ [%]	0.24	0.16	0.20	0.24	0.26	0.26	0.29	0.33		



Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D 75 P45 V0.4 F _v = 198,8 kN s ₀ = ± 5 mm T = 20,5–23,5°C f = 0,02 /s	1	μ _A [%]	0.95	0.23	0.19	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28		
		μ _G [%]	0.34	0.19	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.22		
	2	μ _A [%]	0.97	0.24	0.22	0.22	0.23	0.24	0.27	0.29		
		μ _G [%]	0.32	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	0.21	0.22		
	3	μ _A [%]	0.90	0.24	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.29	0.30	0.31
		μ _G [%]	0.32	0.19	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
	Mit- tel	μ _A [%]	0.94	0.24	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.29		
		μ _G [%]	0.33	0.19	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22		

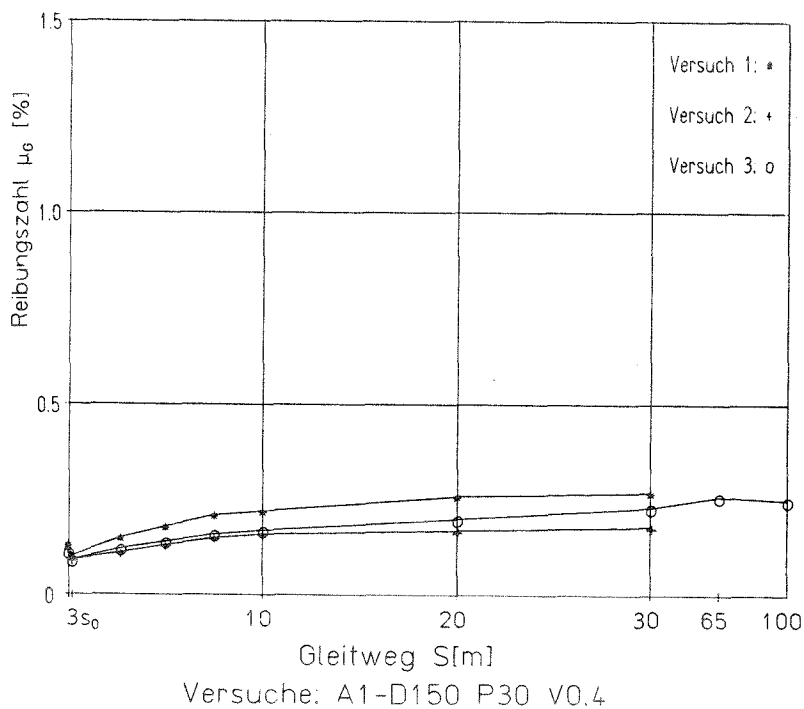
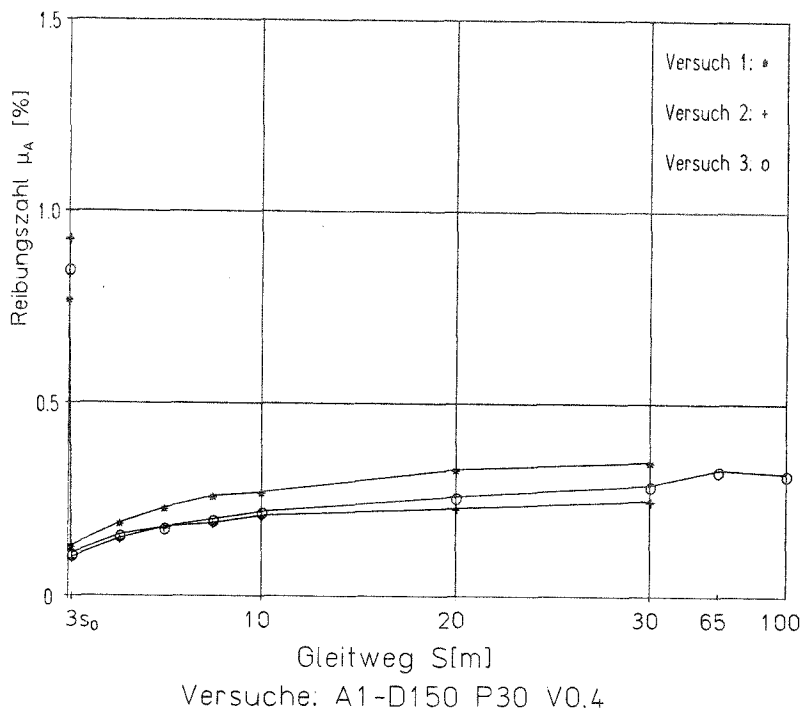


Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	0,3	2,7	5,0	7,5	10	20	30	T _A	T _E
A1-D 75 P30 V2000 F _v = 132,5 kN s ₀ = 150 mm f= 0,2 /s	1	max μ [%]	3,50	3,10	3,30	3,34	3,34	3,15	3,30	3,30	19,2	21,2
	2	max μ [%]	3,74	2,82	3,21	3,30	3,30	3,35	3,29	3,35	19,7	21,5
	3	max μ [%]	3,74	3,20	3,45	3,02	3,05	3,48	3,70	3,75	19,8	22,0
	Mittel		3,66	3,04	3,32	3,22	3,23	3,33	3,43	3,47	[°C]	

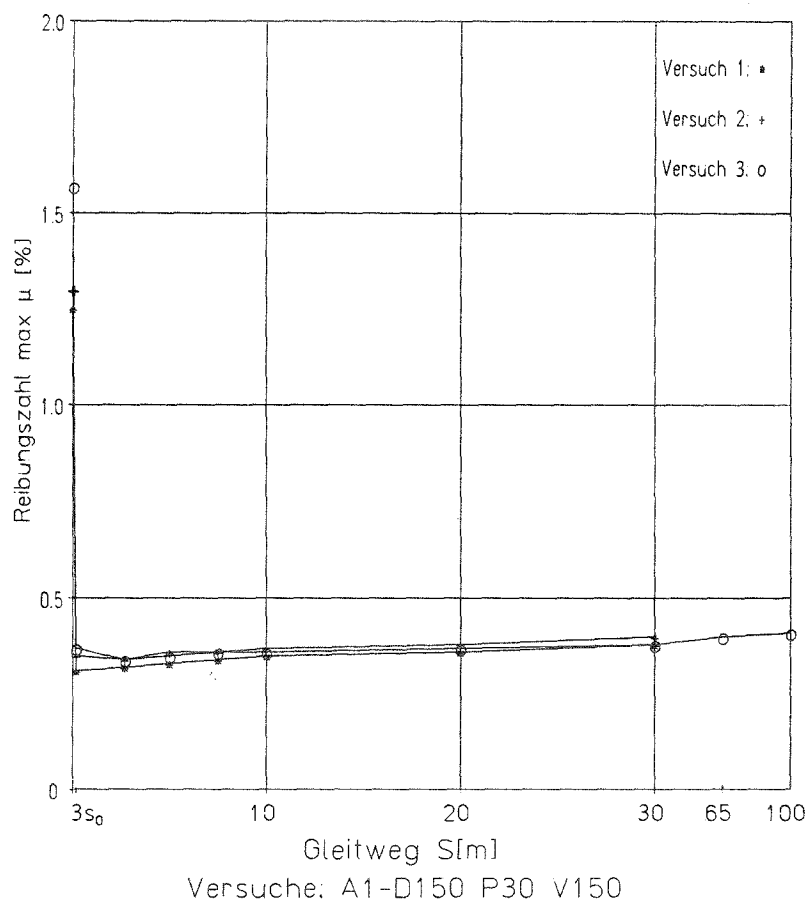


VERSUCHE: A1-D75 P30 V2000

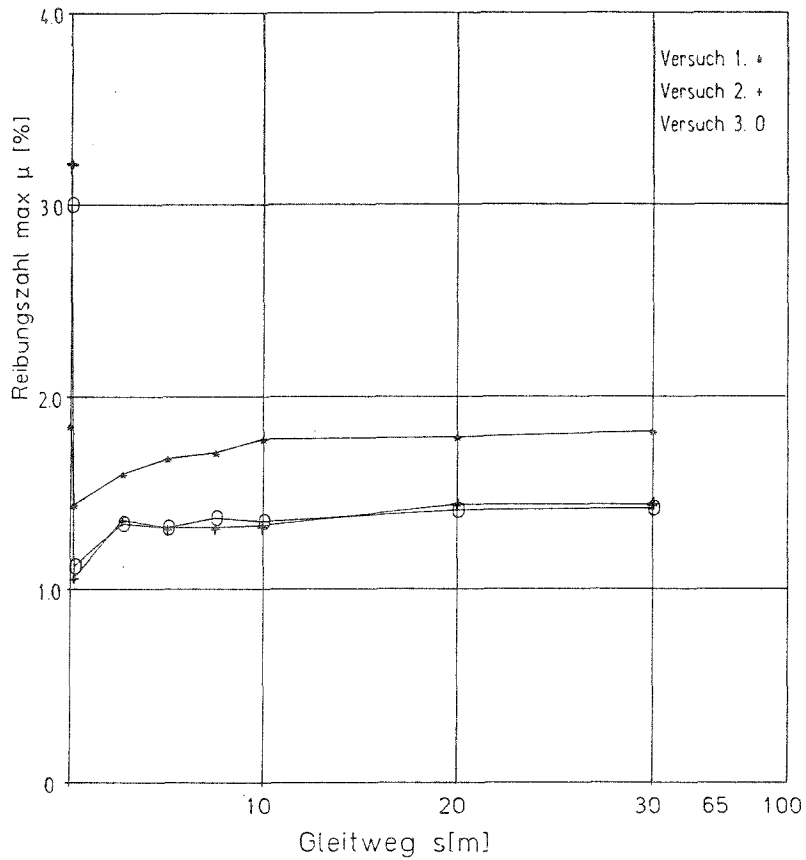
Versuch	Nr	Gleitweg S(m)	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D150 P30 V0.4 F _v = 530 kN s ₀ = ± 20 mm T = ~23,5°C f = 0,005 /s	1	μ _A [%]	0.77	0.13	0.19	0.23	0.26	0.27	0.33	0.35		
		μ _G [%]	0.13	0.10	0.15	0.18	0.21	0.22	0.26	0.27		
	2	μ _A [%]	0.93	0.10	0.15	0.18	0.19	0.21	0.23	0.25		
		μ _G [%]	0.12	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17	0.18		
	3	μ _A [%]	0.85	0.11	0.16	0.18	0.20	0.22	0.26	0.29	0.33	0.32
		μ _G [%]	0.11	0.09	0.12	0.14	0.16	0.17	0.20	0.23	0.26	0.25
	Mit- tel	μ _A [%]	0.85	0.11	0.17	0.20	0.22	0.23	0.27	0.30		
		μ _G [%]	0.12	0.09	0.13	0.15	0.17	0.18	0.21	0.23		



Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D150 P30 V 150 F _v = 530 kN s ₀ = ± 20 mm f = 1,875/s	1	max μ [%]	1.25	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.38			232	295
	2	max μ [%]	1.30	0.35	0.34	0.36	0.36	0.37	0.38	0.40			232	30
	3	max μ [%]	1.57	0.37	0.34	0.35	0.36	0.36	0.37	0.38	0.40	0.41	236	336
	Mit- tel		1.37	0.34	0.33	0.35	0.35	0.36	0.37	0.39			[°C]	

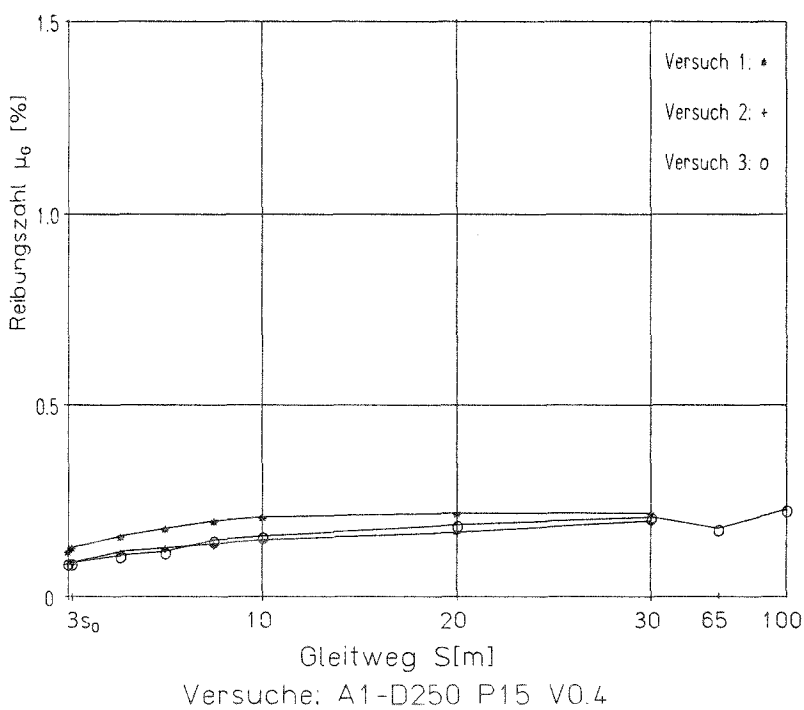
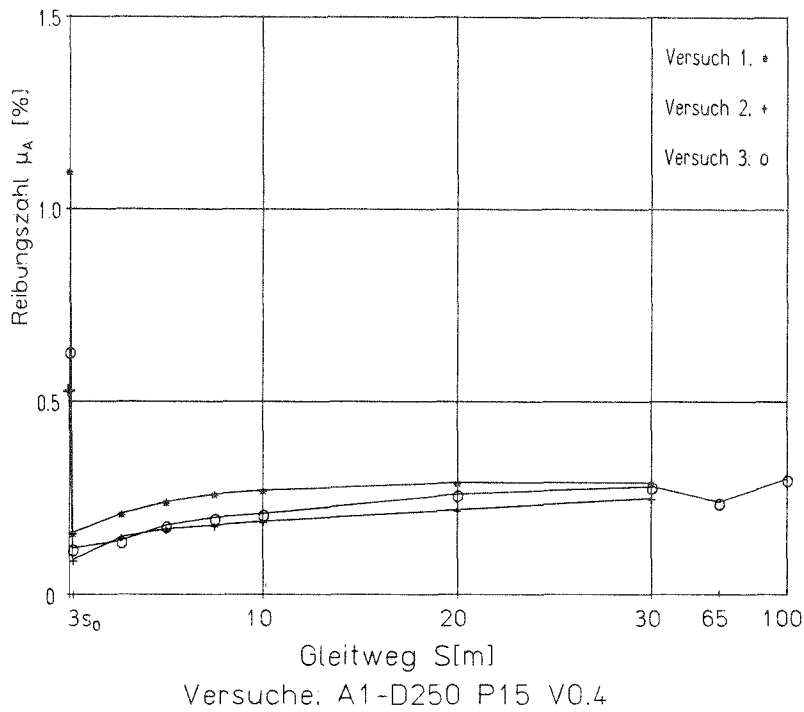


Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	0,3	2.7	5.0	7.5	10	20	30	T _A	T _E
A1-D150 P30 V2000 F _v = 530 kN s ₀ = 150 mm f= 0,2 /s	1	max μ [%]	1.85	1.44	1.60	1.68	1.71	1.78	1.79	1.82	19.9	22.0
	2	max μ [%]	3.22	1.06	1.36	1.32	1.32	1.33	1.44	1.44	20.2	22.3
	3	max μ [%]	3.00	1.12	1.34	1.32	1.37	1.35	1.41	1.42	20.2	22.8
	Mittel		2.69	1.21	1.43	1.44	1.47	1.49	1.55	1.56	[°C]	

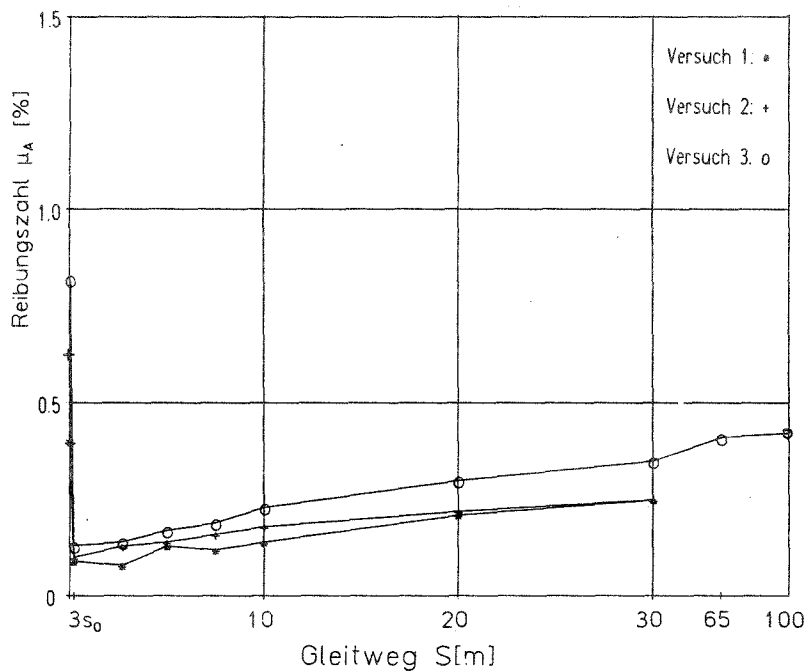


VERSUCHE: A1-D150 P30 V2000

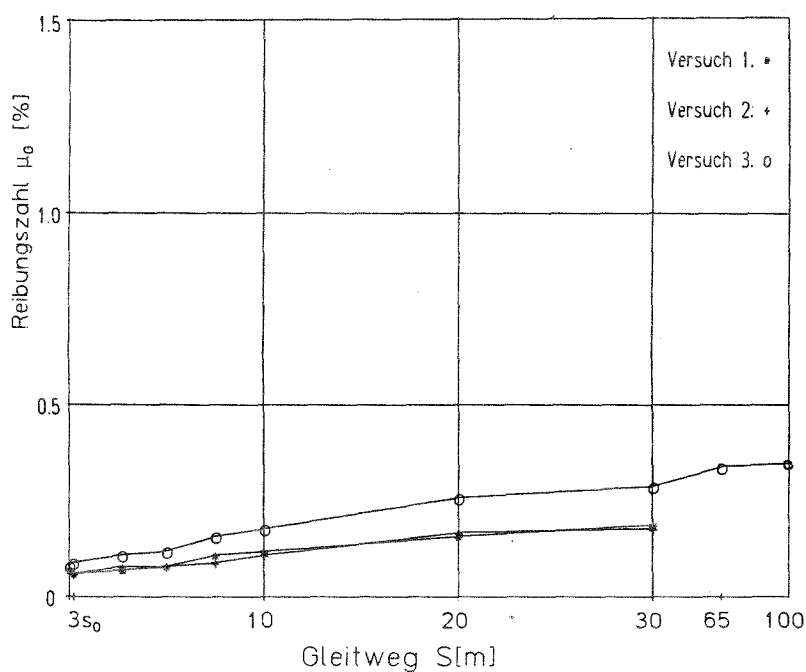
Versuch	Nr	Gleitweg S(m)	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D250 P15 V0.4 F _v = 736 kN s ₀ = ±75 mm T = 23-24°C f = 0,0013 /s	1	μ _A [%]	1.10	0.16	0.21	0.24	0.26	0.27	0.29	0.29		
		μ _G [%]	0.12	0.13	0.16	0.18	0.20	0.21	0.22	0.22		
	2	μ _A [%]	0.53	0.09	0.15	0.17	0.18	0.19	0.22	0.25		
		μ _G [%]	0.09	0.09	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.20		
	3	μ _A [%]	0.63	0.12	0.14	0.18	0.20	0.21	0.26	0.28	0.24	0.30
		μ _G [%]	0.09	0.09	0.11	0.12	0.15	0.16	0.19	0.21	0.18	0.23
	Mit- tel	μ _A [%]	0.75	0.12	0.17	0.20	0.21	0.22	0.26	0.27		
		μ _G [%]	0.10	0.10	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.21		



Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D250 P30 V0.4 F _v = 1473 kN s ₀ = ± 75 mm T = 19-20°C f = 0,0013 /s	1	μ _A [%]	0.40	0.09	0.08	0.13	0.12	0.14	0.21	0.25		
		μ _G [%]	0.07	0.06	0.07	0.08	0.11	0.12	0.16	0.19		
	2	μ _A [%]	0.63	0.10	0.13	0.14	0.16	0.18	0.22	0.25		
		μ _G [%]	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.11	0.17	0.18		
	3	μ _A [%]	0.82	0.13	0.14	0.17	0.19	0.23	0.30	0.35	0.41	0.42
		μ _G [%]	0.08	0.09	0.11	0.12	0.16	0.18	0.26	0.29	0.34	0.35
	Mit- tel	μ _A [%]	0.62	0.11	0.12	0.15	0.16	0.18	0.24	0.28		
		μ _G [%]	0.07	0.07	0.09	0.09	0.12	0.14	0.20	0.22		

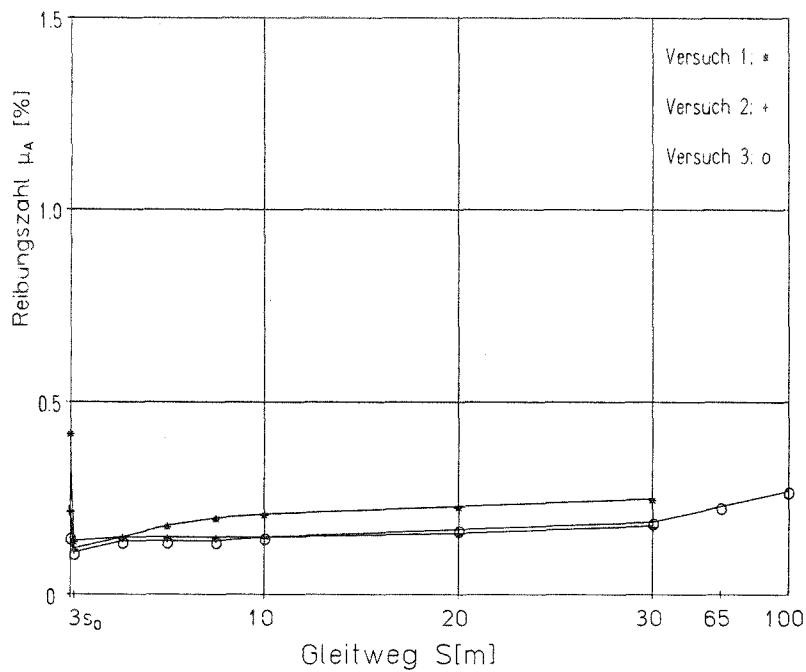


Versuche: A1-D250 P30 V0.4

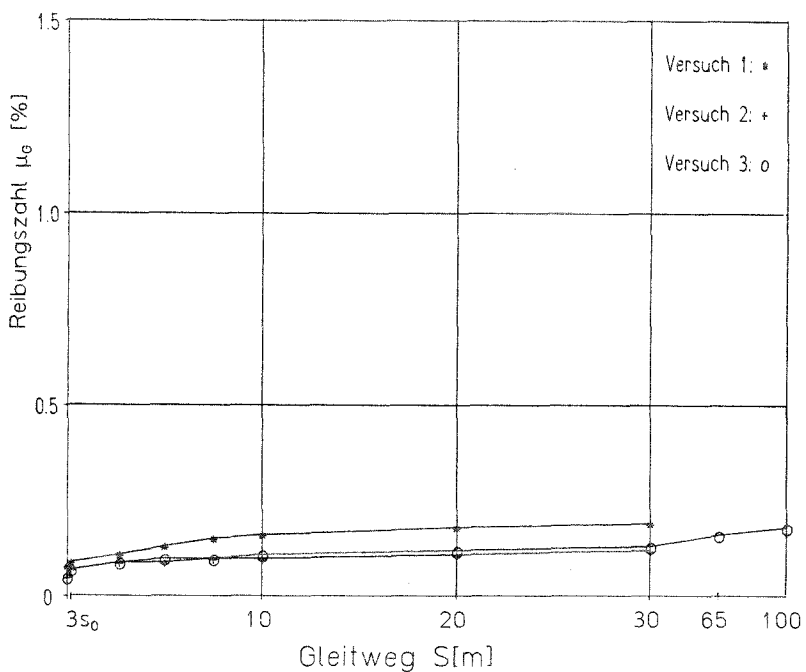


Versuche: A1-D250 P30 V0.4

Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100
A1-D250 P45 V0.4 F _v = 2209 kN s ₀ = ±75 mm T = 21-23°C f = 0,0013/s	1	μ _A [%]	0.42	0.14	0.15	0.18	0.20	0.21	0.23	0.25		
		μ _G [%]	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18	0.19		
	2	μ _A [%]	0.22	0.12	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.18		
		μ _G [%]	0.05	0.07	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12		
	3	μ _A [%]	0.15	0.11	0.14	0.14	0.14	0.15	0.17	0.19	0.23	0.27
		μ _G [%]	0.05	0.07	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.16	0.18
	Mit- tel	μ _A [%]	0.26	0.12	0.15	0.16	0.16	0.17	0.19	0.21		
		μ _G [%]	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15		

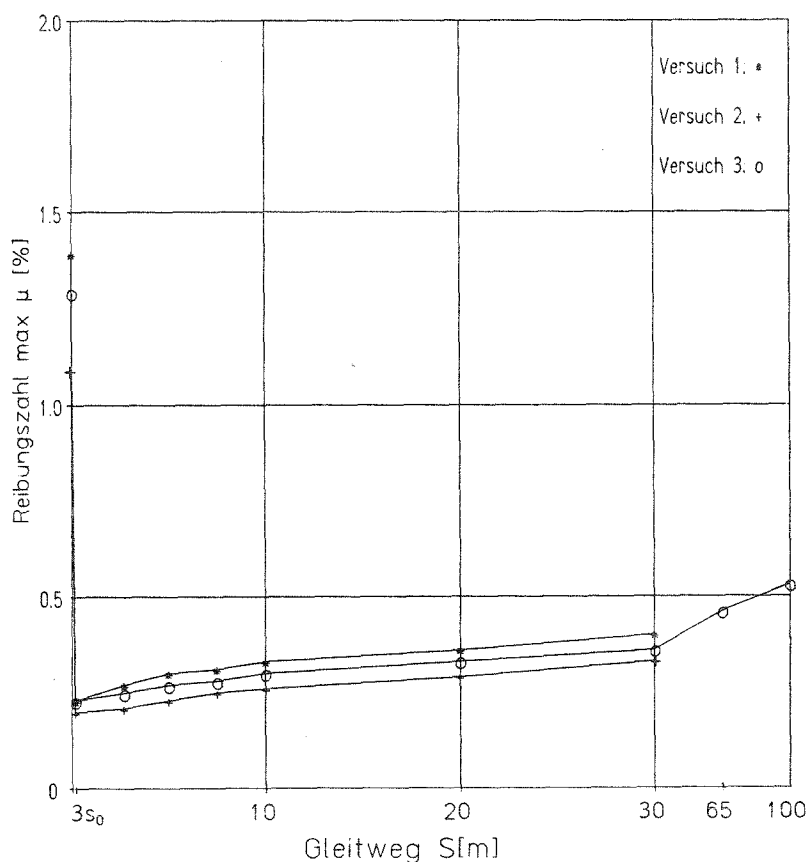


Versuche: A1-D250 P45 V0.4



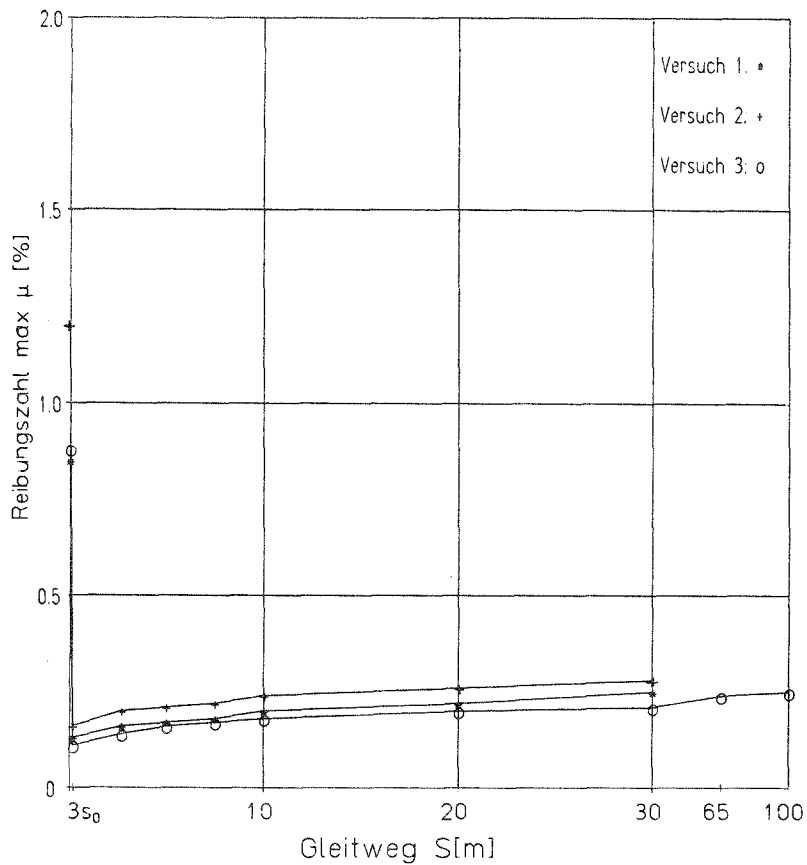
Versuche: A1-D250 P45 V0.4

Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D250 P15 V 50 F _v = 736 kN s ₀ = ±75 mm f = 0,167/s	1	max μ [%]	1.39	0.23	0.27	0.30	0.31	0.33	0.36	0.40			235	255
	2	max μ [%]	1.09	0.20	0.21	0.23	0.25	0.26	0.29	0.33			235	253
	3	max μ [%]	1.29	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.33	0.36	0.46	0.53	236	-
	Mittel		1.26	0.22	0.24	0.27	0.28	0.30	0.33	0.36			[°C]	



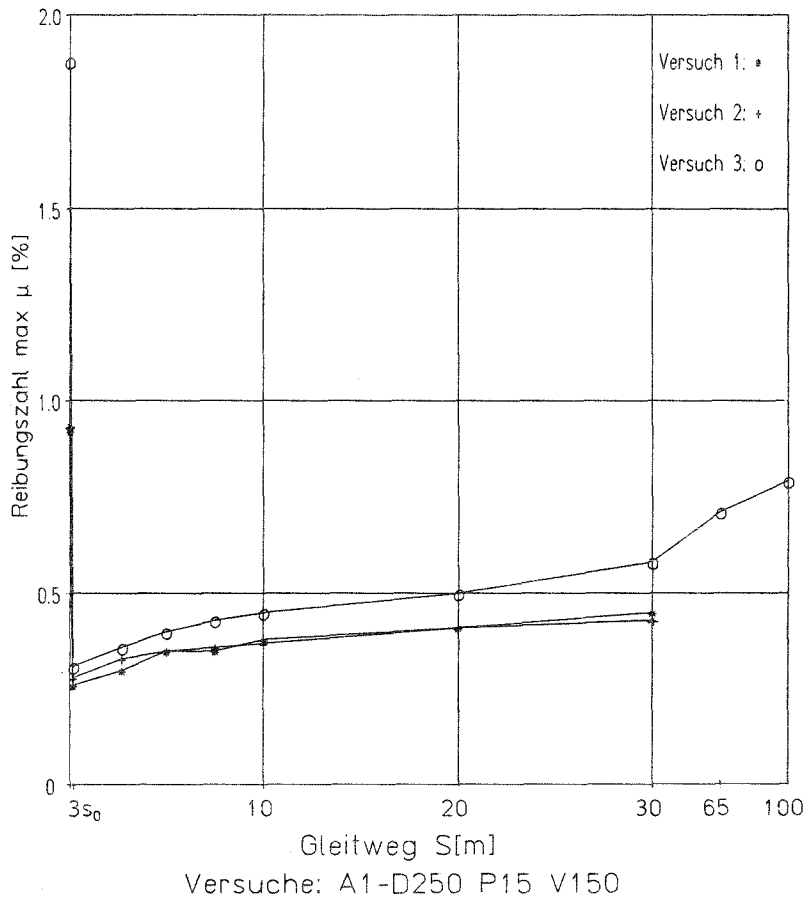
Versuche: A1-D250 P15 V 50

Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D250 P30 V 50 F _v = 1473 kN s ₀ = ±75 mm f = 0,167/s	1	max μ [%]	0.85	0.13	0.16	0.17	0.18	0.20	0.22	0.25			232	257
	2	max μ [%]	1.20	0.16	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.28			232	255
	3	max μ [%]	0.88	0.11	0.14	0.16	0.17	0.18	0.20	0.21	0.24	0.25	243	278
	Mittel		0.98	0.13	0.17	0.18	0.19	0.21	0.23	0.25			[°C]	

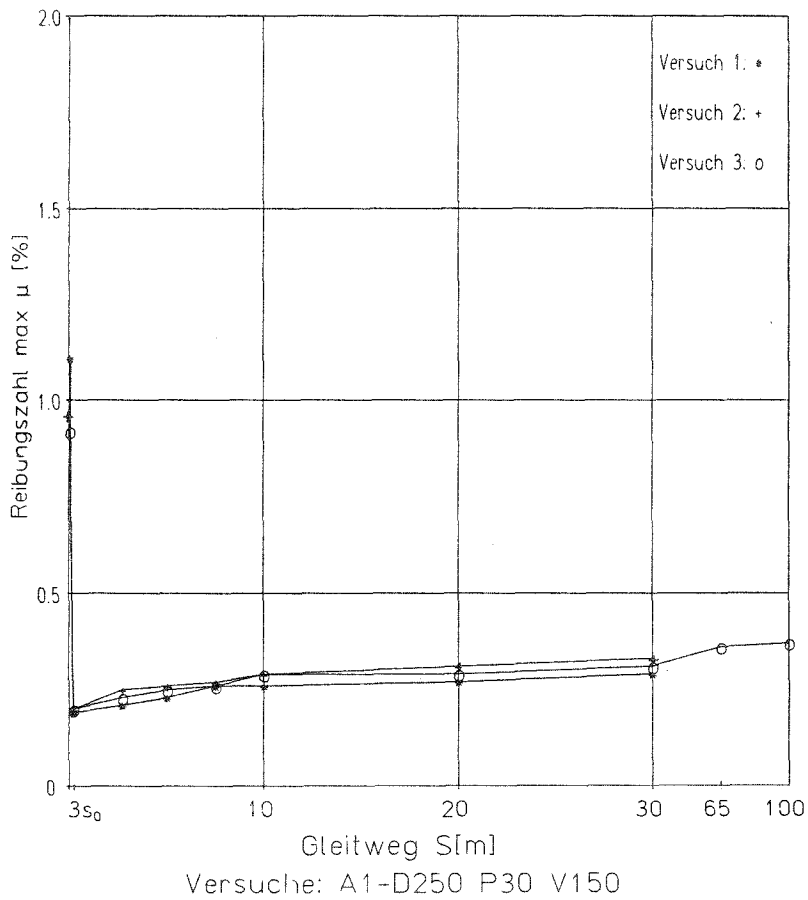


Versuche: A1-D250 P30 V 50

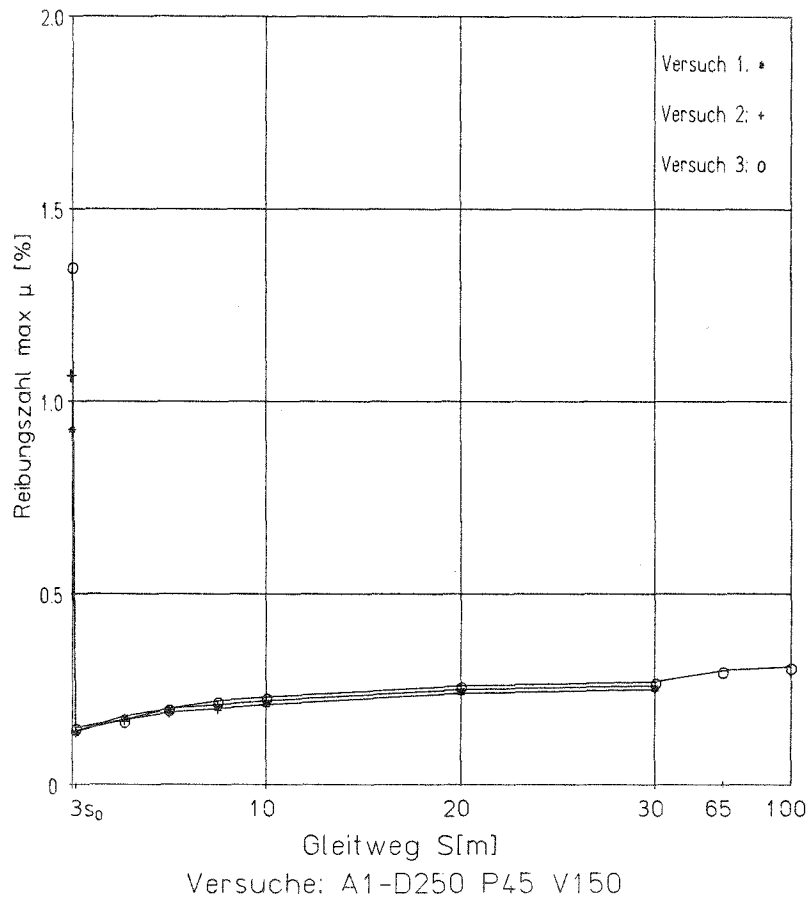
Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D250 P15 V150 F _v = 736 kN s ₀ = ± 75 mm f = 0,5 /s	1	max μ [%]	0.92	0.26	0.30	0.35	0.35	0.38	0.41	0.45			24	27
	2	max μ [%]	0.93	0.28	0.33	0.35	0.36	0.37	0.41	0.43			24	27,4
	3	max μ [%]	1.88	0.31	0.36	0.40	0.43	0.45	0.50	0.58	0.71	0.79	24,3	34,4
	Mittel		1.24	0.28	0.33	0.37	0.38	0.40	0.44	0.49			[°C]	



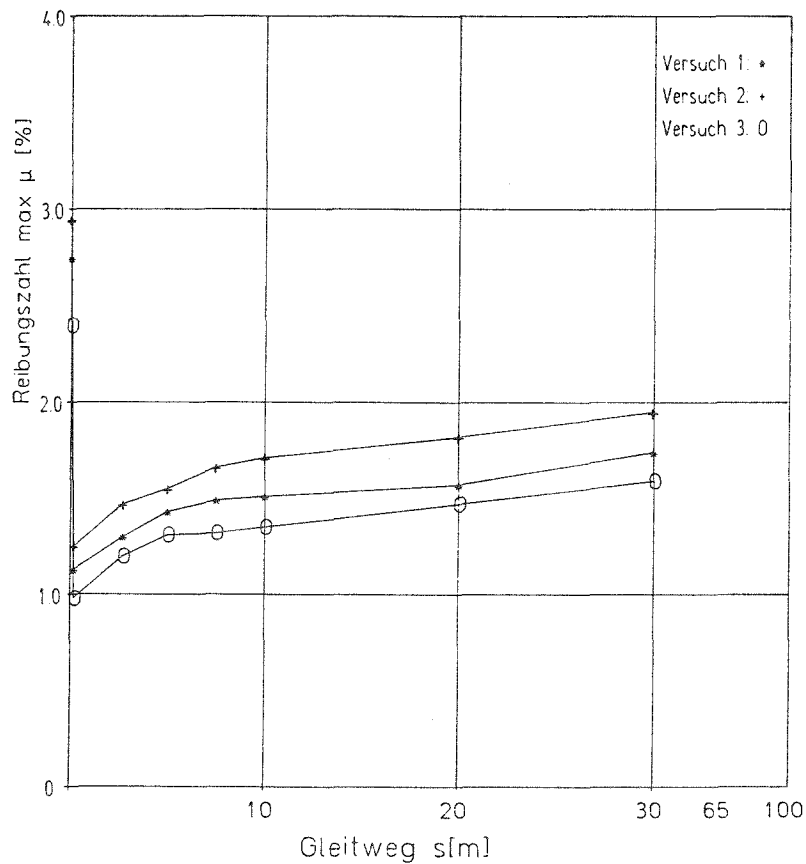
Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D250 P30 V150 F _v = 1473 kN s ₀ = ± 75 mm f = 0,5 /s	1	max μ [%]	1.11	0.19	0.21	0.23	0.26	0.26	0.27	0.29			22,2	26,4
	2	max μ [%]	0.96	0.20	0.25	0.26	0.27	0.29	0.31	0.33			19,1	23,9
	3	max μ [%]	0.92	0.20	0.23	0.25	0.26	0.29	0.29	0.31	0.36	0.36	19,5	27,6
	Mittel		1.00	0.20	0.23	0.25	0.26	0.28	0.29	0.31			[°C]	



Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D250 P45 V150 F _v = 2209 kN s ₀ = ± 75 mm f = 0,5 /s	1	max μ [%]	0.93	0.14	0.18	0.20	0.21	0.22	0.25	0.26			24,2	29,5
	2	max μ [%]	1.07	0.14	0.17	0.19	0.20	0.21	0.24	0.25			23,8	31,6
	3	max μ [%]	1.35	0.15	0.17	0.20	0.22	0.23	0.26	0.27	0.30	0.31	23,8	35,5
	Mittel		1.12	0.14	0.17	0.20	0.21	0.22	0.25	0.26			[°C]	

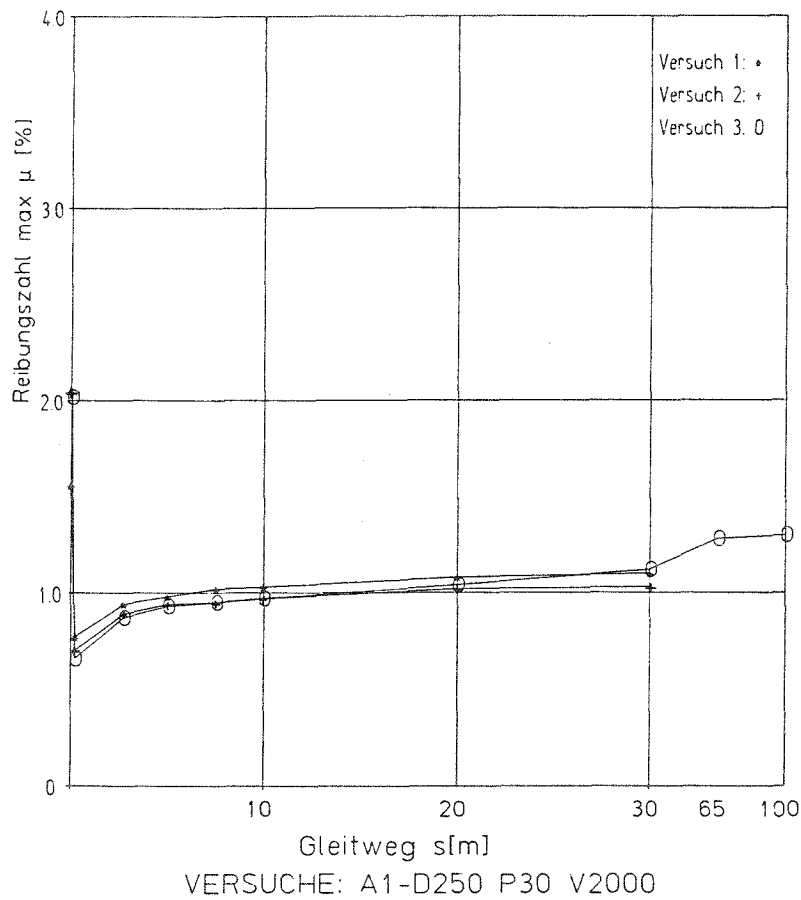


Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	0,3	2,7	5,0	7,5	10	20	30	T _A	T _E
A1-D250 P15 V2000 F _v = 736 kN s ₀ = 150 mm f= 0,2 /s	1	max μ [%]	2,75	1,13	1,30	1,43	1,49	1,51	1,57	1,74	22,5	26,2
	2	max μ [%]	2,95	1,25	1,47	1,55	1,66	1,71	1,82	1,95	18,0	22,0
	3	max μ [%]	2,40	0,98	1,20	1,31	1,32	1,35	1,47	1,59	18,2	22,3
	Mittel		2,70	1,12	1,32	1,43	1,49	1,52	1,62	1,76		[°C]

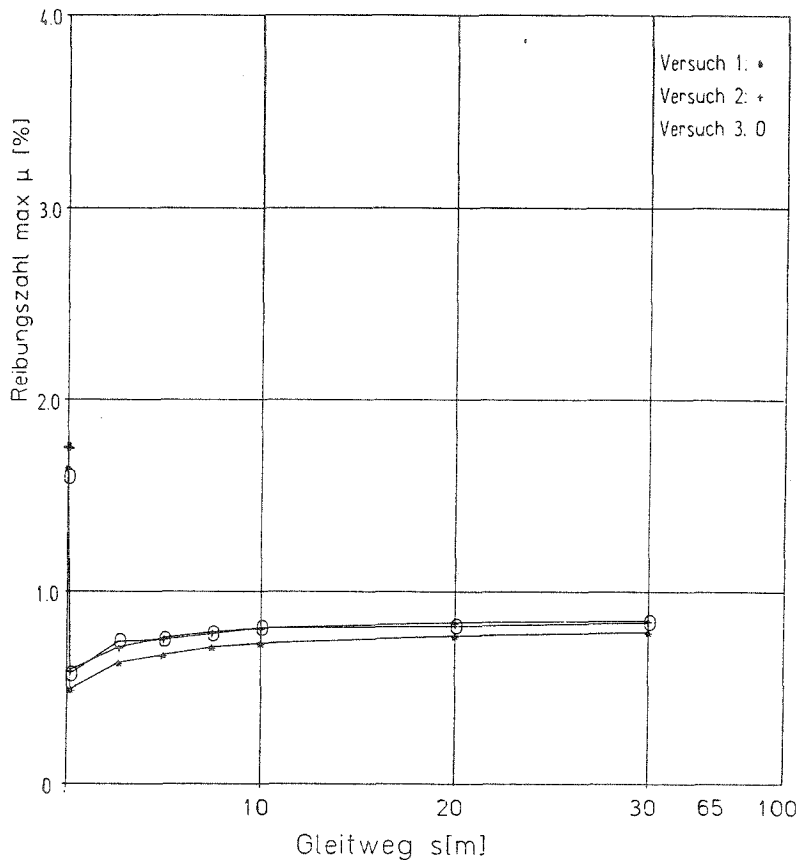


VERSUCHE: A1-D250 P15 V2000

Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	0,3	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D250 P30 V2000 F _v = 1473 kN s ₀ = 150 mm f= 0,2 /s	1	max μ [%]	1.56	0.77	0.94	0.98	1.02	1.03	1.08	1.10			20,7	25,5
	2	max μ [%]	2.05	0.70	0.89	0.94	0.95	0.97	1.02	1.03			19,6	24,8
	3	max μ [%]	2.02	0.66	0.87	0.93	0.95	0.97	1.04	1.12	1.28	1.30	20,3	32,2
	Mittel		1.88	0.71	0.90	0.95	0.97	0.99	1.05	1.08			[°C]	

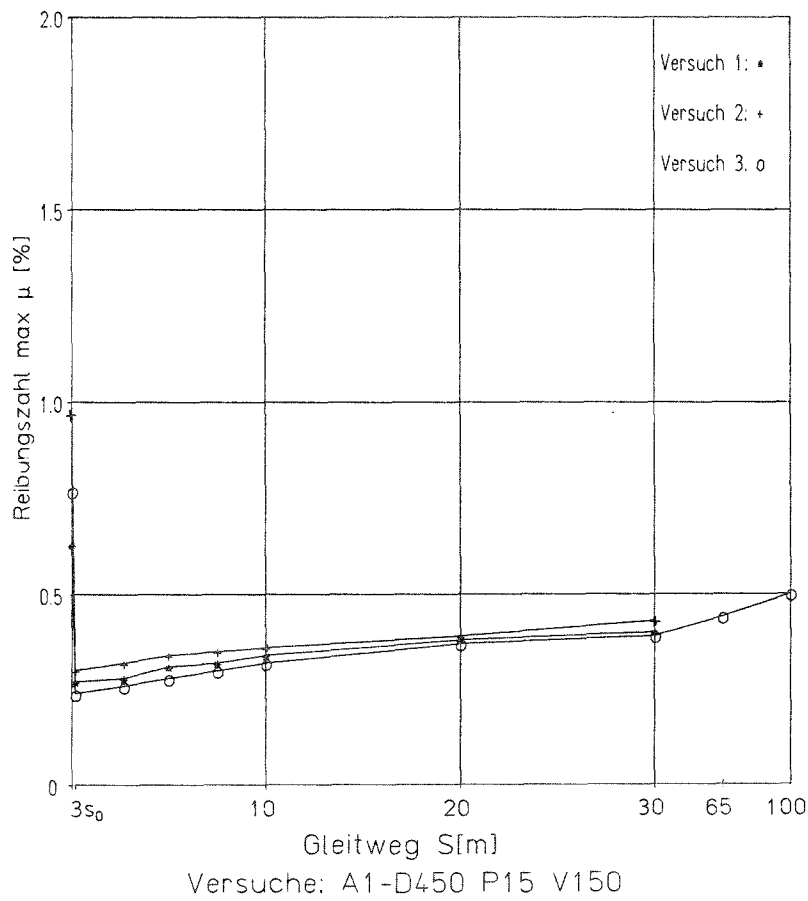


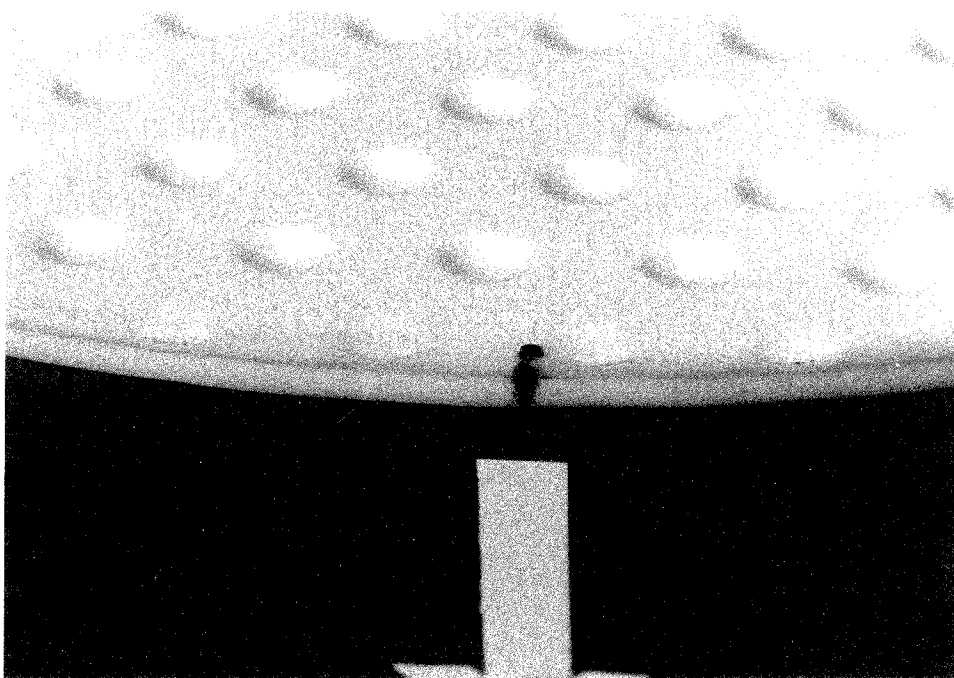
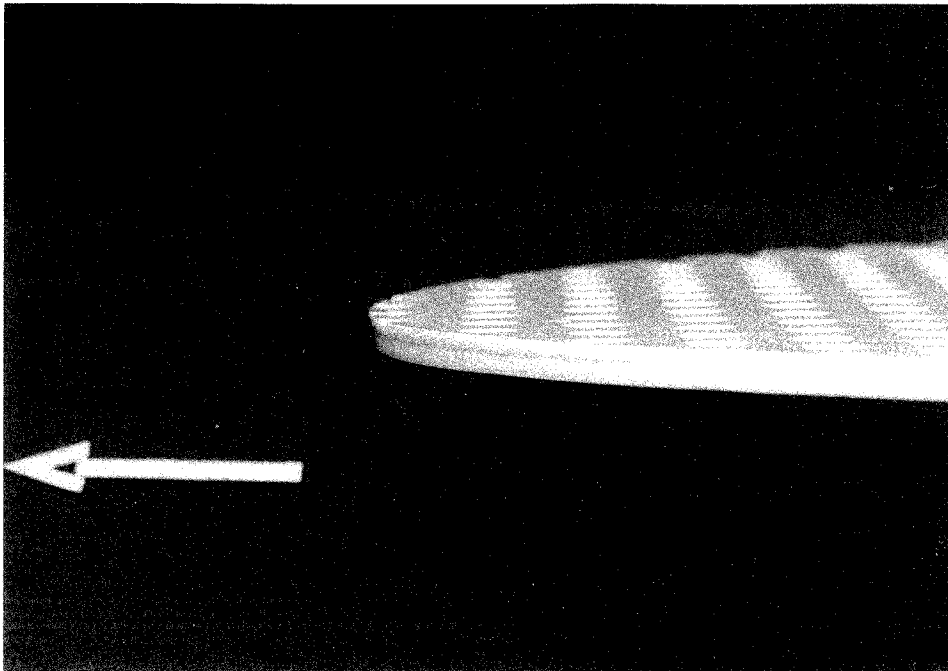
Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	0,3	2.7	5.0	7.5	10	20	30	T _A	T _E
A1-D250 P45 V2000 F _V = 2209 kN s ₀ = 150 mm f= 0,2 /s	1	max μ [%]	1.65	0.49	0.63	0.67	0.71	0.73	0.77	0.79	18,5	24,3
	2	max μ [%]	1.76	0.59	0.71	0.76	0.79	0.81	0.84	0.85	19,2	26,0
	3	max μ [%]	1.60	0.57	0.74	0.75	0.78	0.81	0.82	0.84	19,9	25,5
	Mittel		1.67	0.55	0.69	0.73	0.76	0.78	0.81	0.83	[°C]	



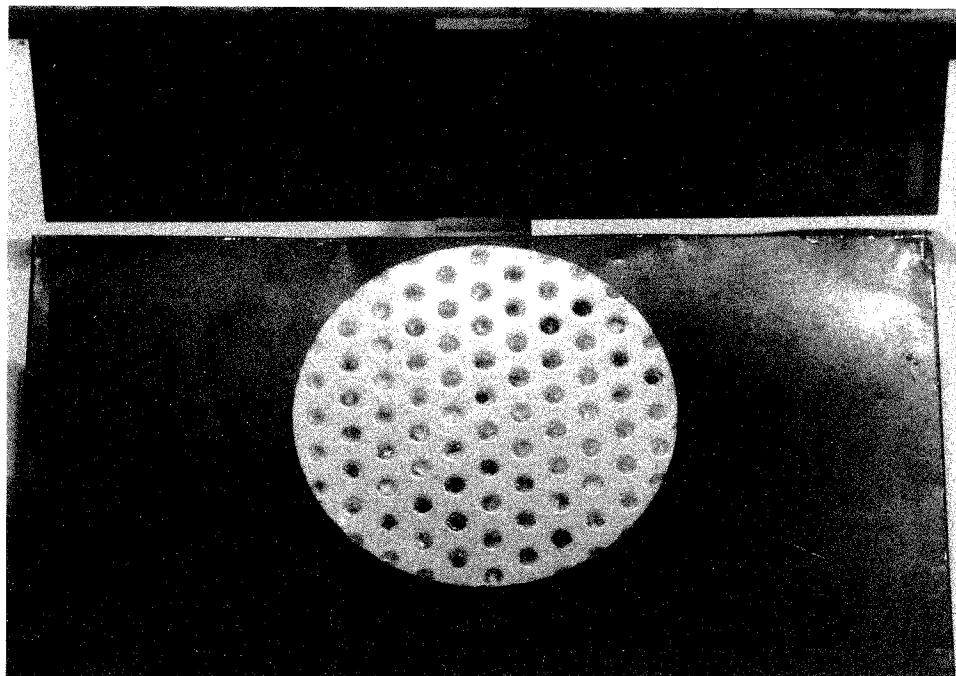
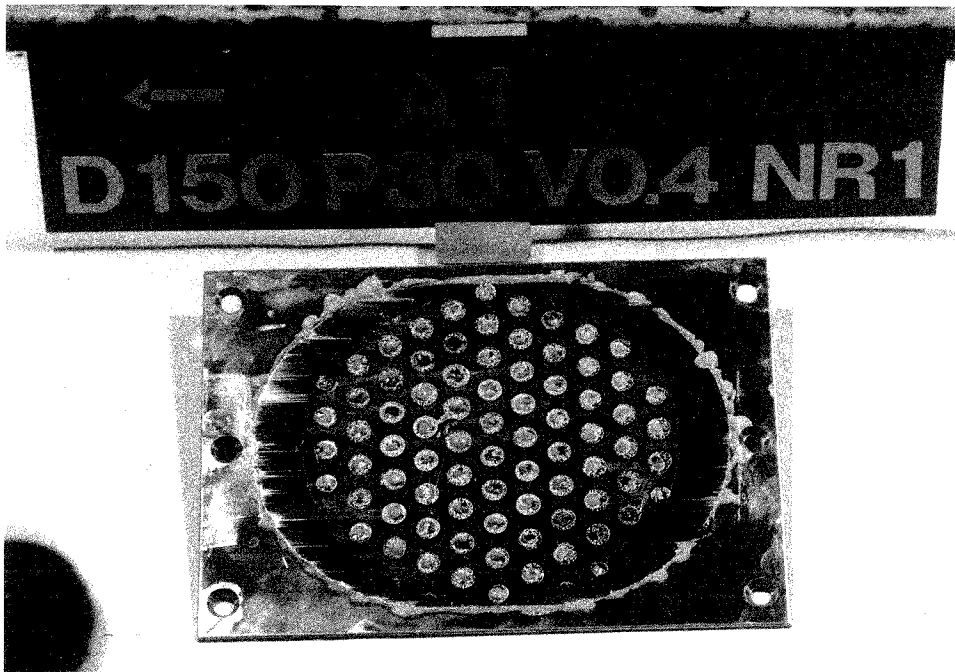
VERSUCHE: A1-D250 P45 V2000

Versuch	Nr	Gleitweg S[m]	0	3s ₀	2.7	5.0	7.5	10	20	30	65	100	T _A	T _E
A1-D450 P15 V150 F _v = 2386 kN s ₀ = ± 100 mm f = 0,375/s	1	max μ [%]	0.63	0.27	0.28	0.31	0.32	0.34	0.38	0.40			18,5	24,8
	2	max μ [%]	0.97	0.30	0.32	0.34	0.35	0.36	0.39	0.43			18,3	27
	3	max μ [%]	0.77	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.37	0.39	0.44	0.50	18,9	32
	Mittel		0.79	0.27	0.29	0.31	0.32	0.34	0.38	0.41			[°C]	

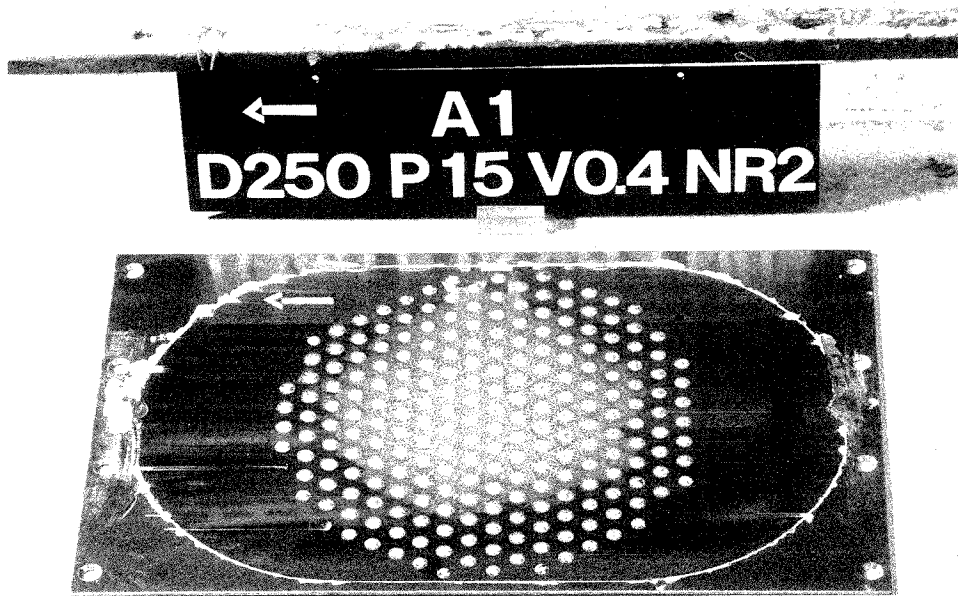




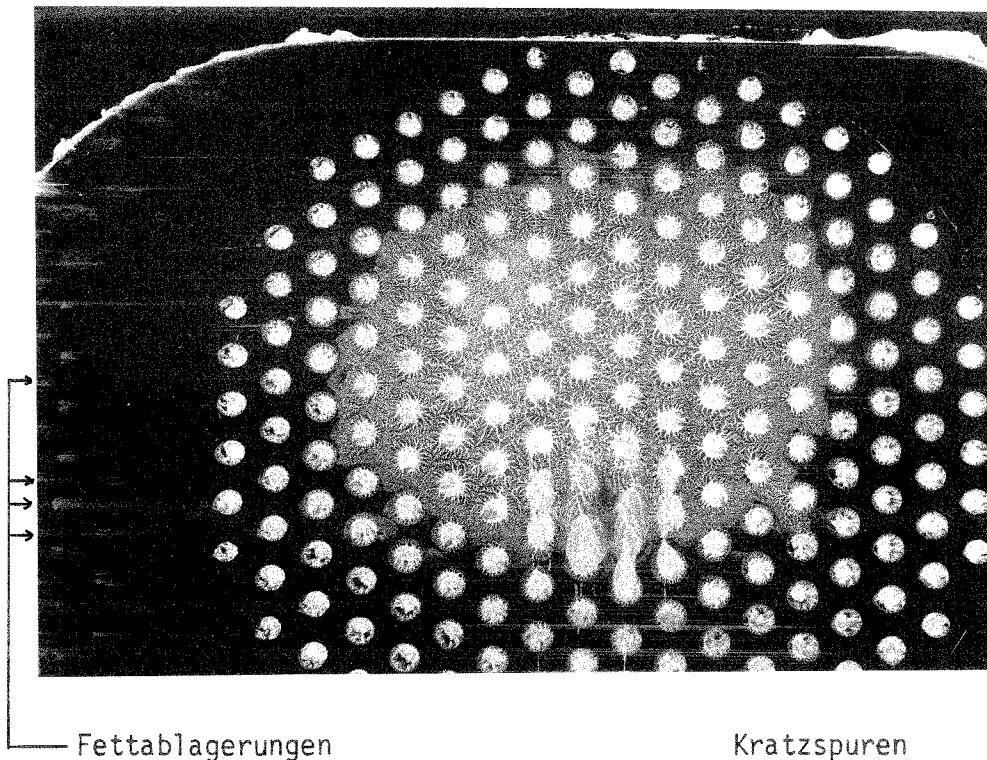
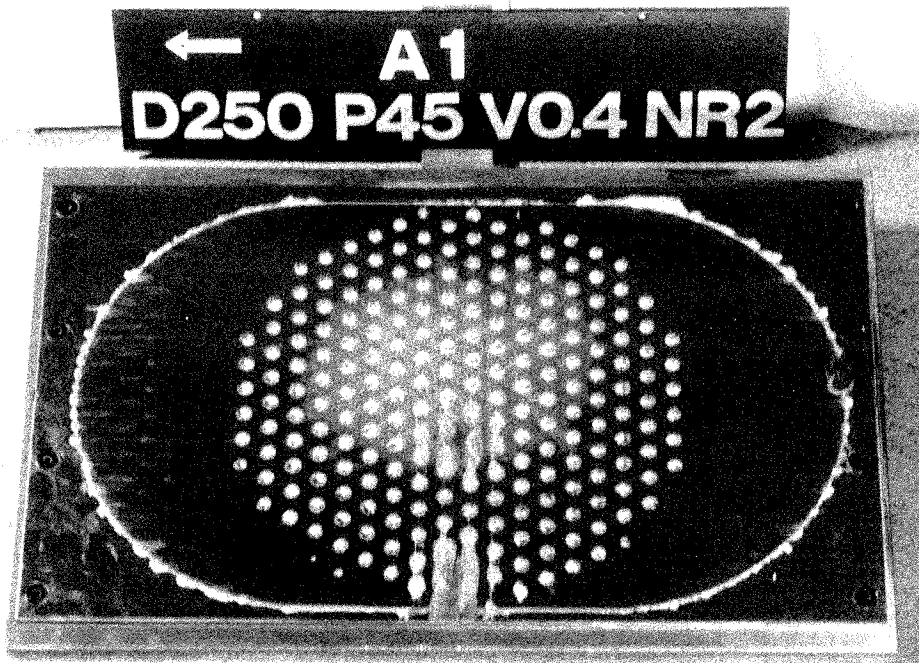
Bilder 3 und 4: Wulstbildung am Rand einer PTFE-Scheibe
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 45 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit $0,4 \text{ mm/s}$)



Bilder 5 und 6: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 150 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 0,4 mm/s, Verschiebeweg $\pm 20 \text{ mm}$)



Bilder 7 und 8: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 15 N/mm²,
Verschiebegeschwindigkeit 0,4 mm/s, Verschiebeweg \pm 75 mm)



Bilder 9 und 10: Aust. Gleitblech nach 30 m Gleitweg
(Lager-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 45 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit $0,4 \text{ mm/s}$, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)

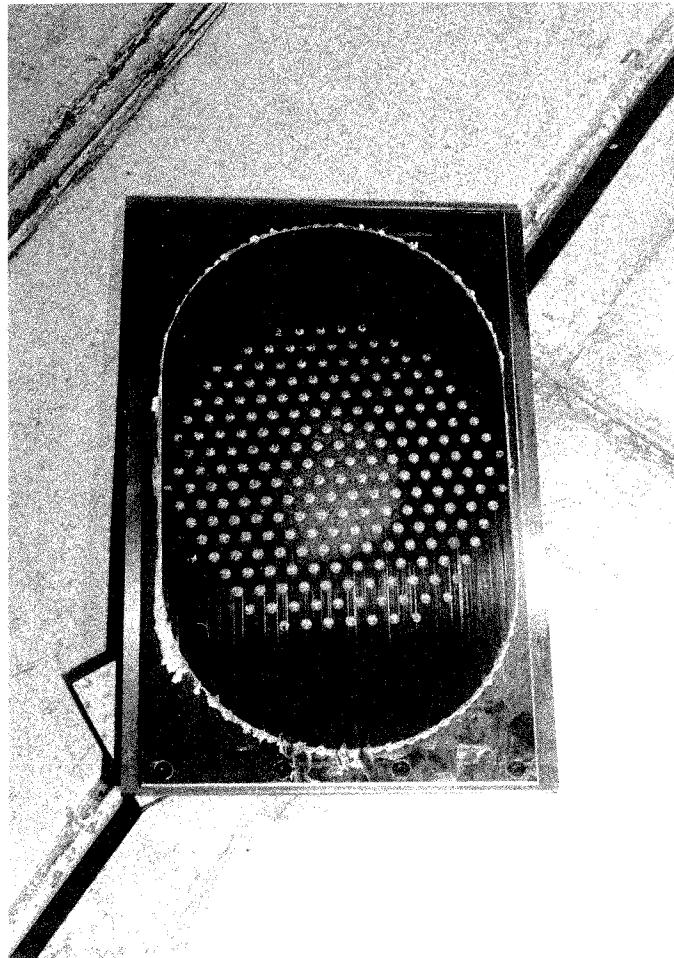
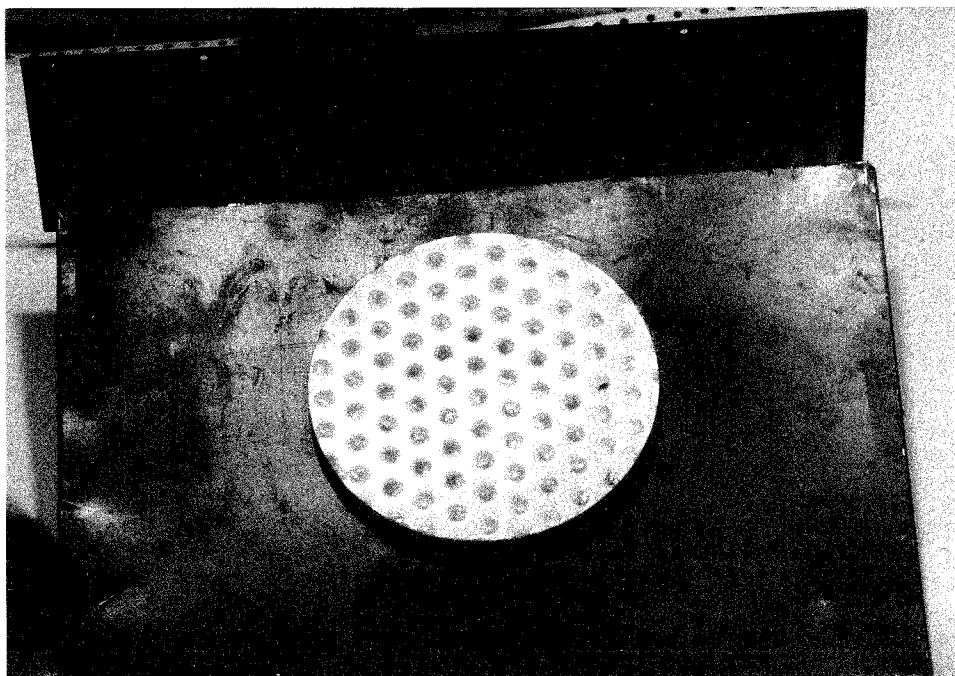
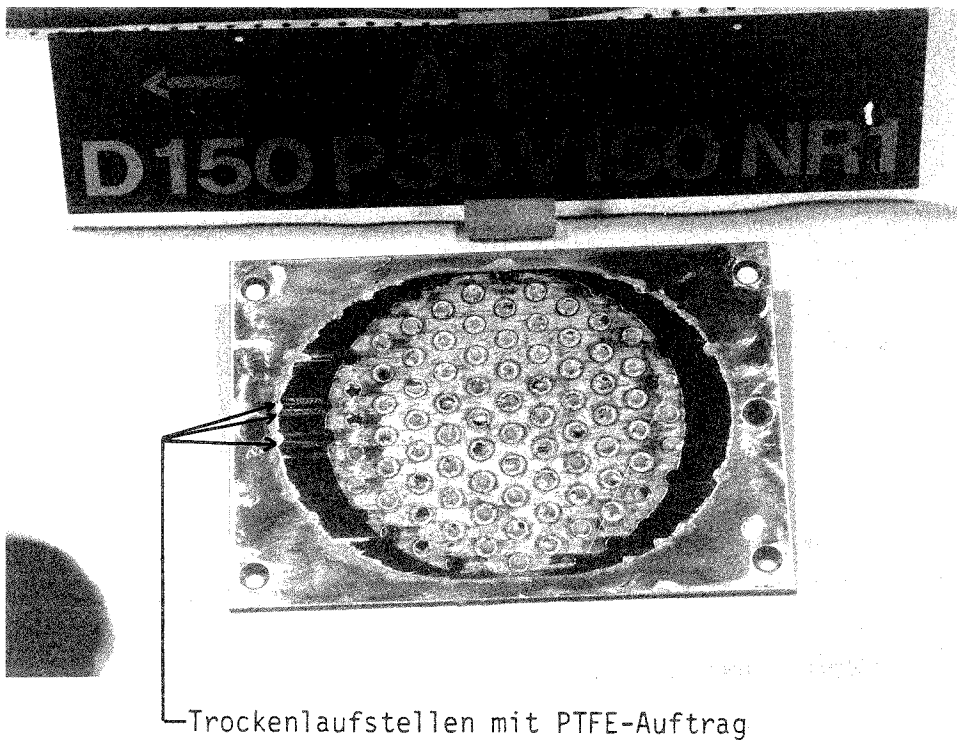
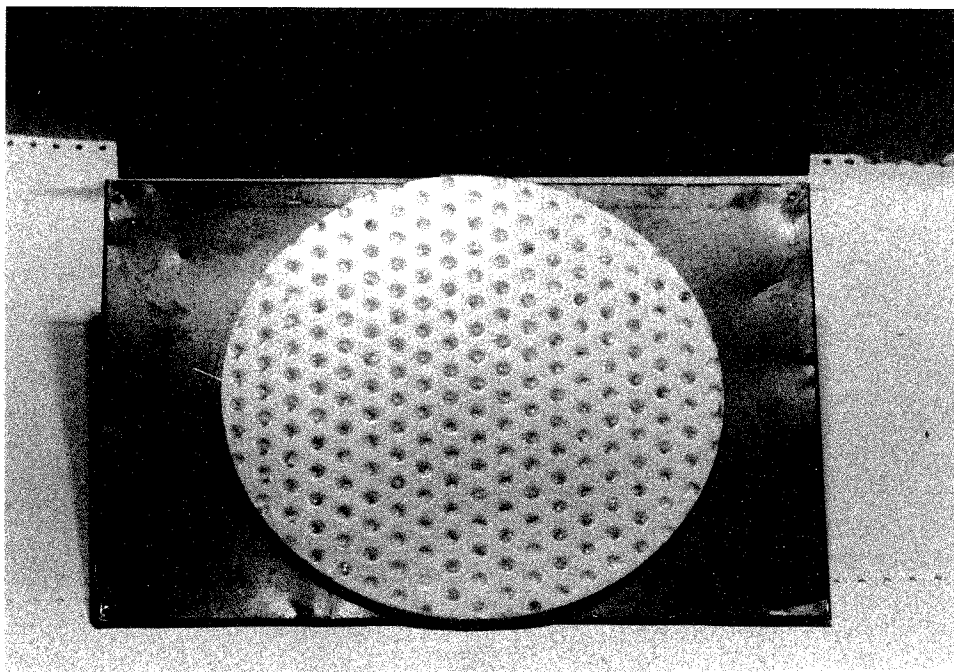
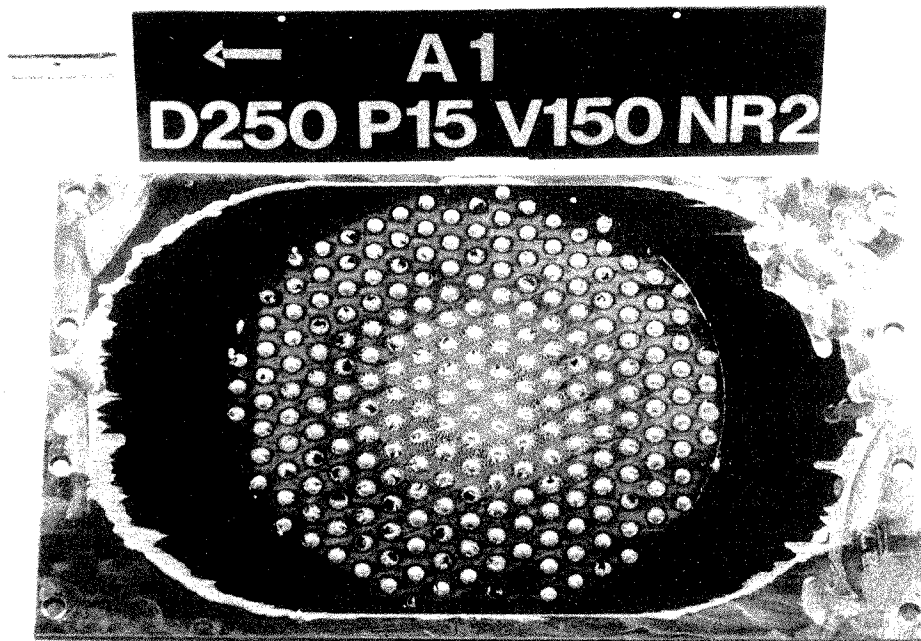


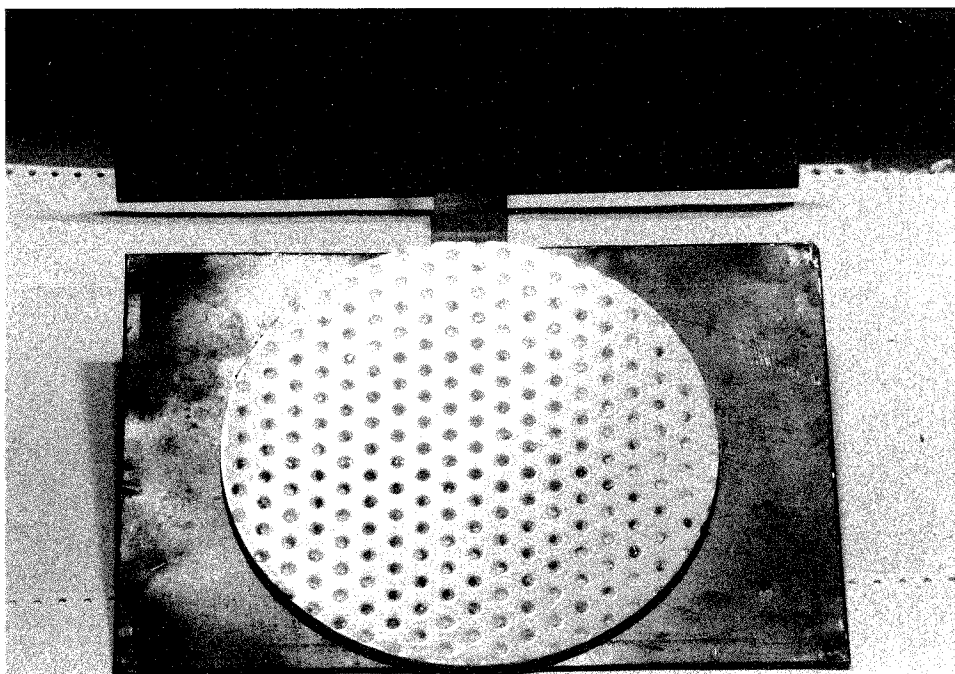
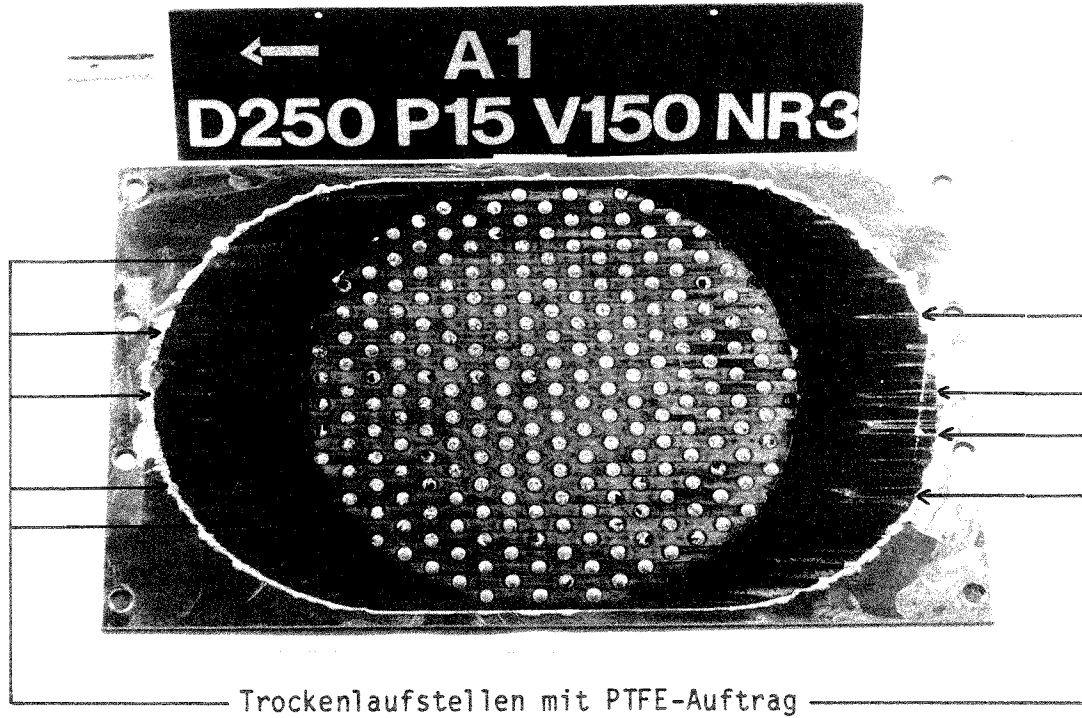
Bild 11: Aust. Gleitblech nach 30 m Gleitweg
mit feinem, bei Lichtspiegelung erkennbaren,
hell hervortretenden Kratzspuren
(Lagerdurchmesser 250 mm
Flächenpressung 45 N/mm²
Verschiebegeschwindigkeit 0,4 mm/s
Verschiebeweg \pm 75 mm)



Bilder 12 und 13: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 150 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s, Verschiebeweg $\pm 20 \text{ mm}$)

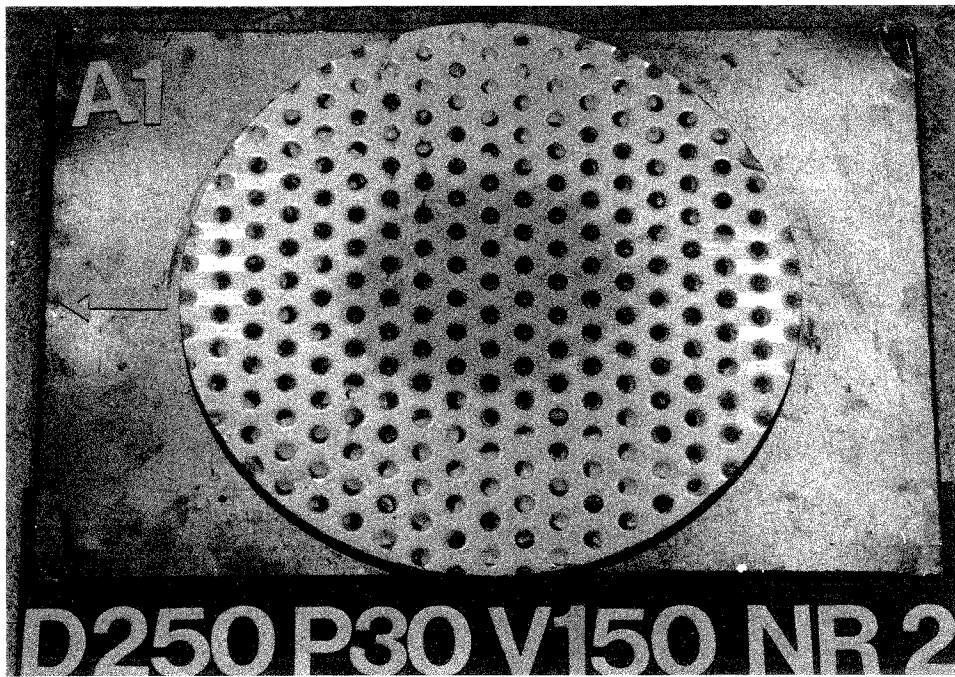


Bilder 14 und 15: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 15 N/mm²,
Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s, Verschiebeweg \pm 75 mm)

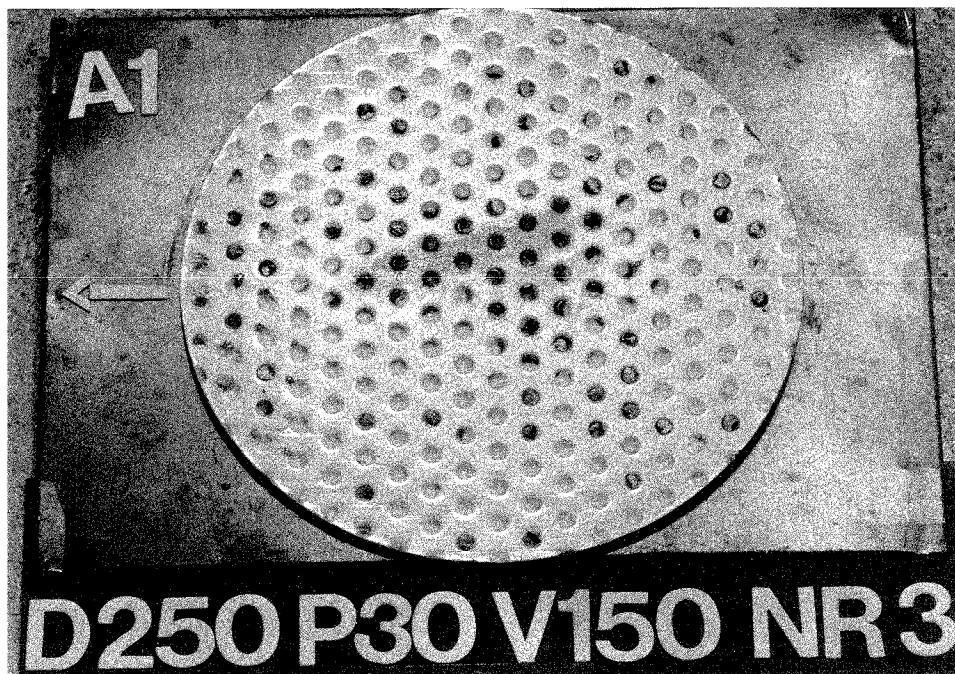


in Gleitrichtung
verlaufende,
streifenartige
Verschleißspuren

Bilder 16 und 17: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 100 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 15 N/mm²,
Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s, Verschiebeweg \pm 75 mm)

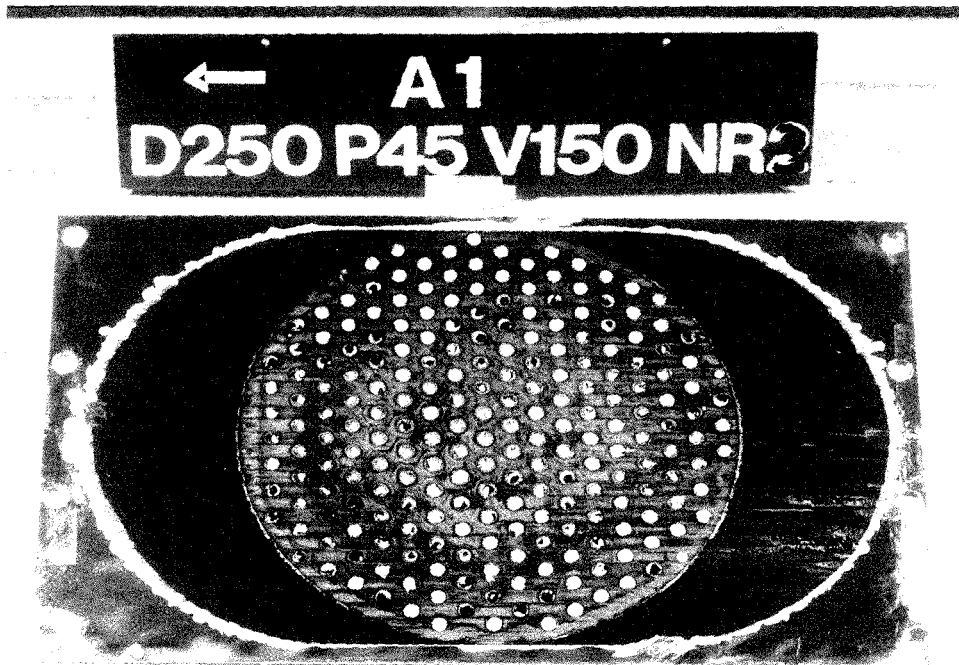


30 m
Gleitweg

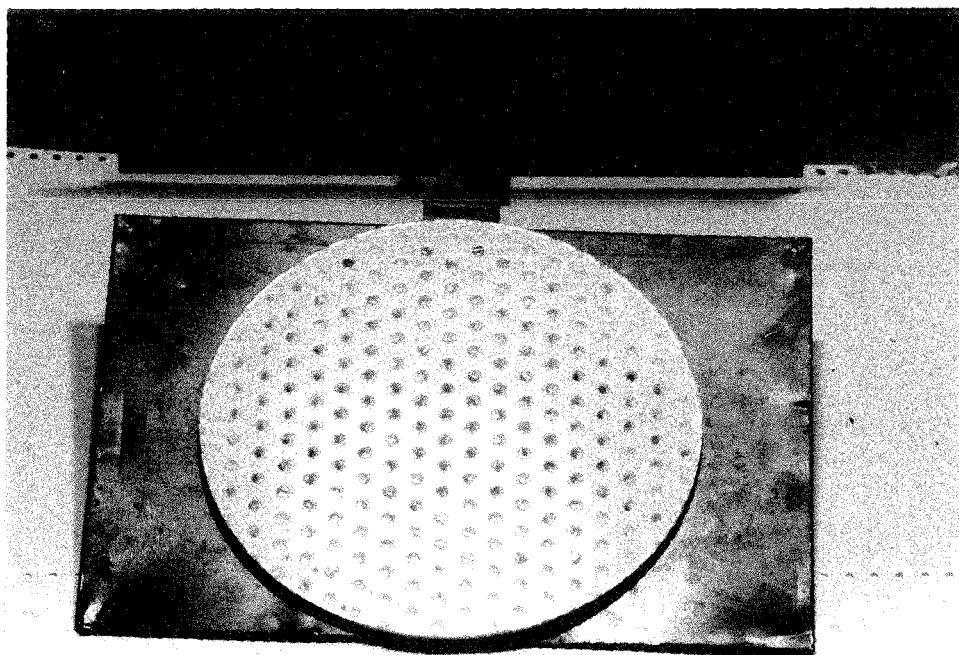


100 m
Gleitweg

Bilder 18 und 19: PTFE-Ronden nach 30 m bzw. 100 m Gleitweg mit streifenartigen, in Gleitrichtung verlaufenden Verschleißspuren und mit verbliebenem Fettfilm zwischen den Schmiertaschen im Scheibeninneren (PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 , Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s , Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$) (Anmerkung: fotografiert nach Eingilbung des Fettes am Tageslicht)

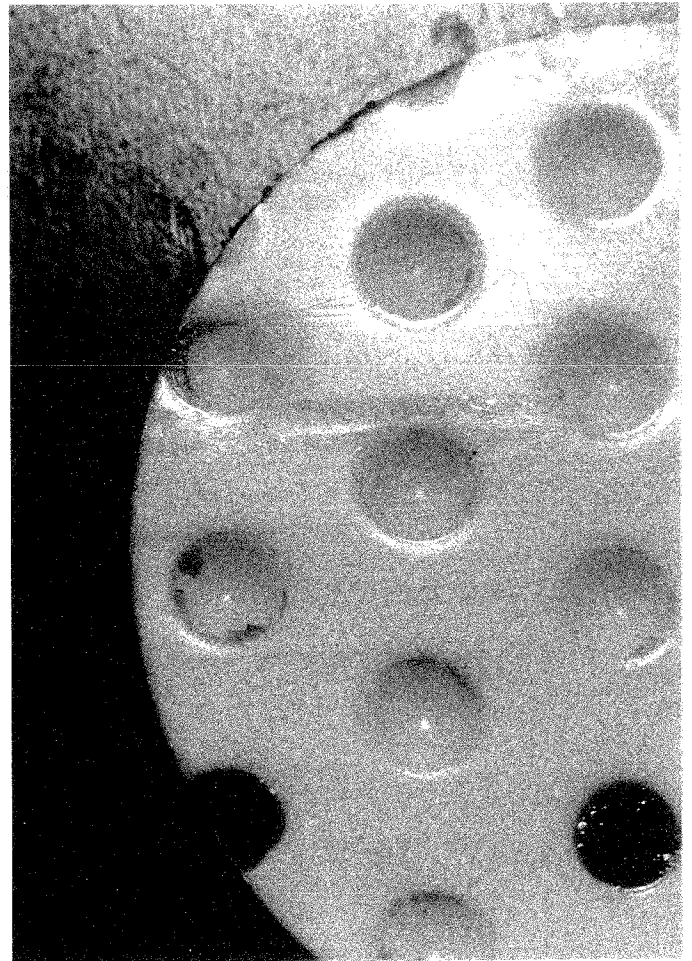
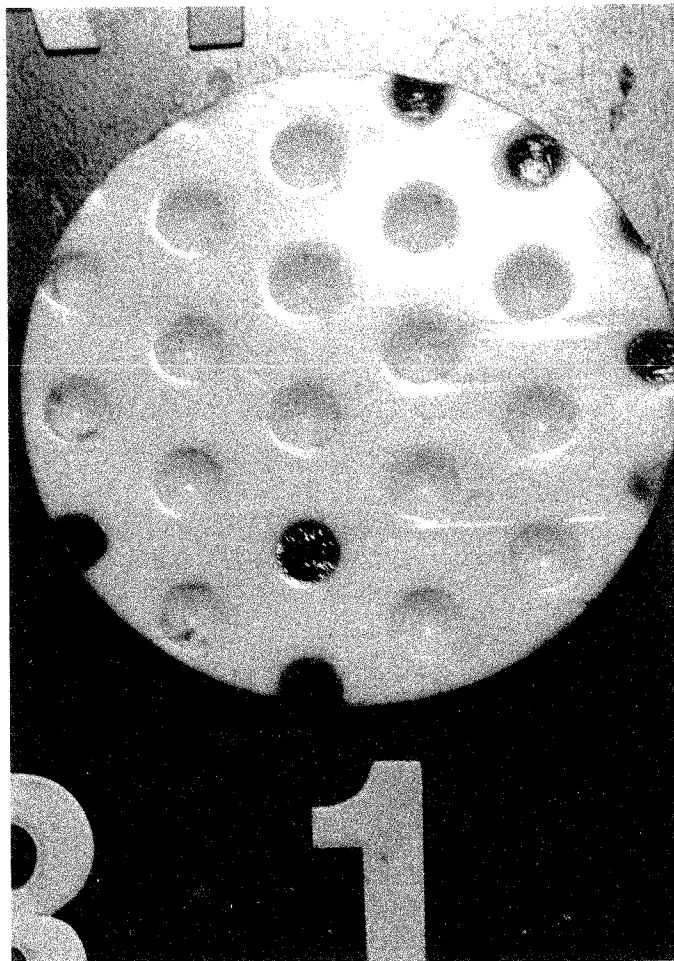
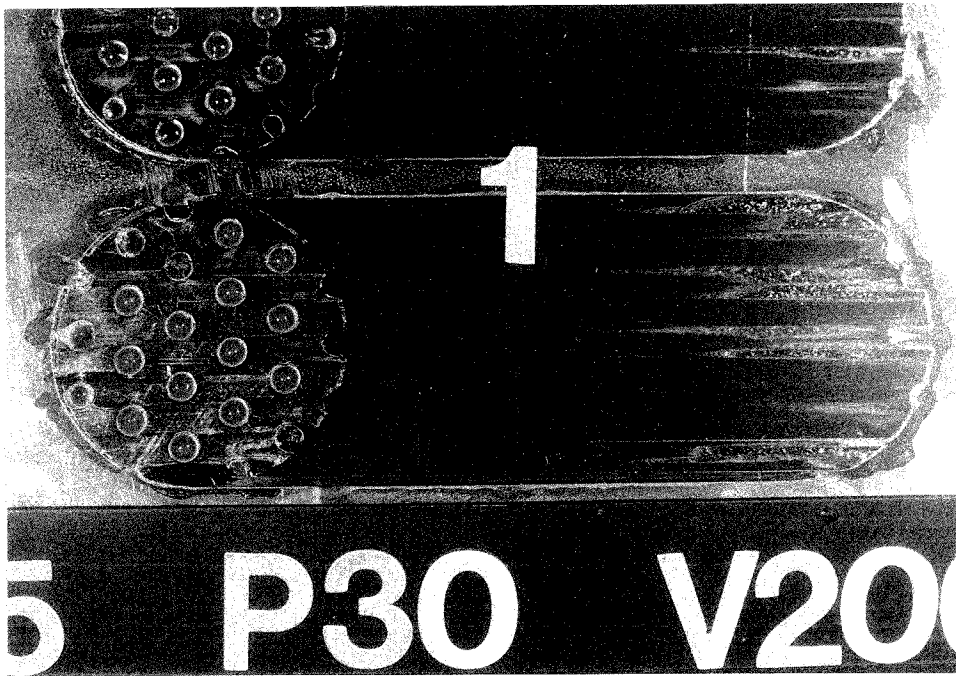


Trockenlaufstellen
mit PTFE-Auftrag

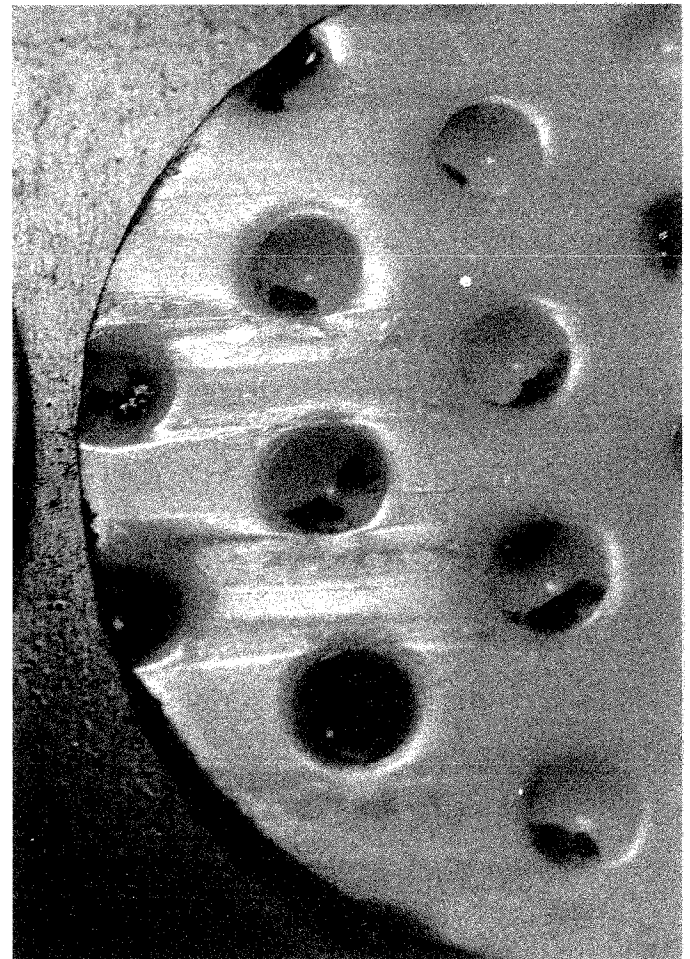
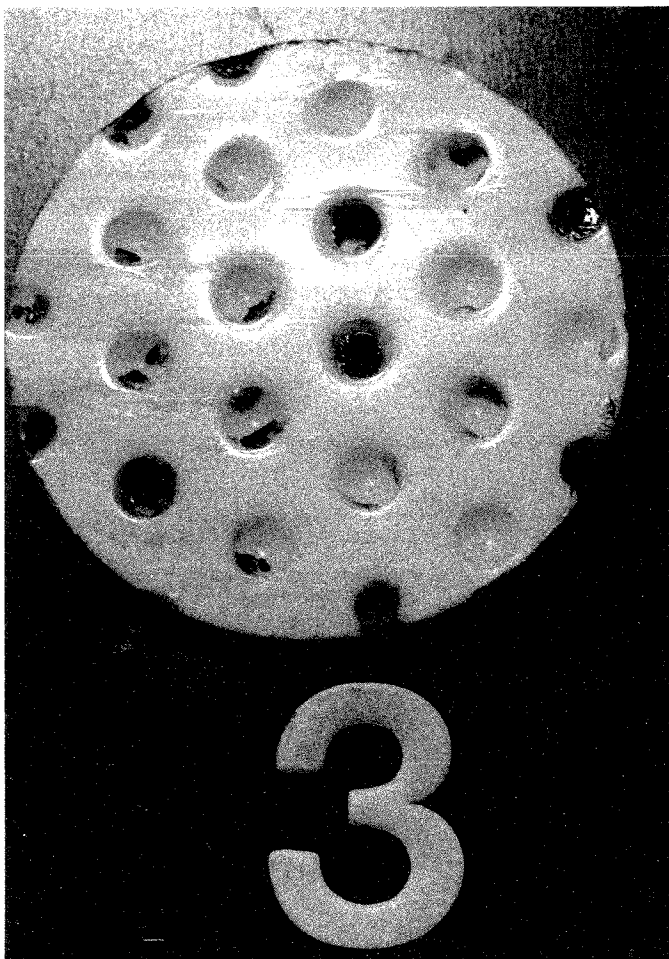
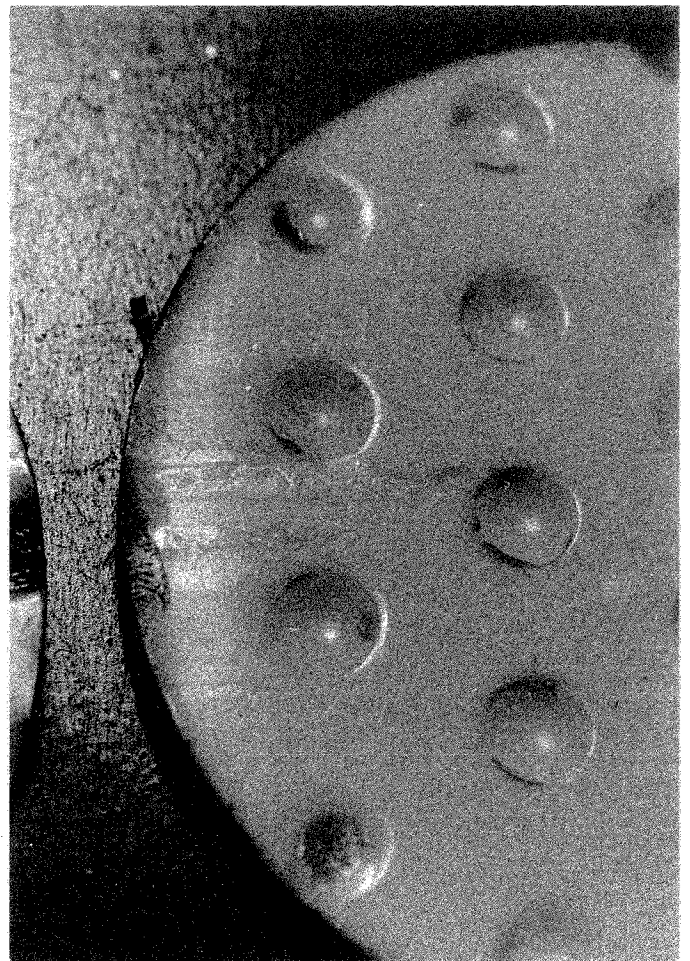
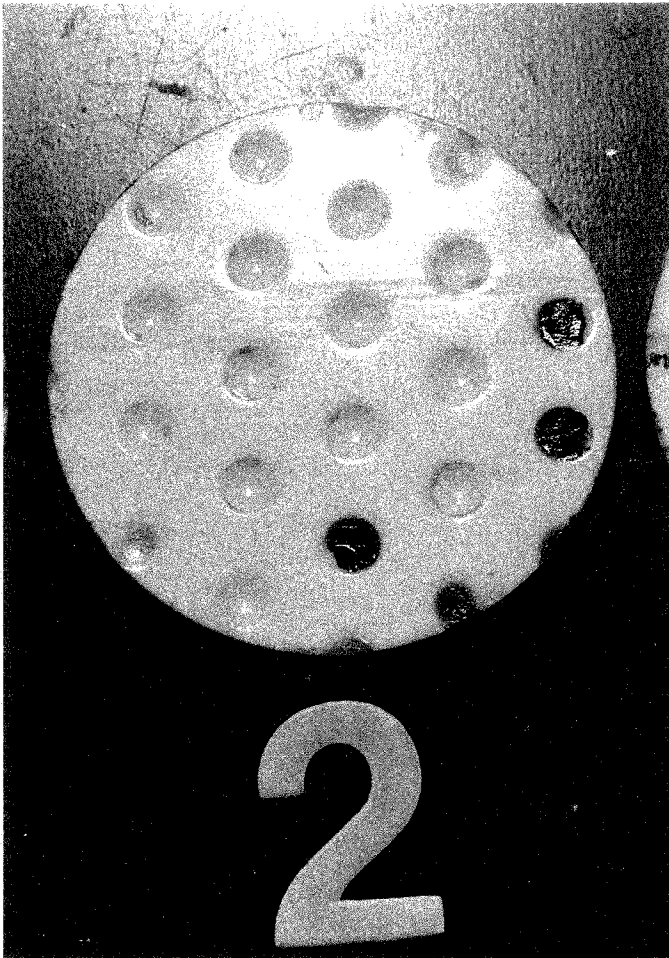


in Gleitrichtung
verlaufende,
streifenartige
Verschleißspuren

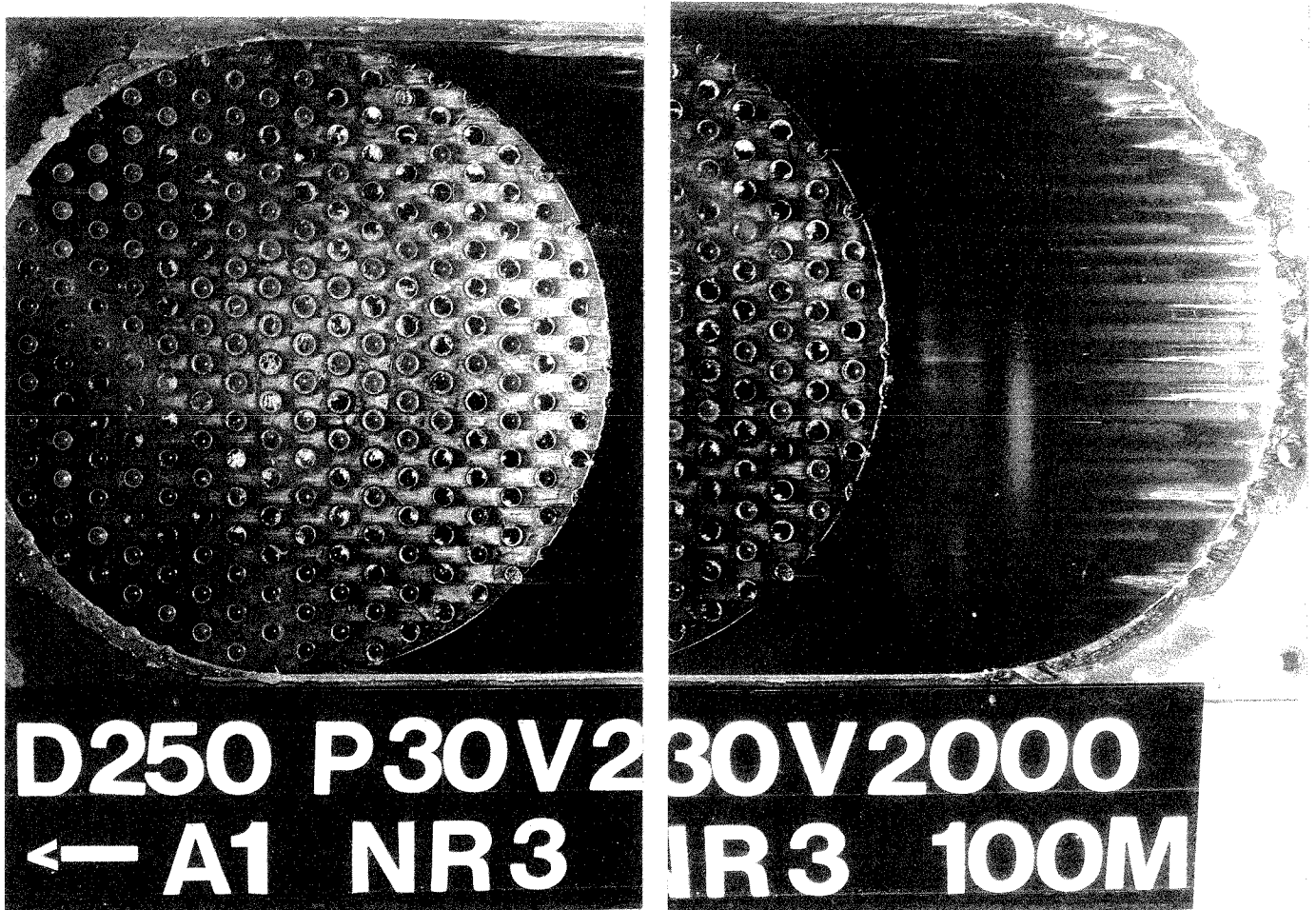
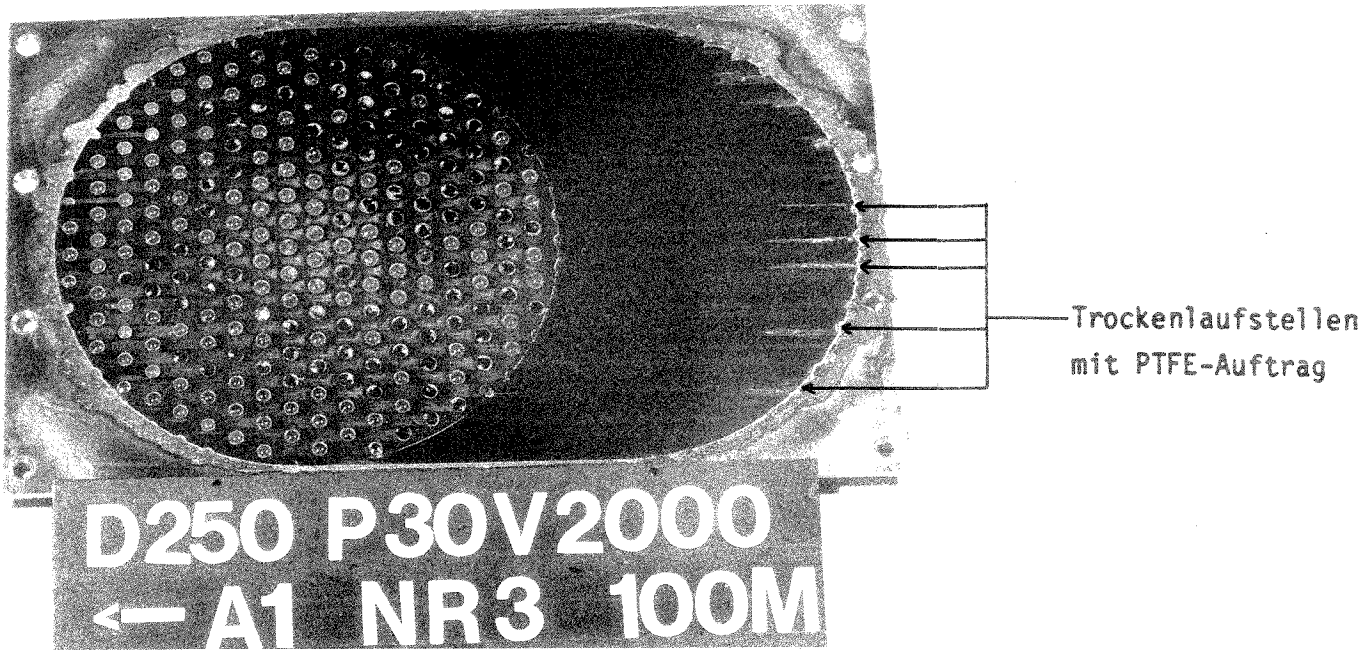
Bilder 20 und 21: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 100 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 45 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)



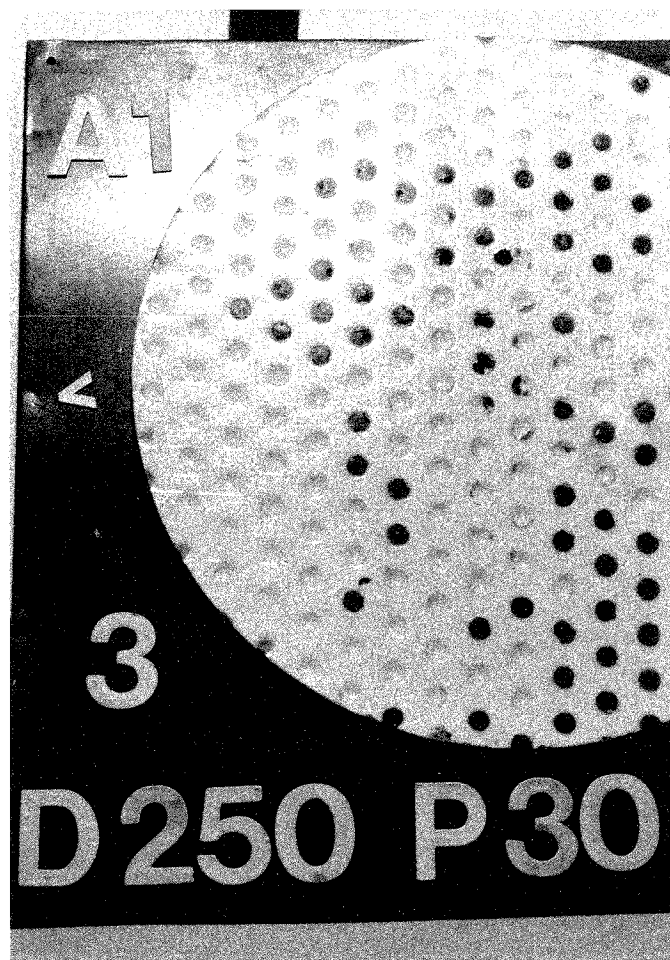
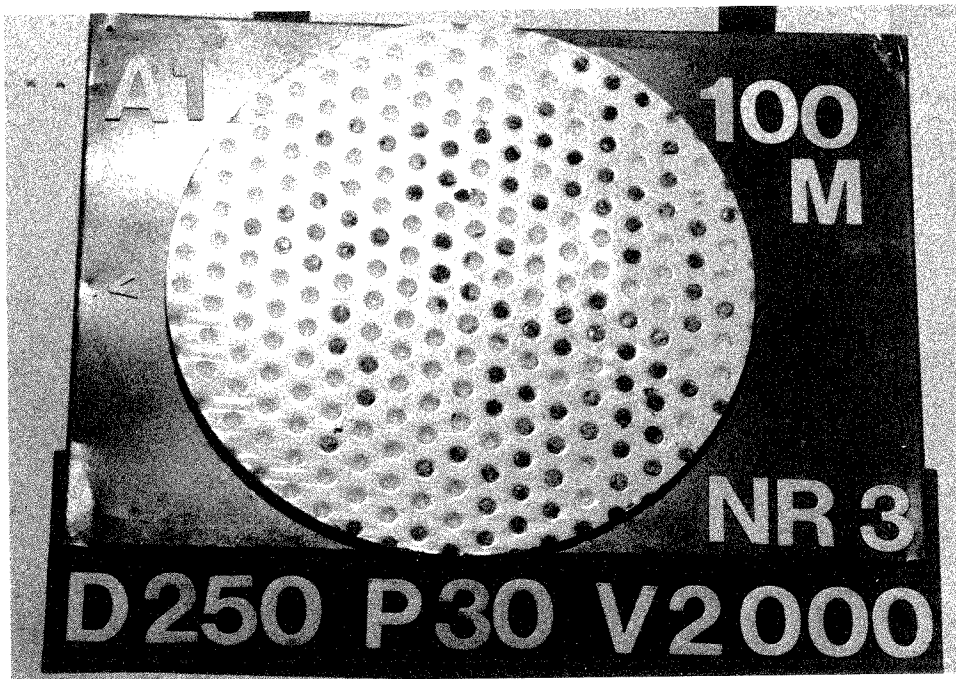
Bilder 22, 23 und 24: Aust. Gleitblech mit Trockenlaufstellen und PTFE-Auftrag; PTFE-Ronde mit Verschleißspuren in Gleitrichtung (PTFE-Durchmesser 75 mm, Flächenpressung 30 N/mm², Verschiebegeschwindigkeit 2000 mm/s, Gesamtgleitweg 30 m, Verschiebeweg 150 mm)



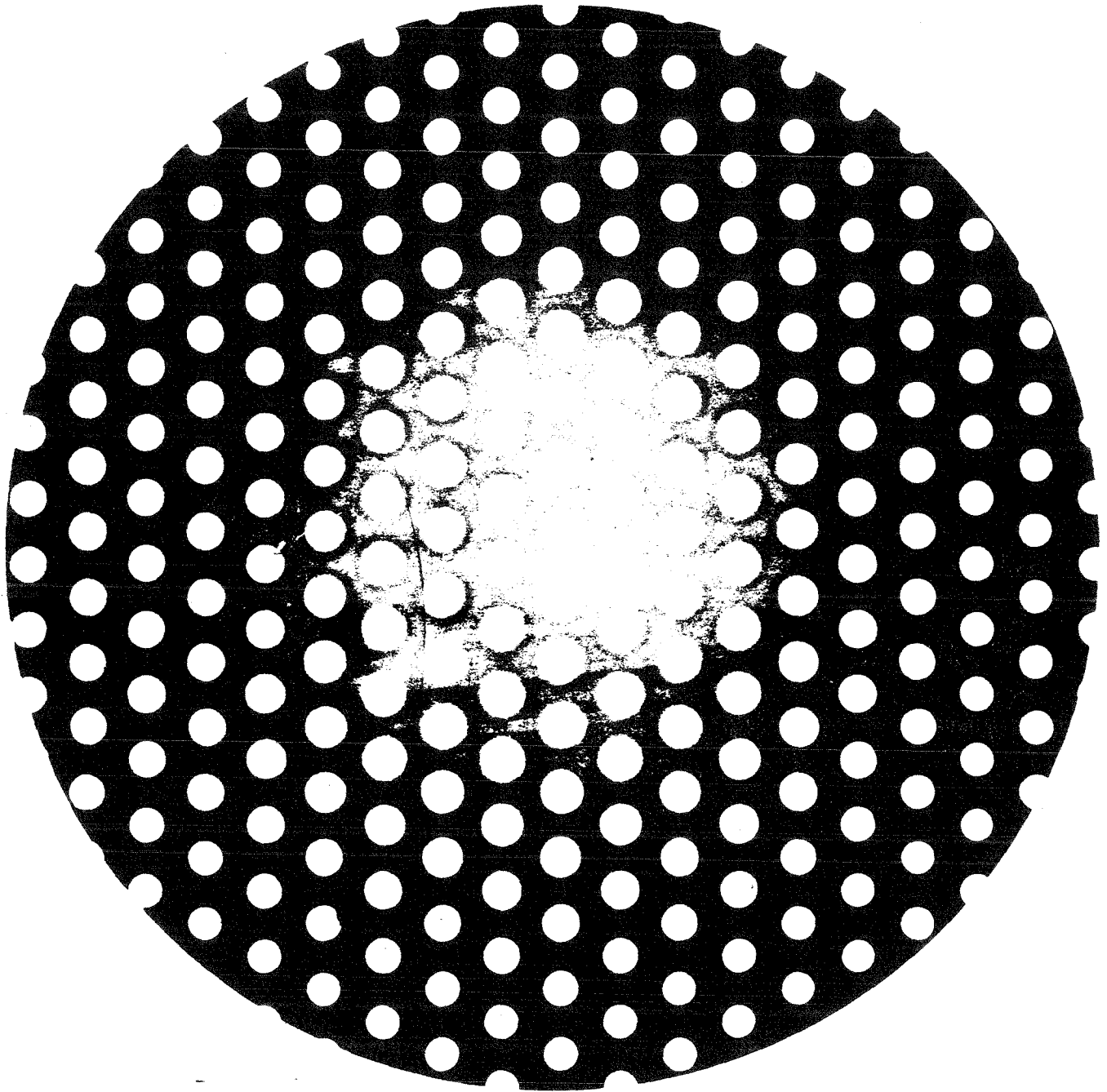
Bilder 25 bis 28: PTFE-Ronden mit Verschleißspuren in Gleitrichtung
(PTFE-Durchmesser 75 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 2000 mm/s ,
Gesamtgleitweg 30 m (oben Nr. 2) bzw. 100 m (unten Nr. 3))



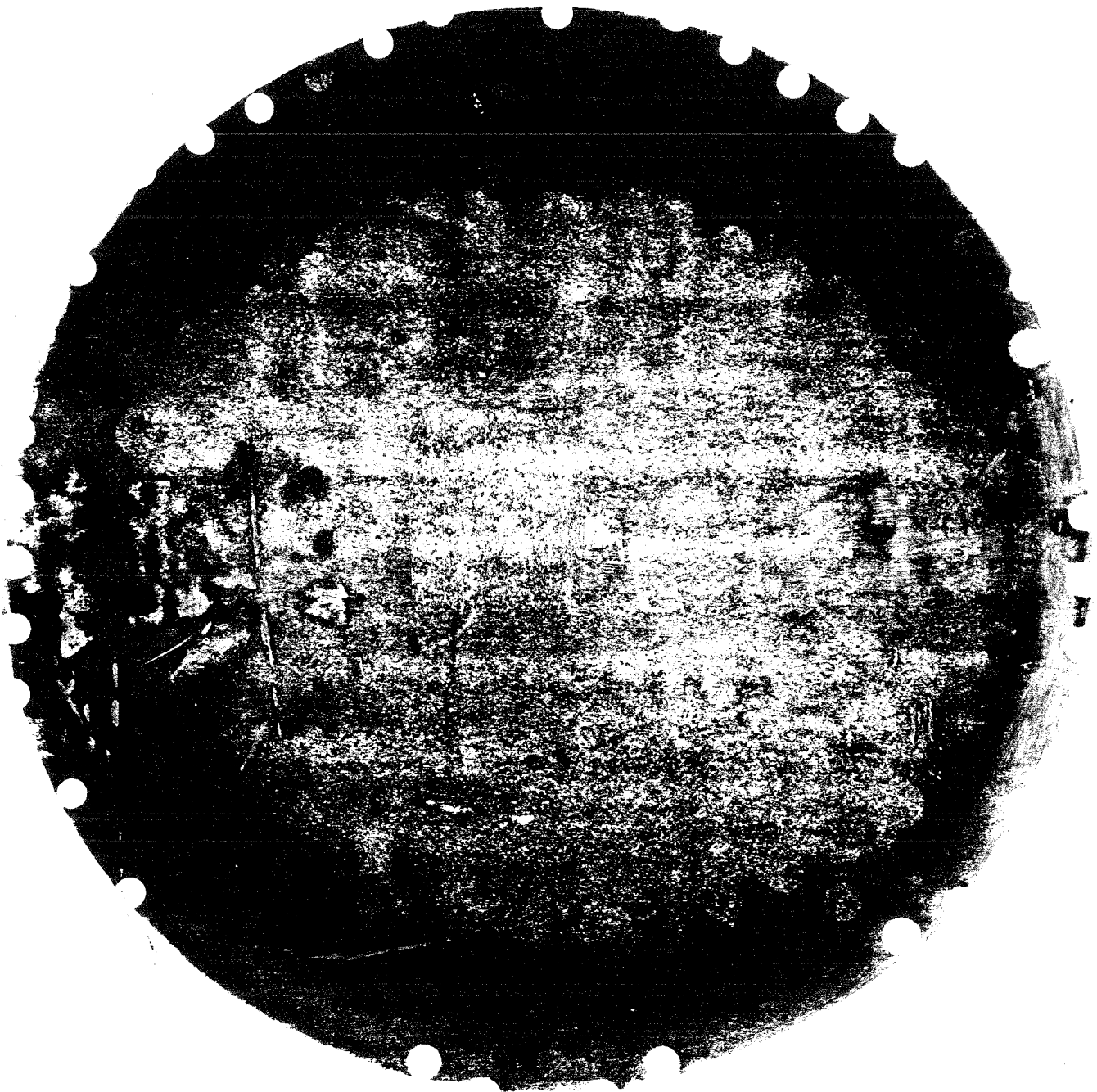
Bilder 29, 30 und 31: Aust. Gleitblech nach 100 m Gesamtgleitweg mit Trockenlaufstellen und PTFE-Auftrag am rechten Rand der Gleitfläche (Lagerdurchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm², Verschiebegeschwindigkeit 2000 mm/s, Verschiebeweg 150 mm)



Bilder 32 und 33: PTFE-Ronde nach 100 m Gleitweg mit streifenartig verlaufenden Verschleißspuren (PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm², Verschiebegeschwindigkeit 2000 mm/s, Verschiebeweg 150 mm)



Druckbild eines ungeschmierten Lagers \varnothing 250 mm bei zentrischer Belastung
mit einer mittl. Pressung von 15 N/mm^2
(aufgenommen mit einer in den Gleitspalt eingelegten Druckmeßfolie)



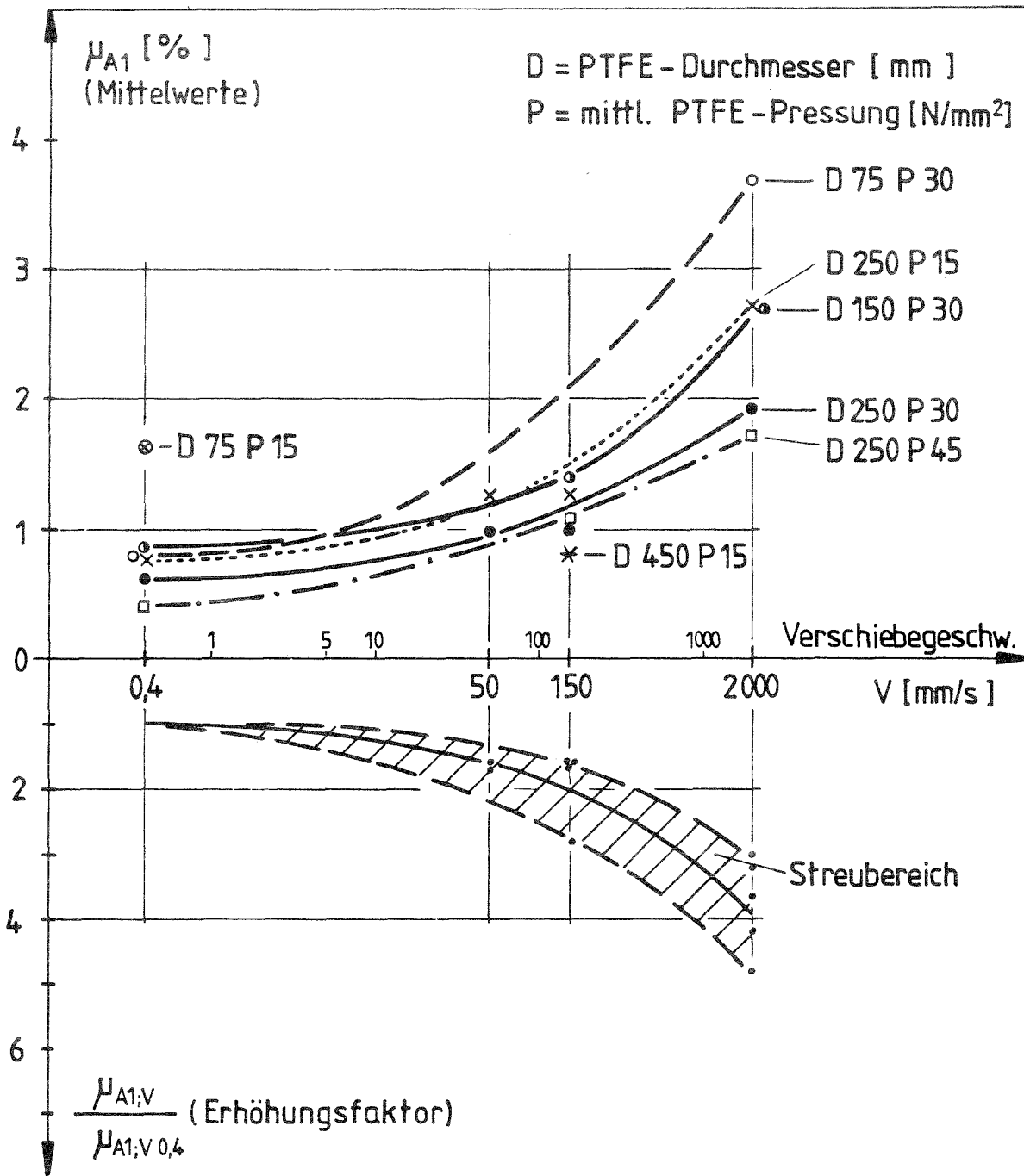
Druckbild eines geschmierten Lagers \varnothing 250 mm bei zentrischer Belastung
mit einer mittl. Pressung von 15 N/mm^2
(aufgenommen mit einer in den Gleitspalt eingelegten Druckmeßfolie)

Versuchsreihe A1:

Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern

Anfahrreibung μ_{A1} bei unterschiedlichen Verschiebegeschwindigkeiten								
PTFE-Durchmesser D [mm]	D75			D150	D250			D450
Mittlere PTFE-Pressung [N/mm ²]	15	30	45	30	15	30	45	15
Verschiebegeschwindigkeit v [mm/s]	Mittelwerte der Reibungszahlen μ_{A1} [%] aus je 3 Versuchen							
0,4	1,62	0,76	0,94	0,85	0,75	0,62	~0,4*	-
50	-	-	-	-	1,26	0,98	-	-
150	-	-	-	1,37	1,24	1,0	1,12	0,79
2000	-	3,66	-	2,69	2,7	1,88	1,67	-
Verhältnswerte der mittl. Reibungszahlen μ_{A1} bei unterschiedl. Verschiebegeschw.								
$\frac{\mu_{V50}}{\mu_{V0,4}}$	-	-	-	-	1,7	1,6	-	-
$\frac{\mu_{V150}}{\mu_{V0,4}}$	-	-	-	1,6	1,65	1,6	~2,8	-
$\frac{\mu_{V2000}}{\mu_{V0,4}}$	-	4,8	-	3,2	3,6	3,0	~4,2	-

(* Nur Versuch Nr. 1 gewertet)

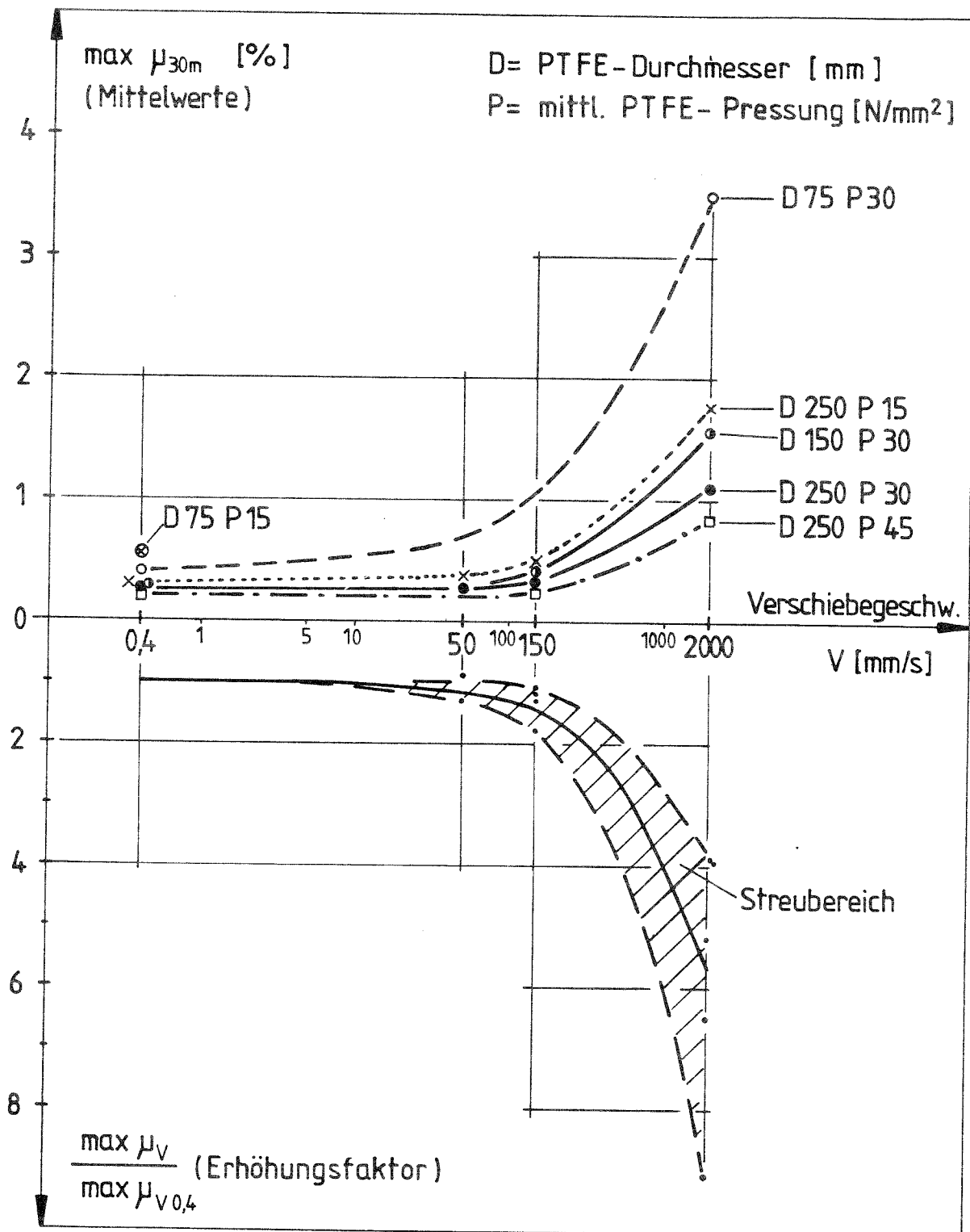


Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern (Versuchsreihe A1):
 Geschwindigkeitsabhängigkeit der Anfahrreibung μ_{A1} und
 Erhöhungsfaktoren

Versuchsreihe A1:

Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern

Reibungszahlen max μ_{30m} nach 30 m Gleitweg bei unterschiedlichen Verschiebegeschwindigkeiten								
PTFE-Durchmesser D [mm]	D75			D150	D250			D450
Mittlere PTFE-Pressung [N/mm ²]	15	30	45	30	15	30	45	15
Verschiebegeschwindigkeit v [mm/s]	Mittelwerte der Reibungszahlen max μ [%] aus je 3 Versuchen							
0,4	0,52	0,38	0,29	0,30	0,27	0,28	0,21	-
50	-	-	-	-	0,36	0,25	-	-
150	-	-	-	0,39	0,49	0,31	0,26	0,41
2000	-	3,47	-	1,56	1,76	1,08	0,83	-
Verhältniswerte der mittl. Reibungszahlen max μ nach 30 m Gleitweg bei unterschiedl. Verschiebegeschw.								
$\frac{\mu_{V50}}{\mu_{V0,4}}$	-	-	-	-	1,3	0,9	-	-
$\frac{\mu_{V150}}{\mu_{V0,4}}$	-	-	-	1,3	1,8	1,1	1,2	-
$\frac{\mu_{V2000}}{\mu_{V0,4}}$	-	9,1	-	5,2	6,5	3,9	3,95	-



Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern (Versuchsreihe A1):
 Geschwindigkeitsabhängigkeit der max. Reibungszahlen nach 30 m
 Gesamtgleitweg

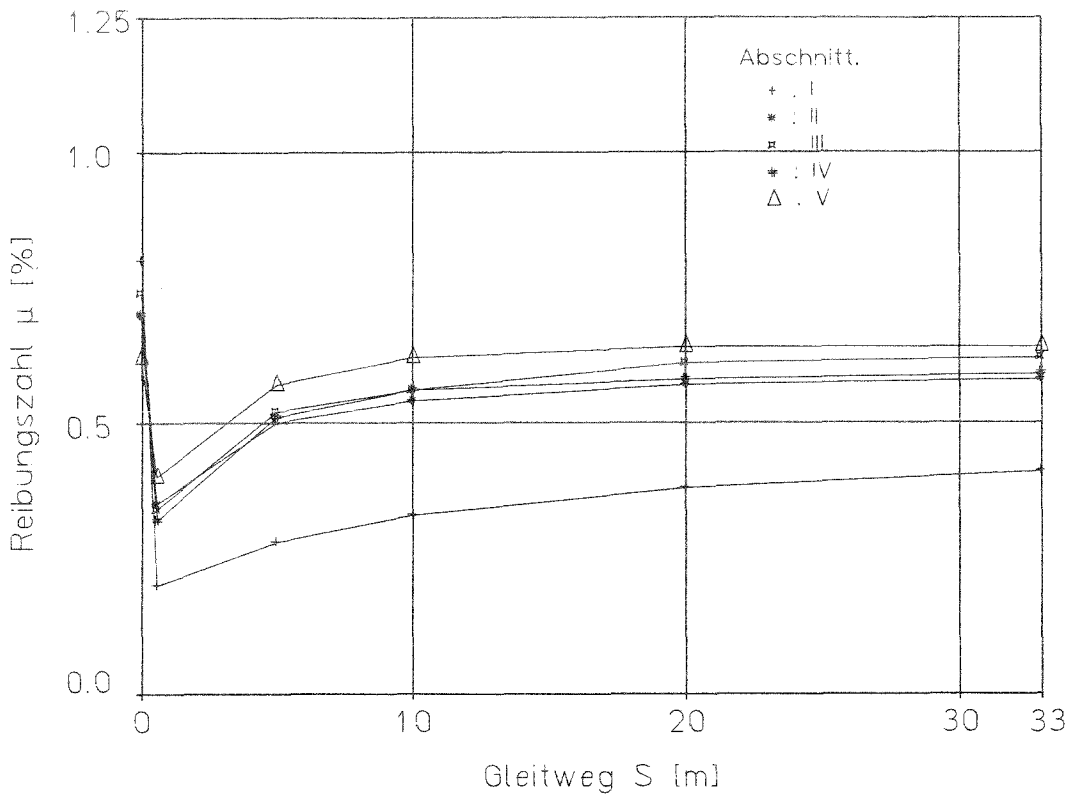
Versuchsreihe A2: Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über ca. 2200 m Gesamtgleitweg

Versuchsreihe A2

Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern
(PTFE weiß/aust. Stahl, Schmierung mit Siliconfett u. Schmierstoffspeicherung)

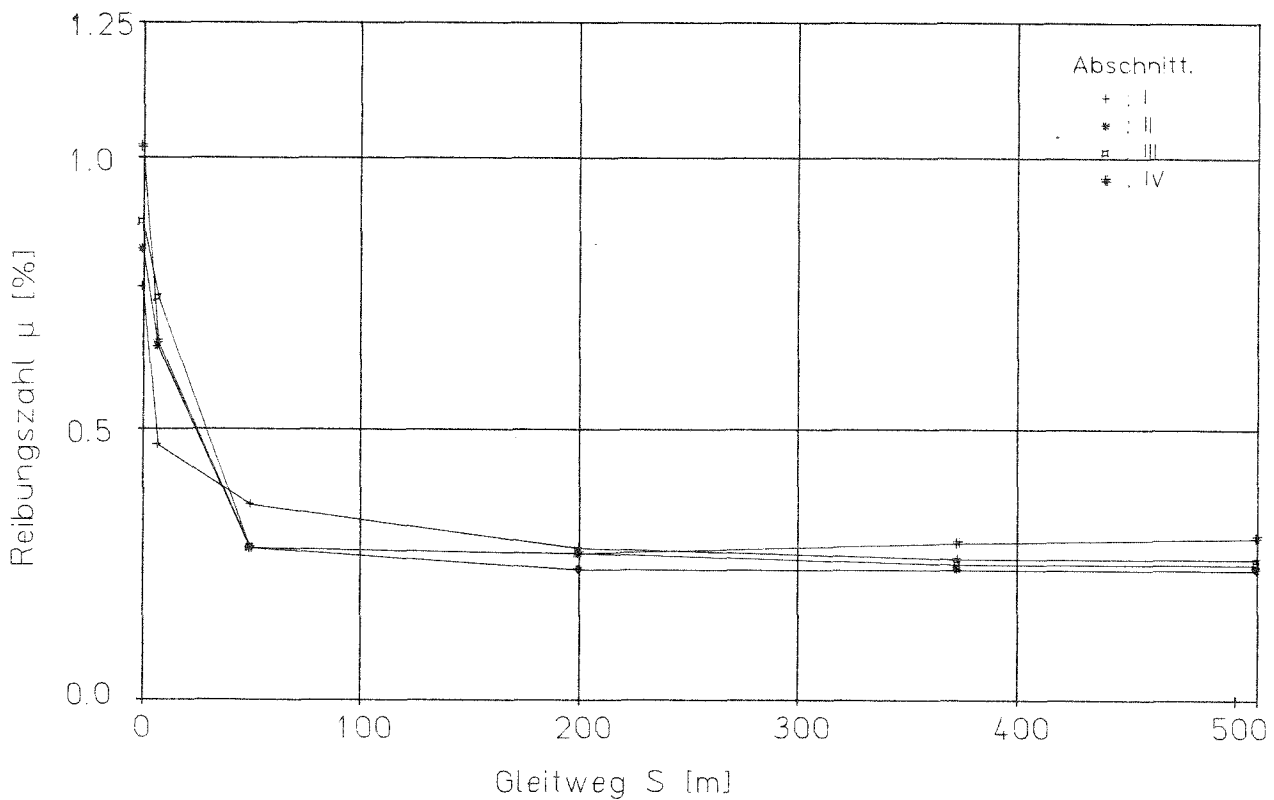
v [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	p [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	p · v-Wert [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	PTFE-Durchmesser D [mm]	
			∅ 75	∅ 250
0,4 u. 2,0	30	12 u. 60	1	1
150 u. 2,0	30	4500 u. 60	-	1
Vorbelastungszeit t_v [h]			1	1
Verschiebeweg s_0 [mm]			± 5	± 75
Gesamtgleitweg S			5 Abschnitte à 33 m (v=0,4; 150) 4 Abschnitte à 510 m (v=2 mm/s) total: 2205 m	
Vorgegebene Weg-Zeit-Funktion des Gleitschiebers			linear ohne Leerlaufspiel	
Messungen			<ul style="list-style-type: none"> - Verschiebewiderstand $F_H(t)$ - Gleitschieberweg $s(t)$ - Temperatur - Dicken- und Gewichtsänderung der PTFE-Ronden, soweit mit vorh. Geräten meßbar 	
<u>Versuchsablauf</u>				
Versuchsabschnitt	Belastung mit $p = 30 \text{ N/mm}^2$ (konstant während der Versuchsdauer)			
I/1	Standzeit: $t = 1$ Stunde ohne Bewegung			
	Gleiten 1: $v = 0,4$ bzw. 150 mm/s $s_0 = \pm 5 \text{ mm } (\emptyset 75); \pm 75 (\emptyset 250)$ $S_1 = 33 \text{ m}$			
I/2	Standzeit: $t = 1$ Stunde ohne Bewegung			
	Gleiten 2: $v = 2 \text{ mm/s}$ $s_0 = \pm 5 \text{ mm } (\emptyset 75); \pm 75 (\emptyset 250)$ $S_2 = 510 \text{ m}$			
II bis IV	wie Versuchsabschnitt I/1 + I/2			
V	wie Versuchsabschnitt I/1			
<p>v = Verschiebegeschwindigkeit des Gleitschiebers s_0 = Verschiebeweg; S_1, S_2 = Gleitweg je Versuchsabschnitt p = mittlere PTFE-Pressung</p>				
<p>Versuchsbezeichnungen : A2-D75 P30 V0,4/2,0 A2-D250 P30 V0,4/2,0 A2-D250 P30 V150/2,0</p>				

Versuch Nr.	A2 - D75 P30 V 0.4/2.0												
Gleitgeschw. v	0.4 mm/s						2.0 mm/s						
Versch.weg s_0	± 5 mm						± 5 mm						
Gleitweg S_i [m]	0	0.23	5	10	20	33	0	0.23	50	200	373	510	
Abschnitt	Gleiten 1						Gleiten 2						
I	μ	0.80	0.20	0.28	0.33	0.38	0.41	0.76	0.47	0.36	0.28	0.26	0.26
	T	18.8					19.3	19.4		20.0	20.2	20.5	20.6
II	μ	0.70	0.35	0.50	0.54	0.57	0.58	0.83	0.65	0.28	0.24	0.24	0.24
	T	20.6				21.0	20.6	20.6		21.0	20.6		20.0
III	μ	0.74	0.34	0.52	0.56	0.61	0.62	0.88	0.74	0.28	0.27	0.25	0.25
	T	20.1					20.7	20.7		21.6	21.4	21.8	22.0
IV	μ	0.70	0.32	0.51	0.56	0.58	0.59	1.02	0.66	0.28	0.27	0.29	0.30
	T	22.0				21.7	21.7	21.7		21.3		20.4	20.5
V	μ	0.62	0.40	0.57	0.62	0.64	0.64						
	T	20.4				19.7	20.0						
Reibungszahl μ [%]; Temperatur T[°C] der Gleitplatte													



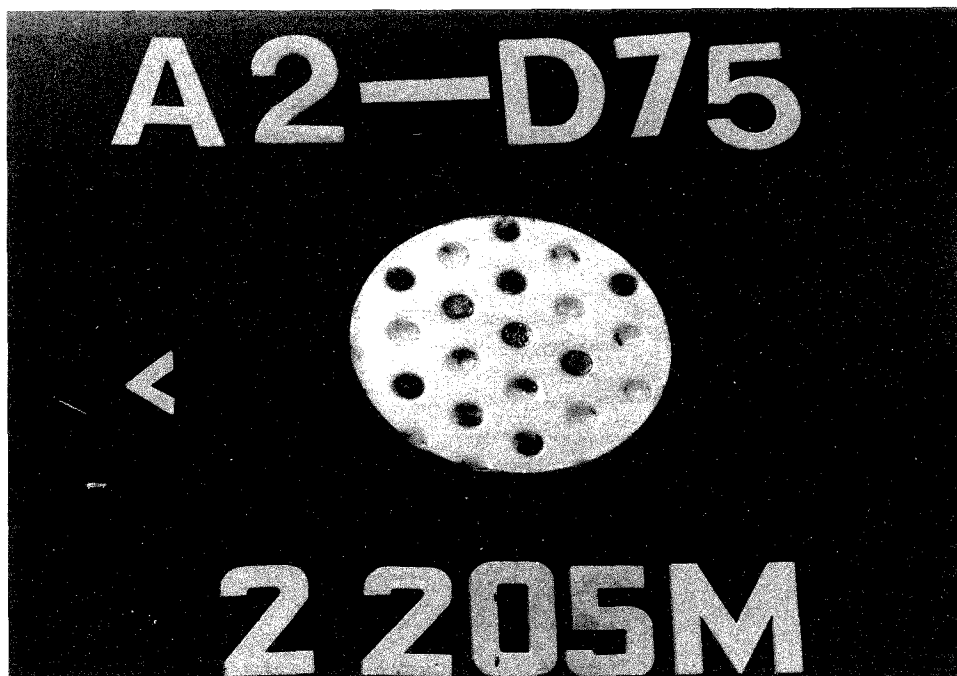
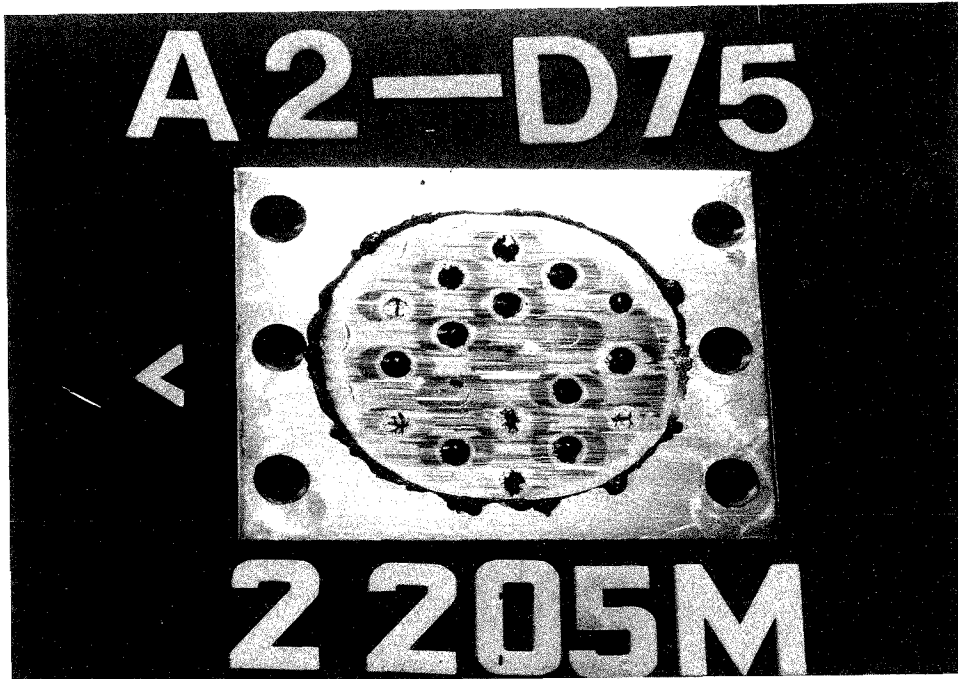
A2 - D75 P30 V 0.4/2.0

Gleiten 1: $v = 0.4\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 5\text{mm}$

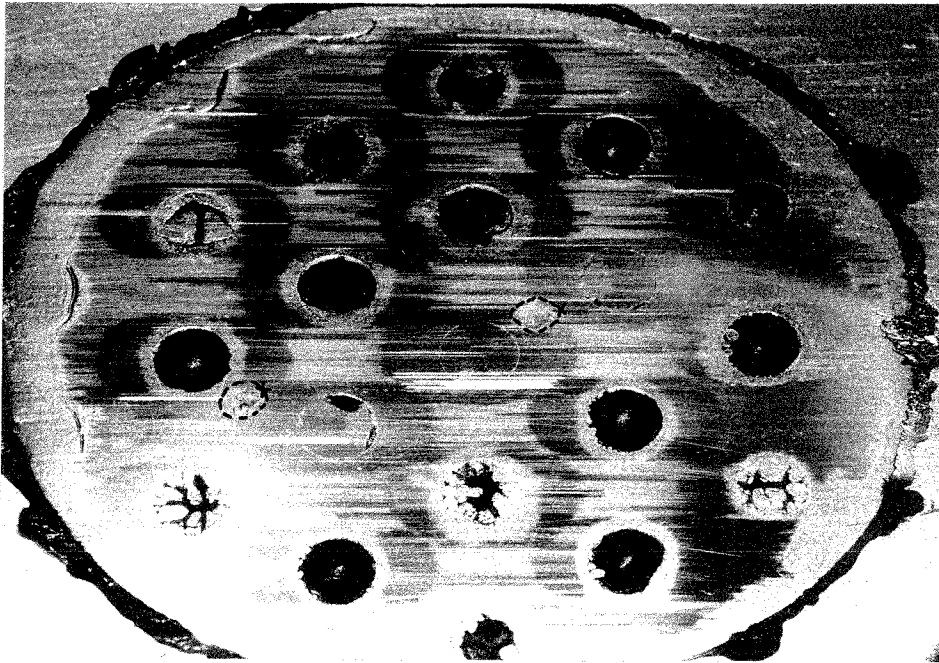


A2 - D75 P30 V 0.4/2.0

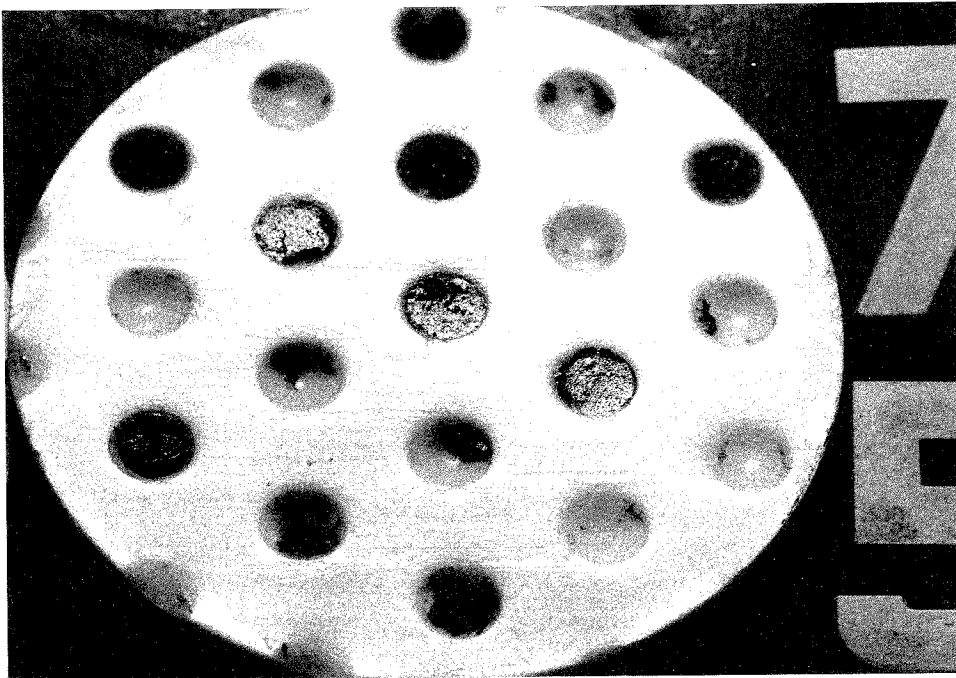
Gleiten 2: $v = 2\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 5\text{mm}$



Bilder 34 und 35: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 2205 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 75 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 0,4 und 2 mm/s, Verschiebeweg $\pm 5 \text{ mm}$)

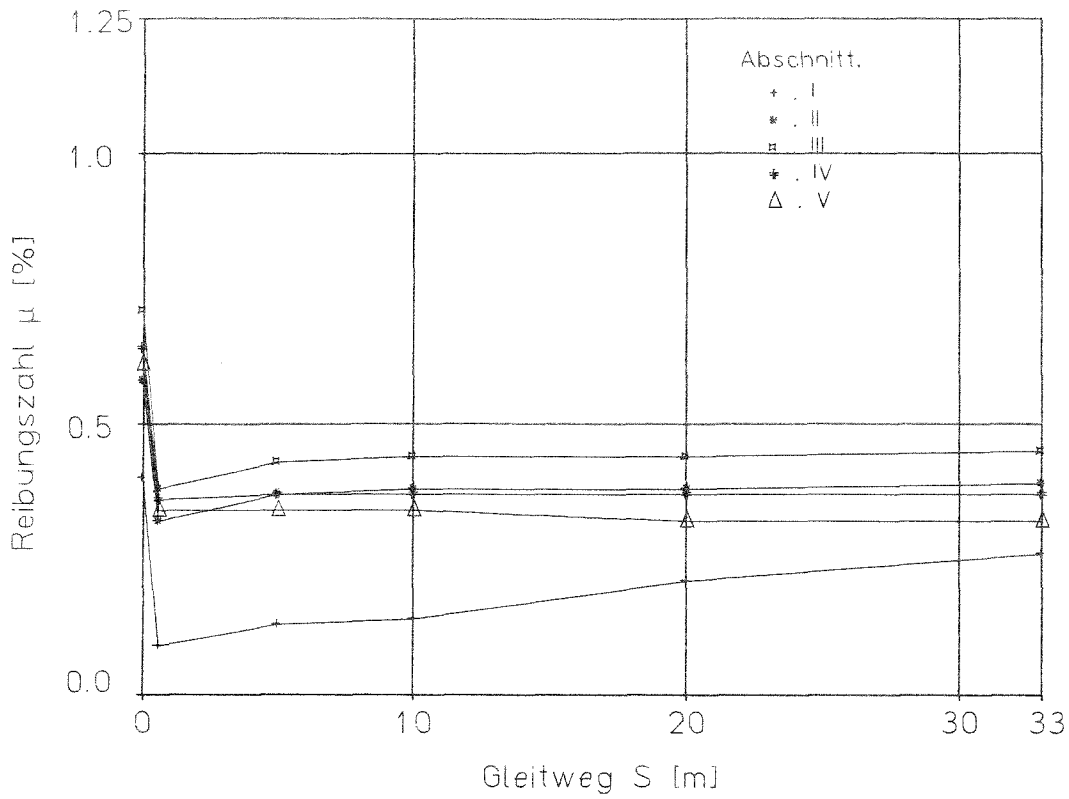


xPTFE -Verschleißpartikel



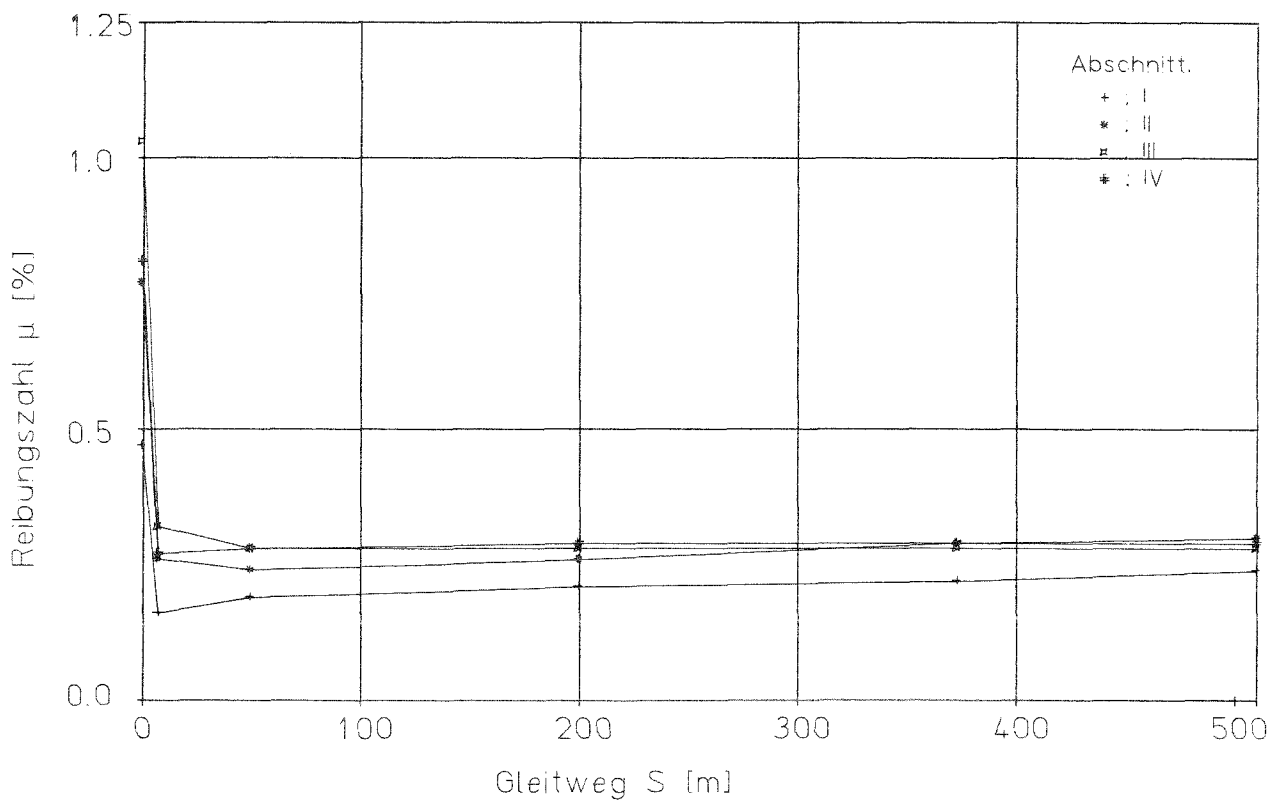
Bilder 36 und 37: Aust. Gleitblech mit Kratzspuren und Verschleißpartikel und PTFE-Ronde mit Verschleißspuren in Gleitrichtung nach 2205 m Gleitweg, Versuch A2-D75 P30 V0,4/2 (Detailfotos zu Anlage 55)

Versuch Nr.		A2 - D250 P30 V 0.4/2.0											
Gleitgeschw. v		0.4 mm/s						2.0 mm/s					
Versch.weg s_0		± 75 mm						± 75 mm					
Gleitweg S_i [m]		0	0.23	5	10	20	33	0	0.23	50	200	373	510
Abschnitt		Gleiten 1						Gleiten 2					
I	μ	0.40	0.09	0.13	0.14	0.21	0.26	0.47	0.16	0.19	0.21	0.22	0.24
	T	19.4					19.7	19.7		20.5	21.6	22.0	21.8
II	μ	0.58	0.32	0.37	0.38	0.38	0.39	0.77	0.26	0.24	0.26	0.29	0.30
	T	21,7					21,4	21.4		220			19.6
III	μ	0.71	0.38	0.43	0.44	0.44	0.45	1.03	0.32	0.28	0.28	0.28	0.28
	T	19.6		19.9			20.6	20.6		21.4	21.5	21.7	21.8
IV	μ	0.64	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.81	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29
	T	21.7			21.8		21.4	21.4			22.9	21.8	22.3
V	μ	0.61	0.34	0.34	0.34	0.32	0.32						
	T	22.2			22.5		22.2						
Reibungszahl μ [%] ; Temperatur T [°C] der Gleitplatte													



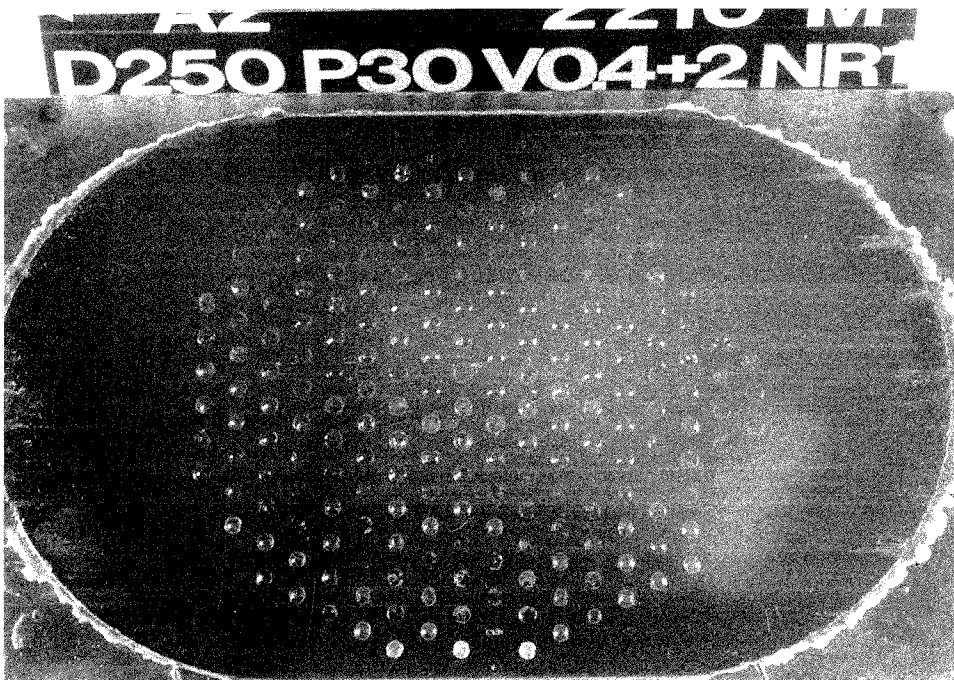
A2 - D250 P30 V 0.4/2.0

Gleiten 1: $v = 0.4\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 75\text{mm}$

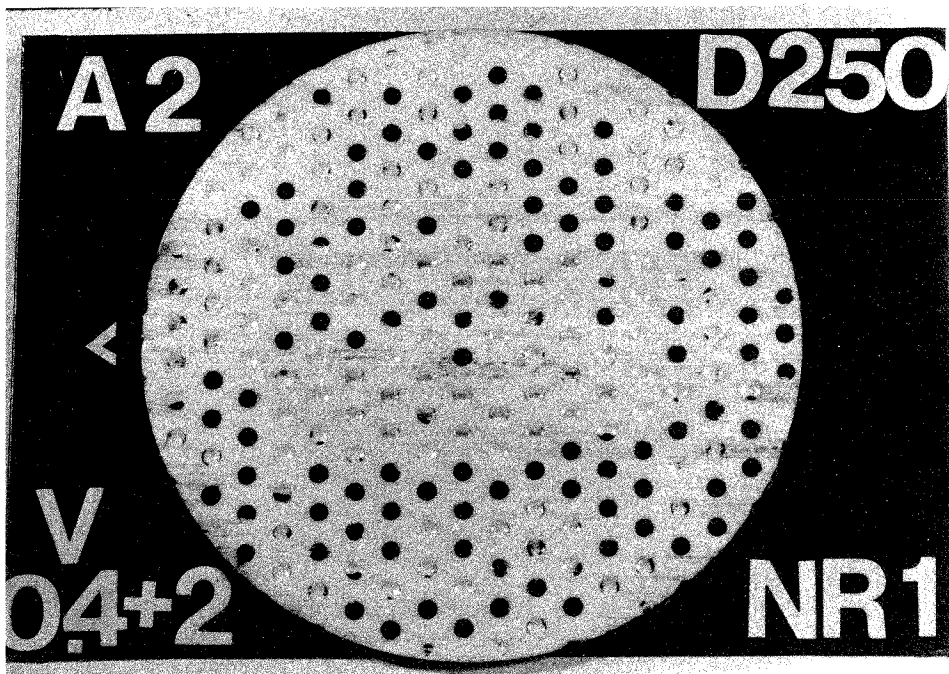


A2 - D250 P30 V 0.4/2.0

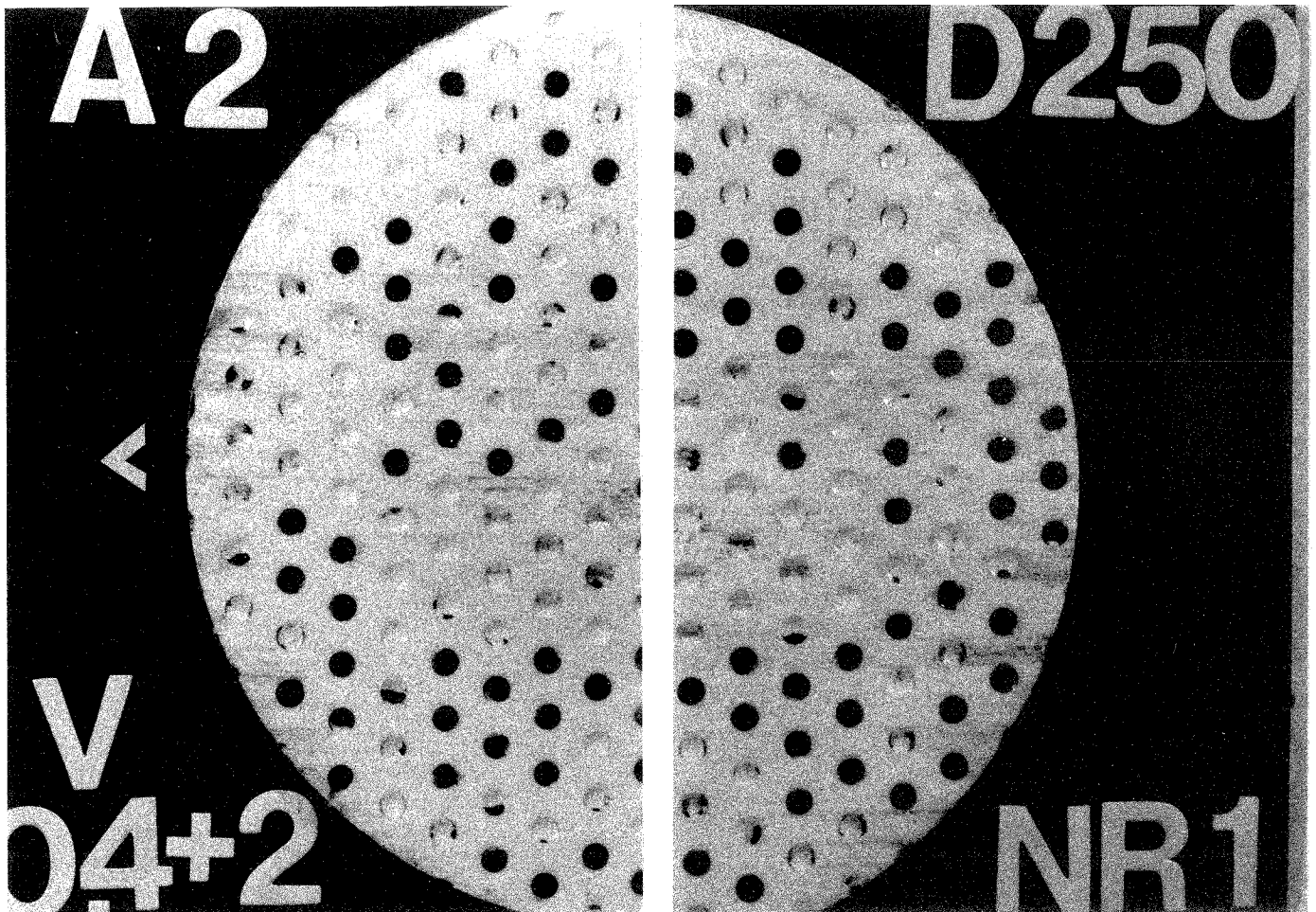
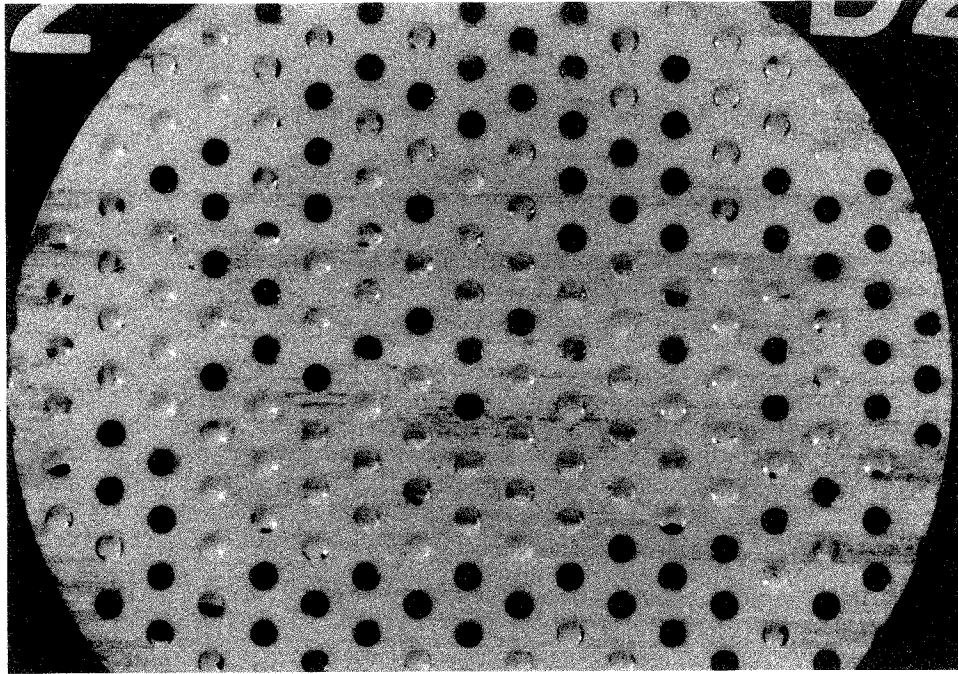
Gleiten 2: $v = 2\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 75\text{mm}$



feine Kratzspuren
in Gleitrichtung
und an einigen
Stellen dünner
PTFE-Auftrag im Innern
des Scheibenabdrucks

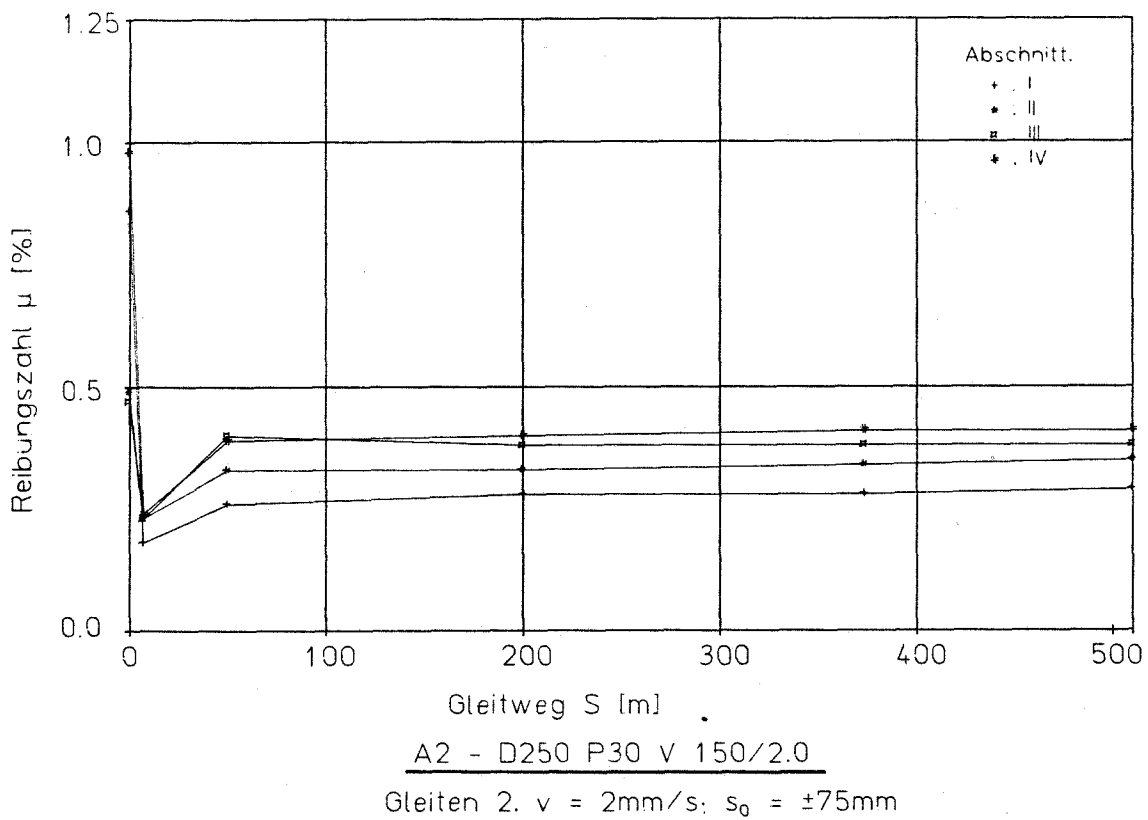
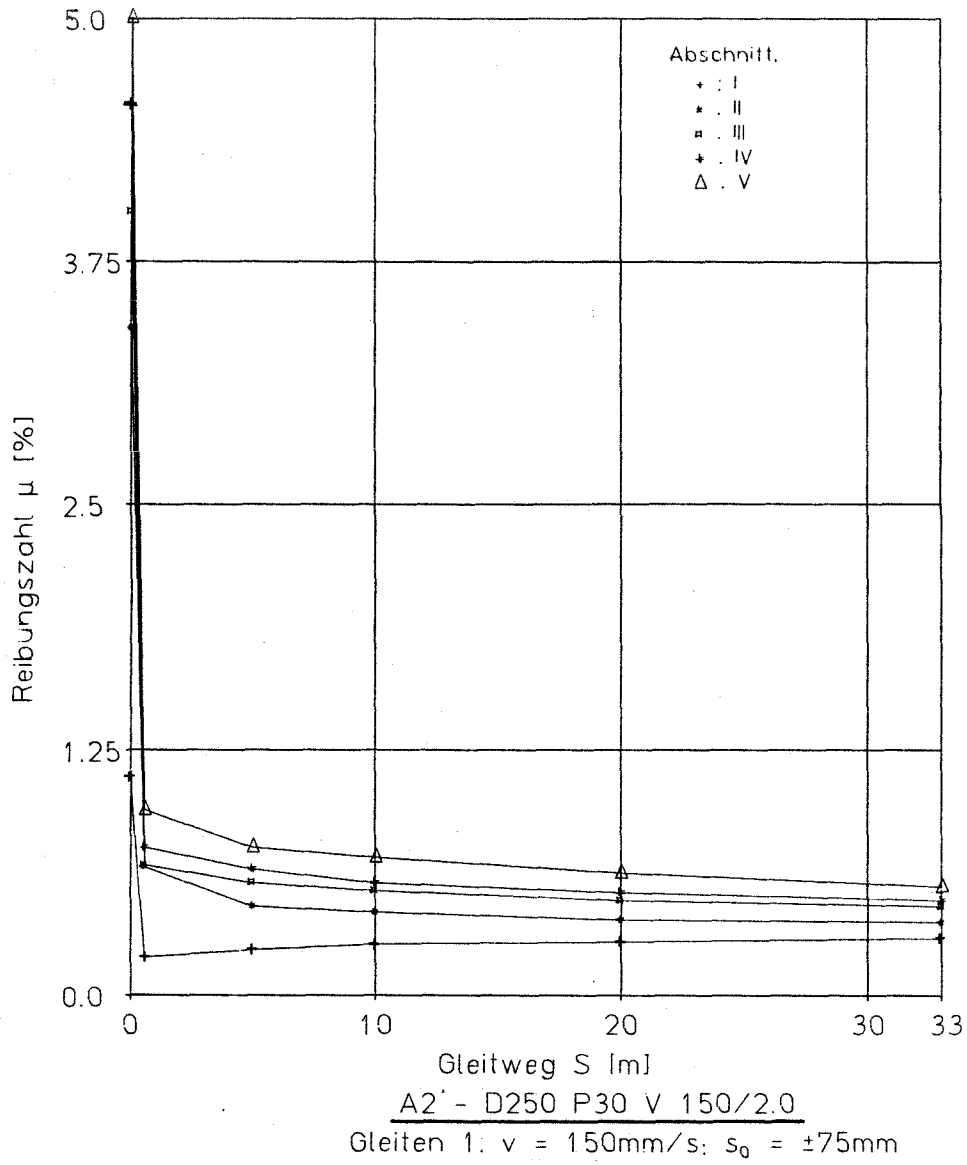


Bilder 38 und 39: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde mit Verschleißspuren
in Gleitrichtung nach 2205 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 0,4 und 2 mm/s, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)



Bilder 40, 41 und 42: PTFE-Ronde mit Verschleißspuren (PTFE-Abtrag und -Auftrag) nach 2205 m Gleitweg, Versuch Nr. A2-D250 P30 V0,4/2,0 (Detailfotos zu Anlage 59)

Versuch Nr.		A2 - D250 P30 V 150/2.0											
Gleitgeschw. v		150 mm/s						2.0 mm/s					
Versch.weg s ₀		± 75 mm						± 75 mm					
Gleitweg S _i [m]		0	0.23	5	10	20	33	0	0.23	50	200	373	510
Abschnitt		Gleiten 1						Gleiten 2					
I	μ	1.11	0.19	0.23	0.26	0.27	0.29	0.86	0.18	0.26	0.28	0.28	0.29
	T	22.2		23.0	24.0	25.0	26.4	22.7		23.0	23.3	23.2	22.6
II	μ	3.40	0.65	0.45	0.42	0.38	0.37	0.49	0.23	0.33	0.33	0.34	0.35
	T	22.4		23.0	24.5	26.0	27.5	23.0		22.5		22.2	22.6
III	μ	4.00	0.66	0.57	0.53	0.48	0.45	0.47	0.23	0.40	0.38	0.38	0.38
	T	22.5		23.5	25.0	27.0	28.5	23.1		23.4	23.2	22.9	22.6
IV	μ	4.55	0.75	0.64	0.57	0.52	0.48	0.98	0.24	0.39	0.40	0.41	0.41
	T	22.4		23.5	24.5	26.5	28.0	23.2		23.0		20.0	19.0
V	μ	5.00	0.94	0.75	0.70	0.62	0.55						
	T	18.8		20.0	21.5	23.5	25.2						
Reibungszahl μ [%] ; Temperatur T [°C] der Gleitplatte													



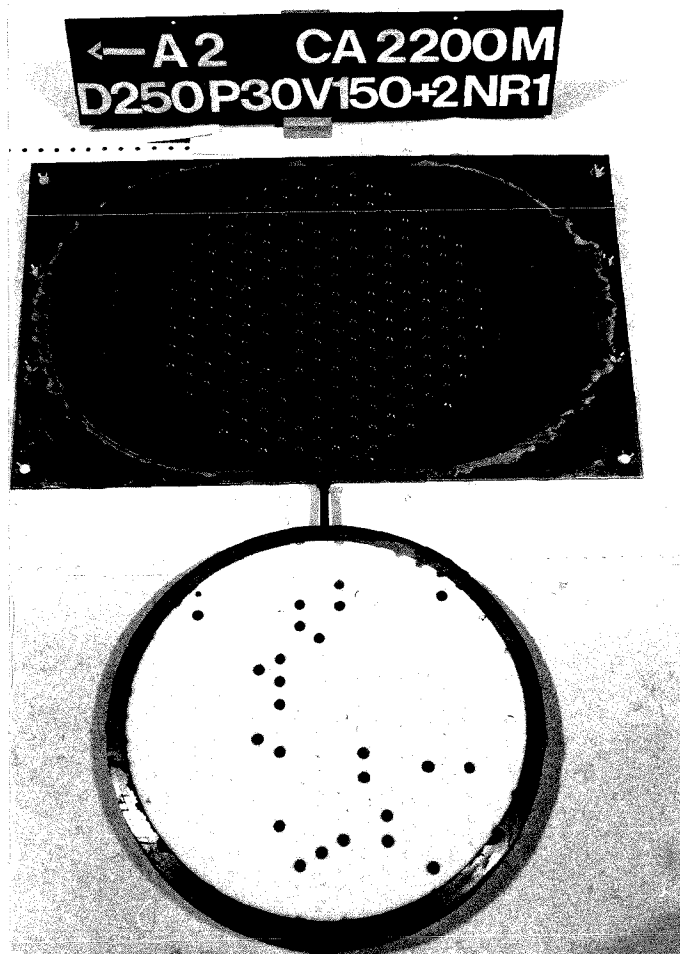
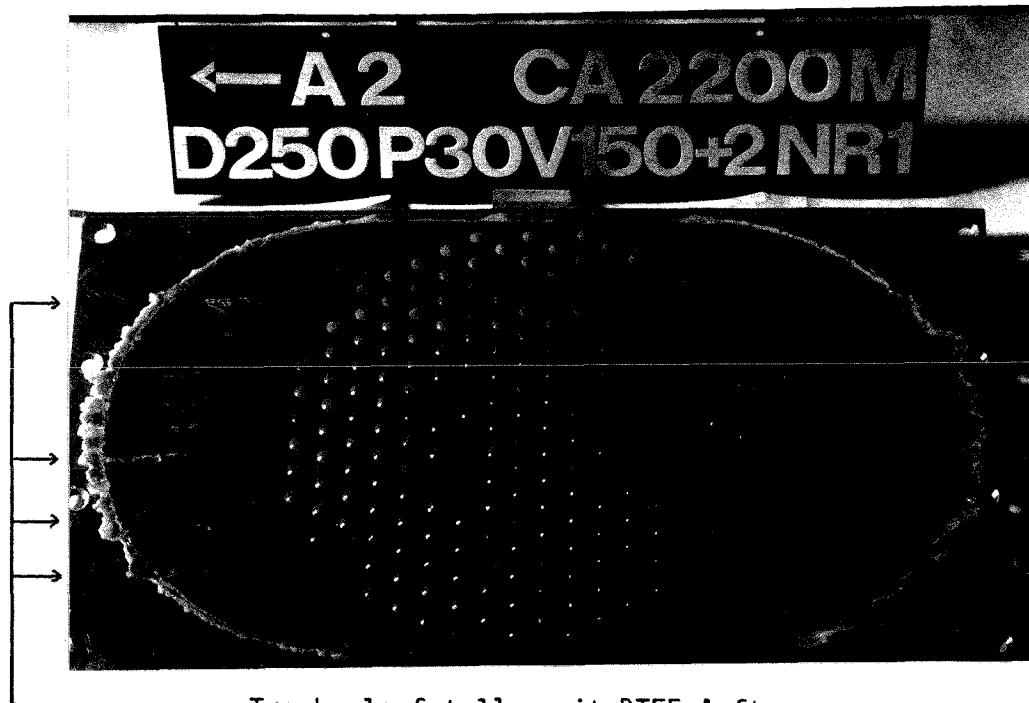
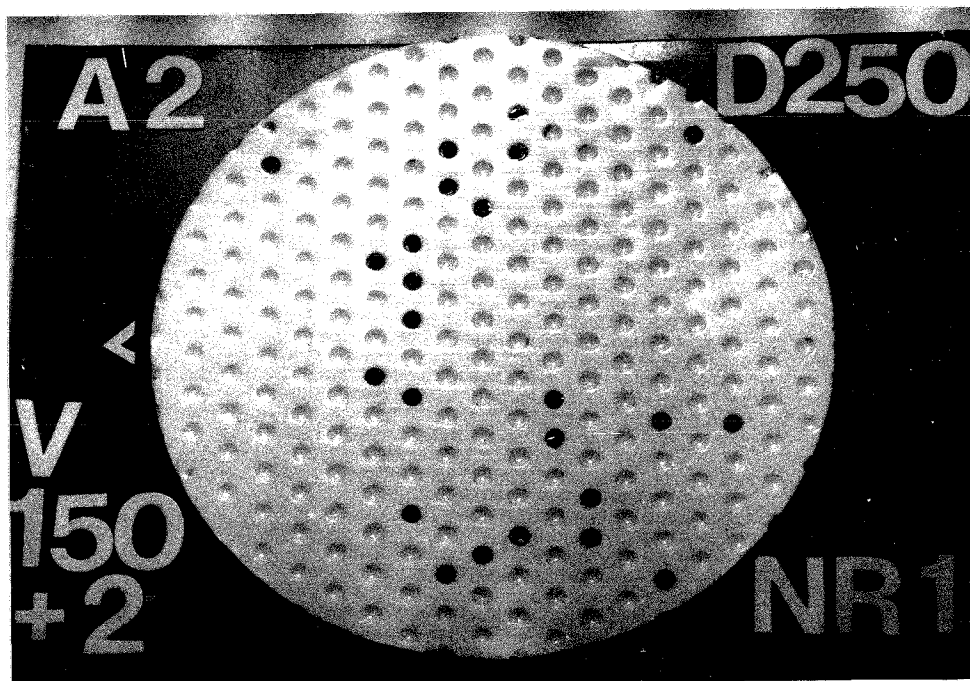


Bild 43: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 2205 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 150 und 2 mm/s,
Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)



Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag
In Gleitrichtung auch feine Kratzspuren, die nur
bei entsprechender Lichtspiegelung erkennbar sind



Bilder 44 und 45: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 2205 m Gleitweg
mit Verschleißspuren in Gleitrichtung
(Detailfotos zu Anlage 63)

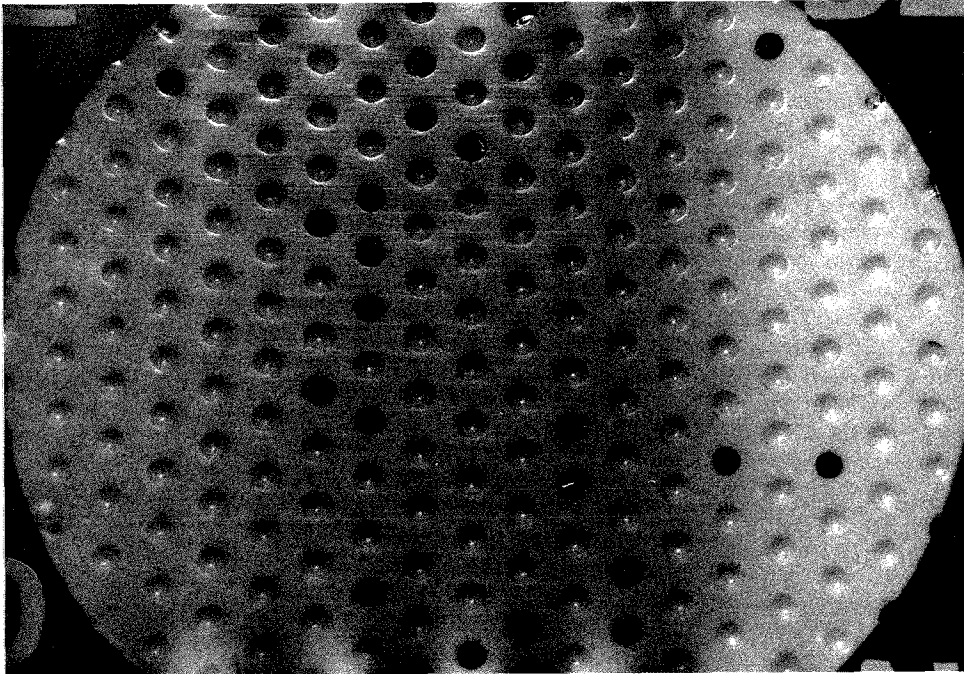


Bild 46: Detailfoto der PTFE-Ronde nach 2205 m Gleitweg mit streifenförmig verlaufenden Verschleißspuren in Gleitrichtung (Versuch A2-D250 P30 V150/2)

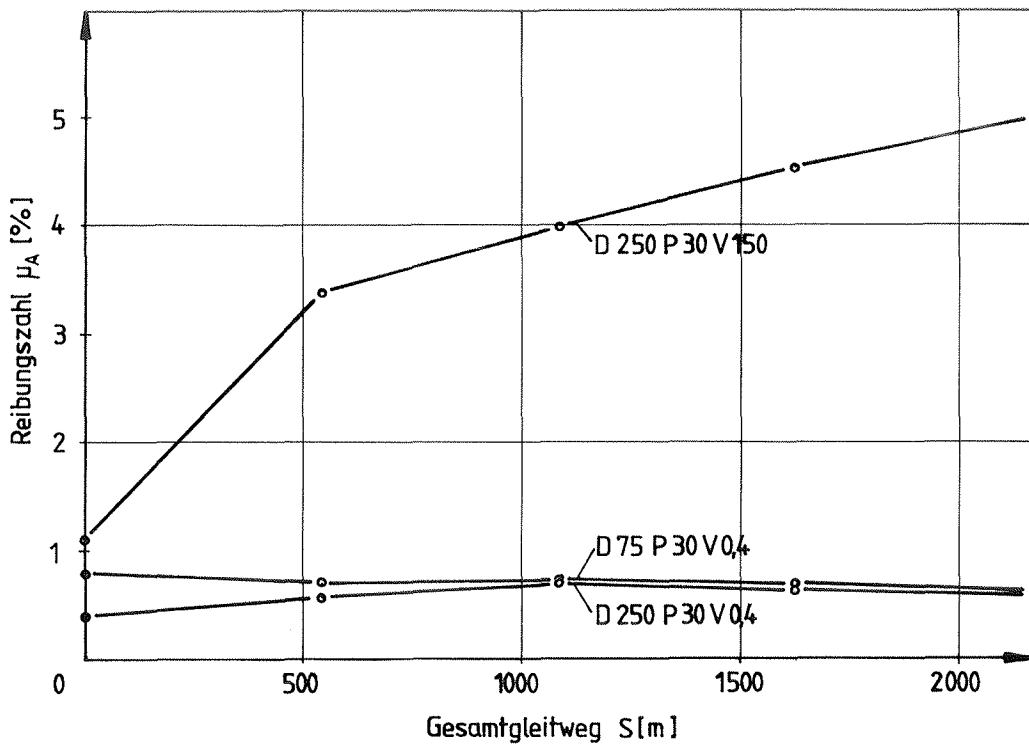
Versuchsreihe A2

Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern
(PTFE weiß/aust. Stahl, Schmierung mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung)

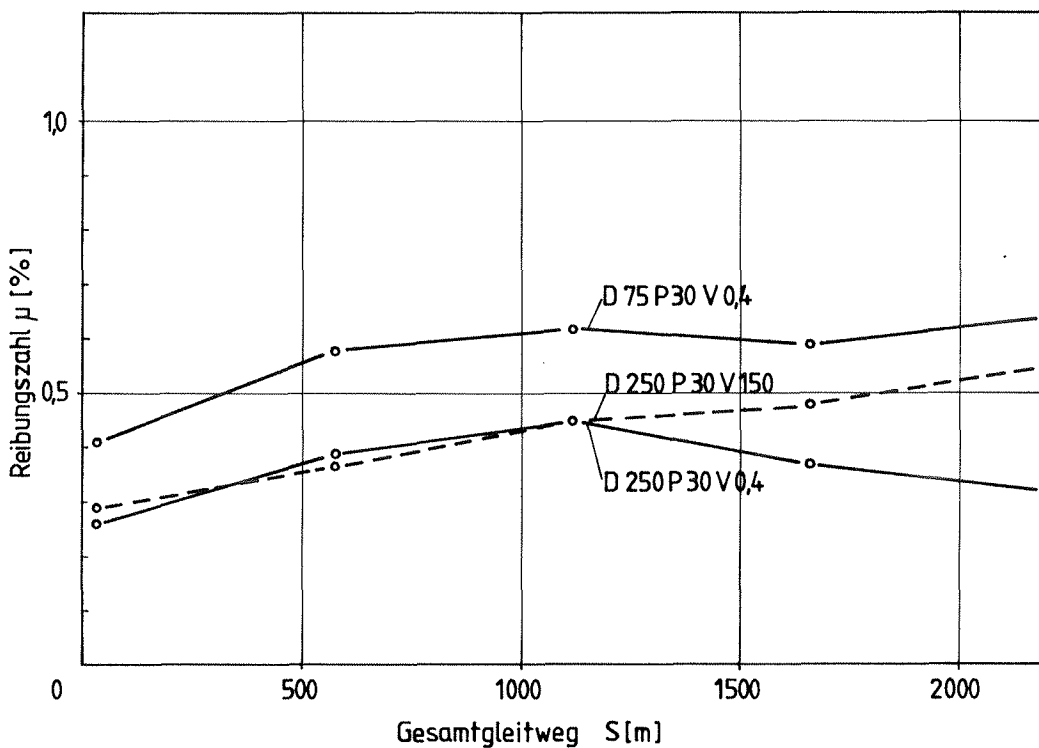
Versuchsergebnisse: Zusammenstellung der Anfahrreibungszahlen in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg											
Versuchs- abschnitt		I/1	I/2	II/1	II/2	III/1	III/2	IV/1	IV/2	V	Dim.
S		0	33	543	576	1086	1119	1629	1662	2172	[m]
v		0,4	2	0,4	2	0,4	2	0,4	2	0,4	[mm/s]
D75	μ_A	0,80	0,76	0,70	0,83	0,74	0,88	0,70	1,02	0,62	[%]
D250	μ_A	0,40	0,47	0,58	0,77	0,71	1,03	0,64	0,81	0,61	[%]
D250	v	150	2	150	2	150	2	150	2	150	[mm/s]
	μ_A	1,11	0,86	3,4	0,49	4,0	0,47	4,55	0,98	5,0	[%]

Vorbelastungszeit bzw. Bewegungsunterbrechung = 1 Stunde

S = aufaddierter Gleitweg
v = Verschiebegeschwindigkeit
D = PTFE-Durchmesser in mm
 μ_A = Anfahrreibungszahl
Mittlere Lagerpressung = 30 N/mm²
Verschiebeweg: Lager D75 : ± 5 mm
Lager D250 : ± 75 mm



Reibungszahlen μ_A zu Beginn von Gleiten 1
(Vorbelastungszeit bzw. Standzeit = 1 Stunde)



Reibungszahlen μ am Ende von Gleiten 1

Versuchsreihe A 2: Versuchsergebnisse

Abhängigkeit der Reibungszahlen vom Gesamtgleitweg für die

Versuchsabschnitte "Gleiten 1" mit $v = 0,4$ bzw. 150 mm/s

Versuchsreihe A2:

Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über 2205 m Gesamtgleitweg
Ergebnisse der Verformungs- und Verschleißmessungen

Versuch Nr.	A2-D75 P30 V0,4/2,0	A2-D250 P30 V0,4/2,0	A2-D250 P30 V150/2,0
δ_1 [mm]	0,17	0,19	0,20
$\Delta\delta_2$ [mm]	0,02	0,015	0,014
$\Delta\delta_3$ [mm]	0,09	0,07	0,10
δ_4 [mm]	0,15	0,11	0,17
$\Delta\ddot{u}$ [mm]	0,20	0,15	0,20
$\Delta\emptyset$ [mm]	0,4	0,4	0,5
Δt [mm]	0,03	0,04	0,07
$\Delta t/t_0$ [°/oo]	6,8	8,8	14,6
ΔG [gr]	0,06	0,52	1,11
$\Delta G/G_0$ [°/oo]	1,4	1,07	2,31

δ_1 = PTFE-Zusammendrückung bei Belastung von $0,1 F_V$ auf F_V
 $\Delta\delta_2$ = Zunahme der PTFE-Zusammendrückung während der Vorbelastungszeit von 1 Stunde
 $\Delta\delta_3$ = Änderung der PTFE-Zusammendrückung während des Gleitversuchs (bei F_V)
 δ_4 = bleibende PTFE-Restverformung bei Belastung mit $0,1 F_V$
 $\Delta\ddot{u}$ = Überstandsänderung der PTFE-Ronde aus der Stahlunterlage im unbelasteten Zustand
 $\Delta\emptyset$ = Durchmesseränderung der PTFE-Ronde durch Wulstbildung
 Δt = Dickenänderung der PTFE-Ronde im unbelasteten Zustand
 ΔG = Gewichtsänderung der PTFE-Ronde (Verschleiß)
 t_0 bzw. G_0 = Ursprungsdicke bzw. Gewicht der PTFE-Ronde vor dem Versuch

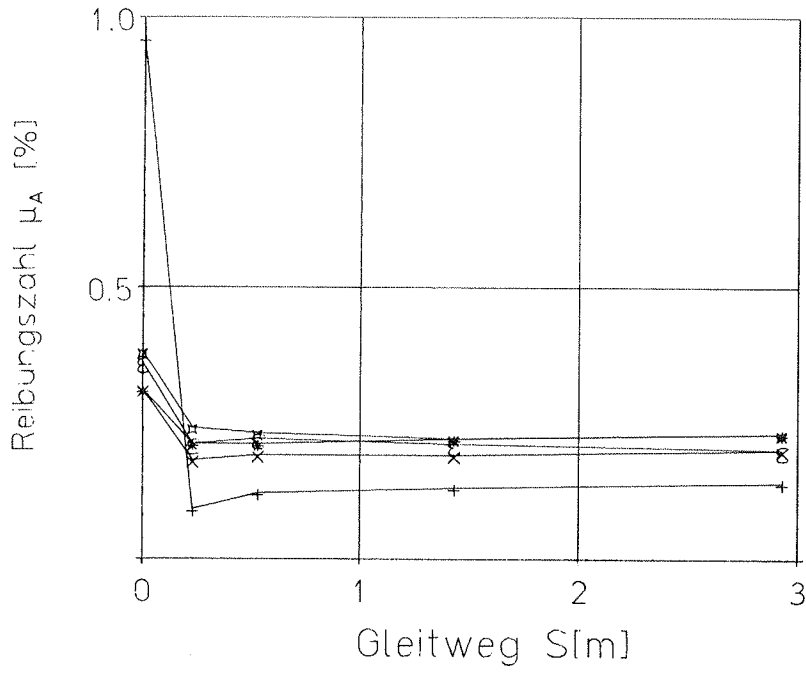
Versuchsreihe D: Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über ca. 10,000 m Gesamtgleitweg

Versuchsreihe D

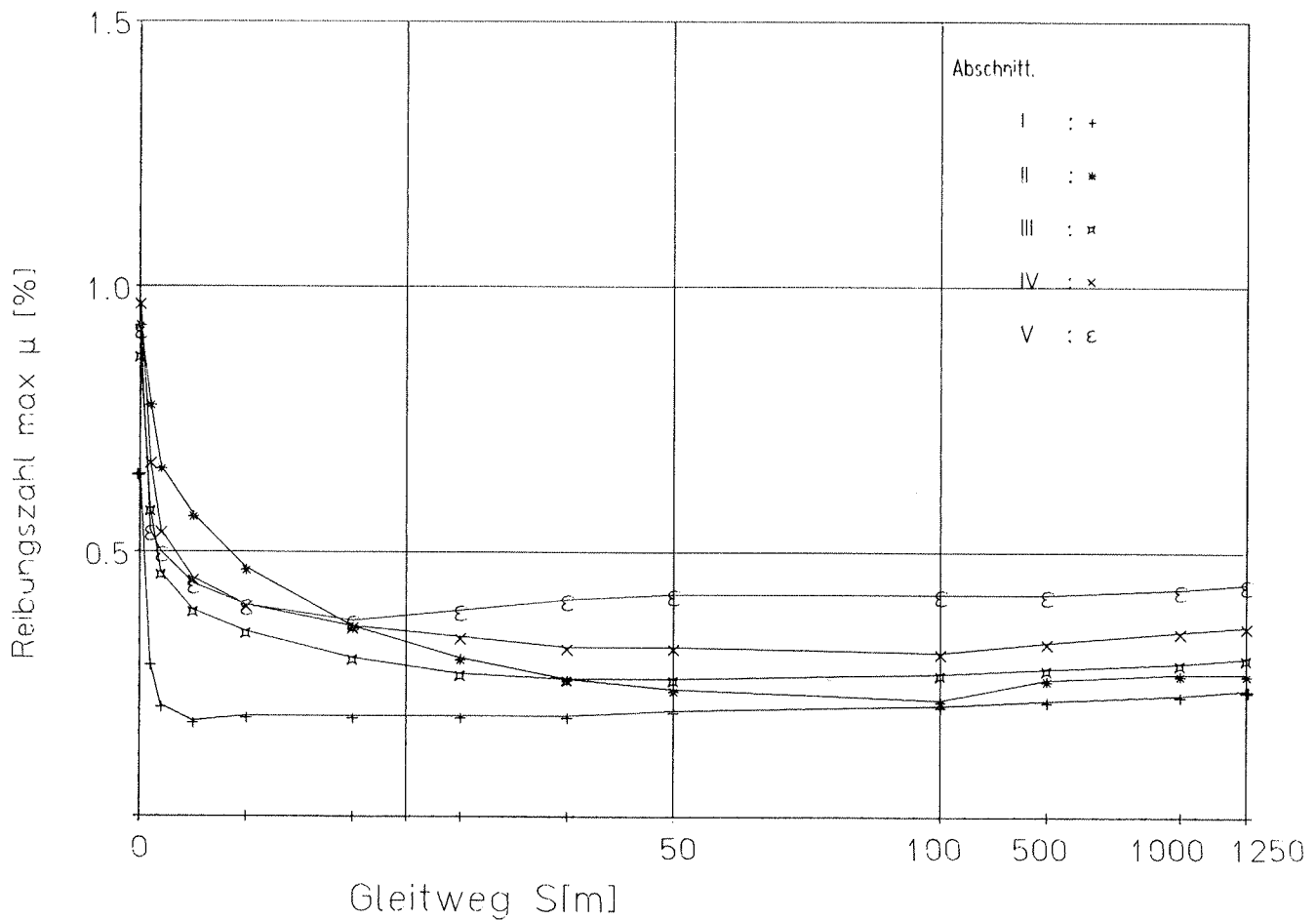
Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern
(PTFE weiß/aust. Stahl, Schmierung mit Siliconfett u. Schmierstoffspeicherung)

Versuchsbezeichnung: D - D250 P30 V0,1/25		Nr. 1 Nr. 2 Nr. 3
Versuchsabschnitt	<u>Versuchsbedingungen, Versuchsablauf</u>	
-	Aufbringen der Vertikallast $F_v = 1473 \text{ hN}$ (konstant während der gesamten Versuchsdauer)	
-	Vorbelastungszeit $t_v = 24 \text{ Stunden}$	
I	Gleiten 1: Verschiebegeschw.	$v = 0,1 \text{ mm/s}$
	Verschiebeweg	$s_0 = \pm 75 \text{ mm}$
	Frequenz	$f = 0,000333 \text{ /s}$
	Doppelhübe	$n = 10$
	Gleitweg	$S_1 = 3 \text{ m}$
	Standzeit $t = 1 \text{ Stunde ohne Bewegung}$	
	Gleiten 2: Verschiebegeschw.	$v = 25 \text{ mm/s}$
	Verschiebeweg	$s_0 = \pm 2,5 \text{ mm}$
	Frequenz	$f = 2,5 \text{ /s}$
	Doppelhübe	$n = 125000$
	Gleitweg	$S_2 = 1250 \text{ m}$
	Standzeit $t = 1 \text{ Stunde ohne Bewegung}$	
II bis VIII	wie Versuchsabschnitt I	
PTFE-Durchmesser	D = 250 mm	
Mittlere PTFE-Pressung	$p = 30 \text{ N/mm}^2$	
Gesamtgleitweg	$S = 8 \cdot (3 + 1250) = 10024 \text{ m}$	
Weg-Zeit-Funktion des Gleitschiebers	linear ohne Leerlaufspiel	
Anzahl der Versuche	3	
Messungen	<ul style="list-style-type: none"> - Verschiebewiderstand $F_H(t)$ - Gleitschiebeweg $s(t)$ - Temperatur T der Gleitplatte - Dicken- und Gewichtsänderung der PTFE-Ronden 	

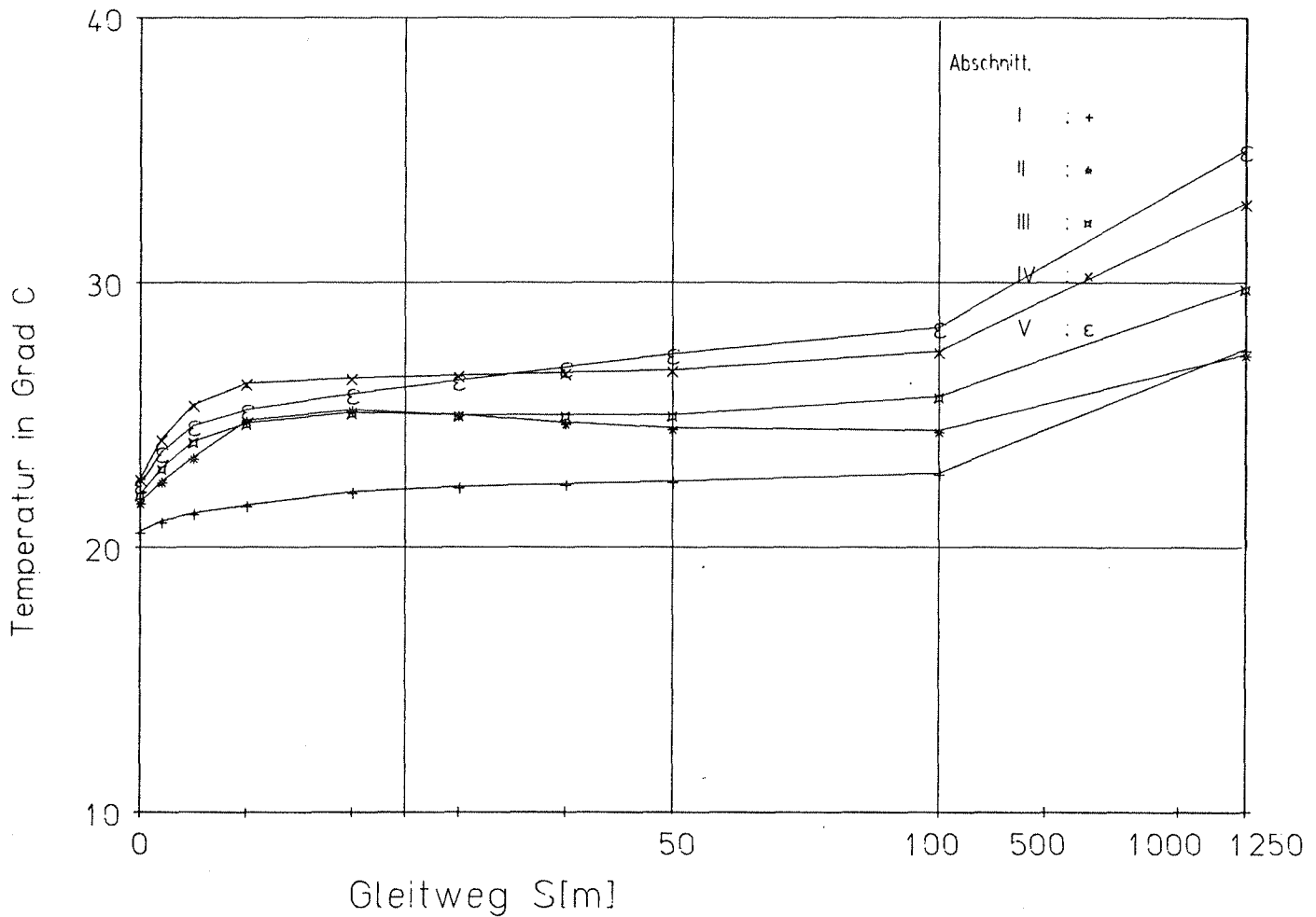
Versuch Nr		D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.1																		
Gleitgeschwindigkeit v		0.1 mm/s					25 mm/s													
Verschiebeweg s ₀		±75 mm					±2.5 mm													
Gleitweg S _i (m)		0	~0.23	~0.53	~1.43	~2.93	0	≤0.20	1	2	5	10	20	30	40	50	100	500	1000	1250
Abschnitt		Gleiten 1					Gleiten 2													
I 0 - 1253 m	μ	0.96	0.09	0.12	0.13	0.14	0.65	0.53	0.29	0.21	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
	T	20.1				20.6	20.6			21.0	21.3	21.6	22.1	22.3	22.4	22.5	22.8			27.5
II 1253 - 2506 m	μ	0.31	0.21	0.21	0.22	0.23	0.78	0.93	0.78	0.66	0.57	0.47	0.36	0.30	0.26	0.24	0.22	0.26	0.27	0.27
	T	25.0				21.8	21.7			22.5	23.4	24.8	25.2	25.0	24.7	24.5	24.4			27.3
III 2506 - 3759 m	μ	0.38	0.24	0.23	0.22	0.23	0.79	0.87	0.58	0.46	0.39	0.35	0.30	0.27	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30
	T	25.0				22.1	22.0			23.0	24.0	24.7	25.1	25.0	25.0	25.0	25.7			29.8
IV 3759 - 5012 m	μ	0.31	0.18	0.19	0.19	0.20	0.84	0.97	0.67	0.54	0.45	0.40	0.36	0.34	0.32	0.32	0.31	0.33	0.35	0.36
	T	27.0				22.7	22.6			24.1	25.4	26.2	26.4	26.5	26.6	26.7	27.4			33.0
V 5012 - 6265 m	μ	0.36	0.21	0.22	0.21	0.20	0.92	0.69	0.54	0.50	0.44	0.40	0.37	0.39	0.41	0.42	0.42	0.42	0.43	0.44
	T	27.5				22.8	22.4			23.0	24.6	25.2	25.8	26.3	26.8	27.3	28.3			35.0
VI	μ	Versuch abgebrochen nach 6265m Gesamtgleitweg																		
	T																			
VII	μ																			
	T																			
VIII	μ																			
	T																			
Reibungszahl μ[%]; Temperatur T[°C] der Gleitplatte																				



Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.1
 Gleiten 1: $v=0.1\text{mm/s}$
 $s_0=\pm 75\text{mm}$



Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.1
 Gleiten 2: $v=25\text{mm/s}$
 $s_0=\pm 2.5\text{mm}$

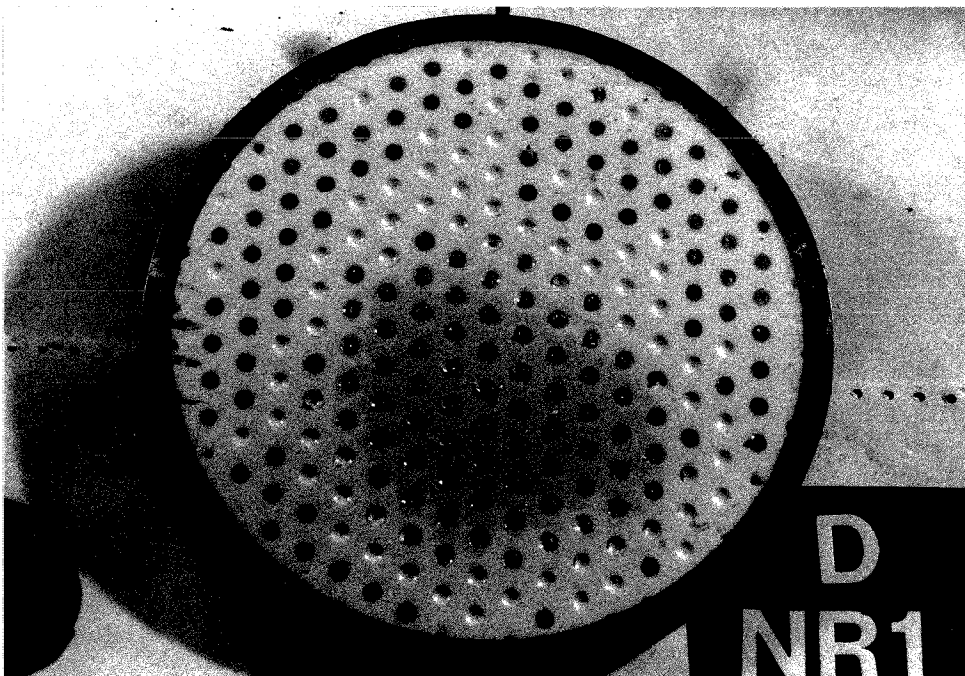
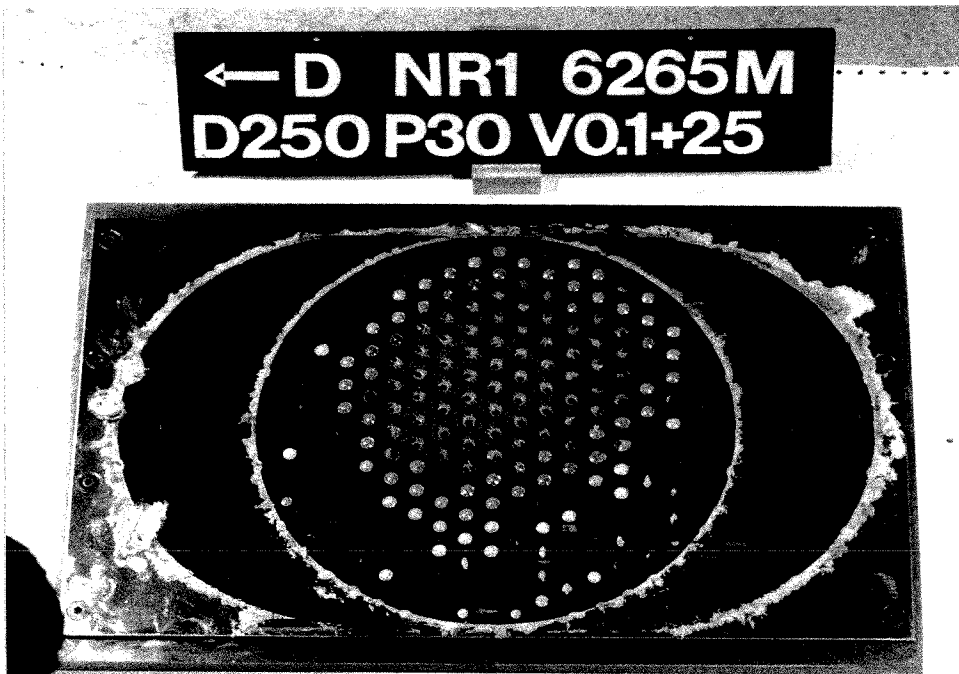


Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.1

Gleiten 2: $v=25\text{mm/s}$

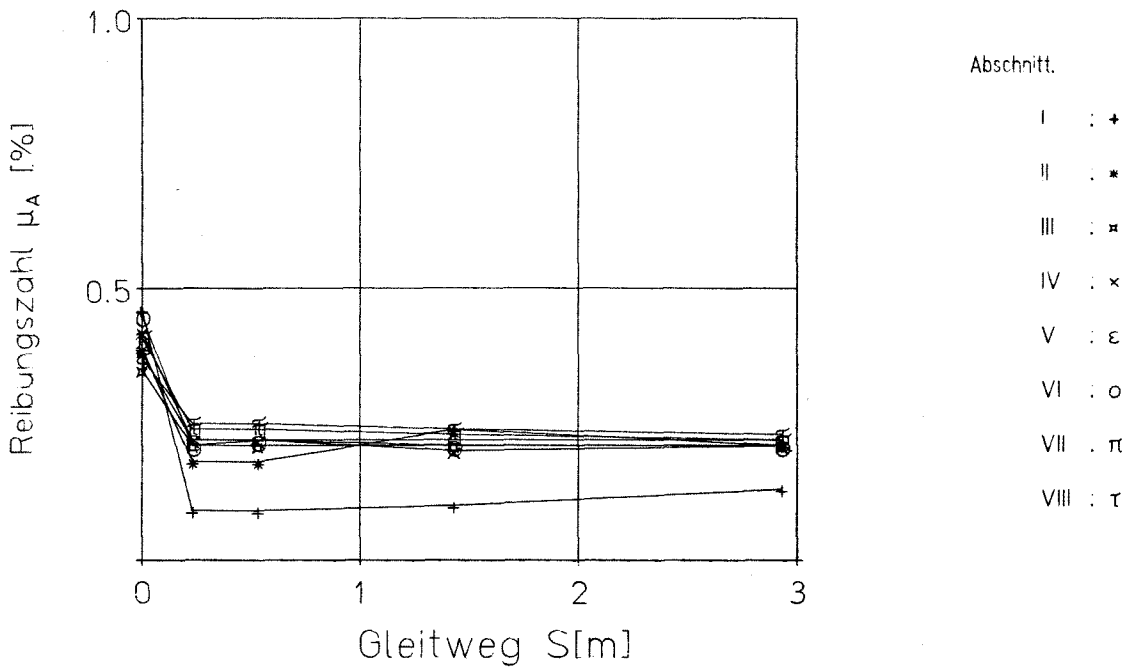
$s_0 = \pm 2.5\text{mm}$

Temperatur am Gleitplattenrand in Abhängigkeit von Gleitweg in den Versuchsabschnitten "Gleiten 2"



Bilder 47 und 48: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 6265 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 0,1 und 25 mm/s
Verschiebeweg ± 75 und $\pm 2,5 \text{ mm}$)

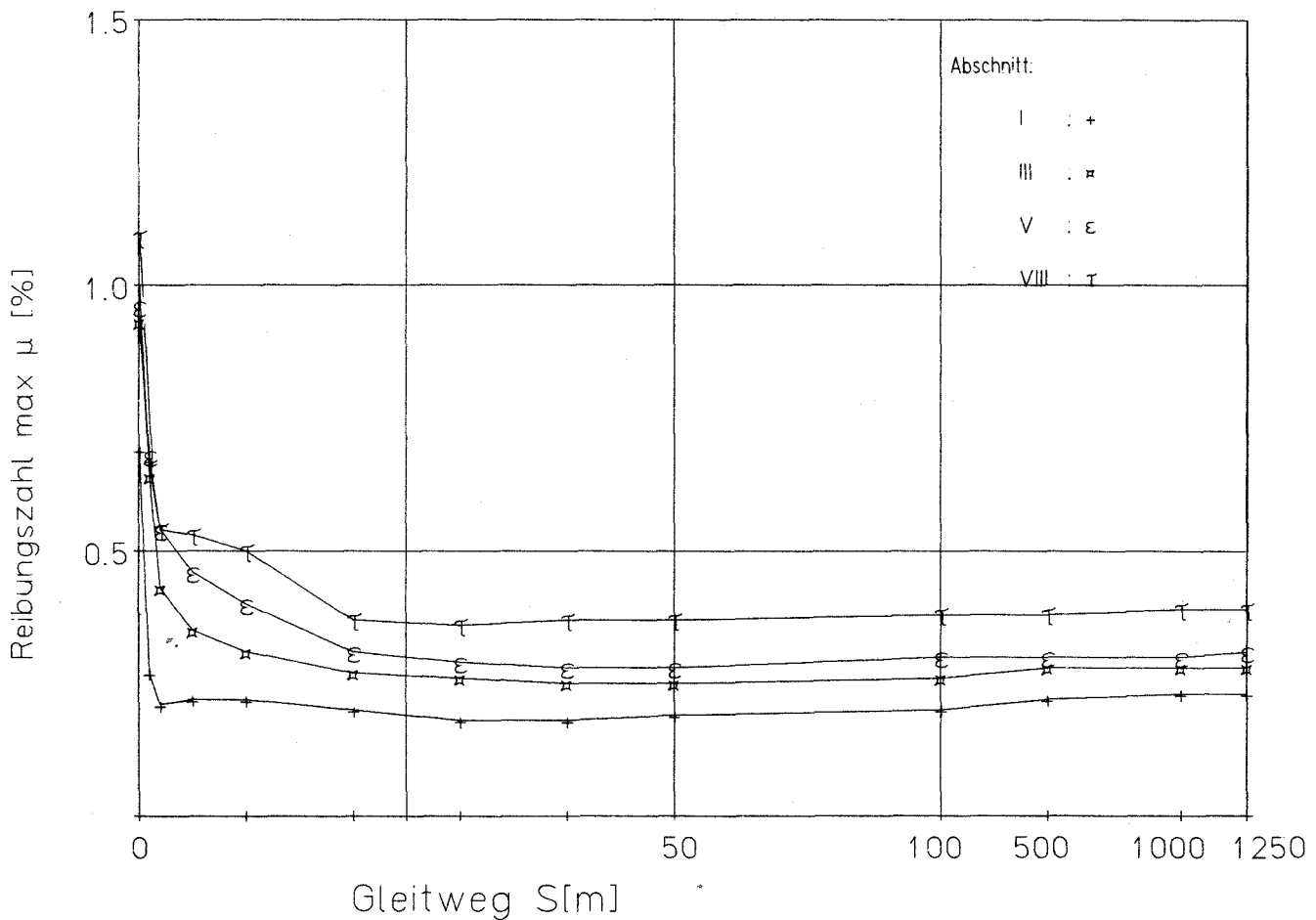
Versuch Nr		D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.2																		
Gleitgeschwindigkeit v		0.1 mm/s					25 mm/s													
Verschiebeweg s ₀		±75 mm					±2.5 mm													
Gleitweg S _f (m)		0	~0.23	~0.53	~1.43	~2.93	0	≤0.20	1	2	5	10	20	30	40	50	100	500	1000	1250
Abschnitt		Gleiten 1					Gleiten 2													
I 0 - 1253 m	μ	0.46	0.09	0.09	0.10	0.13	0.69	0.49	0.27	0.21	0.22	0.22	0.20	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.23	0.23
	T	15.4				16.0	16.5			17.0	17.2	17.3	17.6	17.8	18.1	18.3	18.7			24.0
II 1253 - 2506 m	μ	0.39	0.18	0.18	0.24	0.21	1.00	0.92	0.61	0.52	0.46	0.39	0.30	0.24	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.25
	T	21.6				18.8	18.7			19.9	20.1	20.3	20.5	20.6	20.8	20.9	21.5			25.9
III 2506 - 3759 m	μ	0.35	0.21	0.21	0.21	0.21	0.93	0.92	0.64	0.43	0.35	0.31	0.27	0.26	0.25	0.25	0.26	0.28	0.28	0.28
	T	23.0				20.0	19.8			21.0	21.1	21.2	21.4	21.7	21.8	21.9	22.6			26.7
IV 3759 - 5012 m	μ	0.42	0.22	0.22	0.20	0.21	0.90	0.94	0.70	0.53	0.46	0.44	0.31	0.27	0.27	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30
	T	23.9				19.8	19.5			21.2	21.4	21.7	21.7	21.9	22.0	22.1	22.6			26.7
V 5012 - 6265 m	μ	0.38	0.22	0.22	0.22	0.22	0.94	0.96	0.68	0.54	0.46	0.40	0.31	0.29	0.28	0.28	0.30	0.30	0.30	0.31
	T	24.0				20.6	20.4			22.0	22.3	22.7	22.8	22.9	22.9	23.0	23.7			29.2
VI 6265 - 7518 m	μ	0.45	0.21	0.22	0.21	0.21	0.90	0.94	0.72	0.52	0.43	0.37	0.31	0.30	0.31	0.32	0.33	0.33	0.33	0.34
	T	26.5				22.3	22.0			23.3	24.0	24.1	24.3	24.4	24.6	24.9	25.7			29.7
VII 7518 - 8771 m	μ	0.41	0.24	0.24	0.23	0.22	0.97	1.08	0.89	0.69	0.59	0.51	0.38	0.34	0.33	0.34	0.34	0.34	0.35	0.36
	T	26.4				22.0	21.8			23.0	23.9	24.3	24.7	24.8	24.9	25.0	25.7			30.7
VIII 8771 - 10024 m	μ	0.37	0.25	0.25	0.24	0.23	1.09	1.07	0.66	0.54	0.53	0.50	0.37	0.36	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39	0.39
	T	26.7				21.8	21.6			22.8	23.3	23.6	24.1	24.3	24.5	24.7	25.8			32.3
Reibungszahl μ[%]; Temperatur T[°C] der Gleitplatte																				



Versuch : D-D250 P30 V0.1 und 25 Nr.2

Gleiten 1: $v=0.1\text{mm/s}$

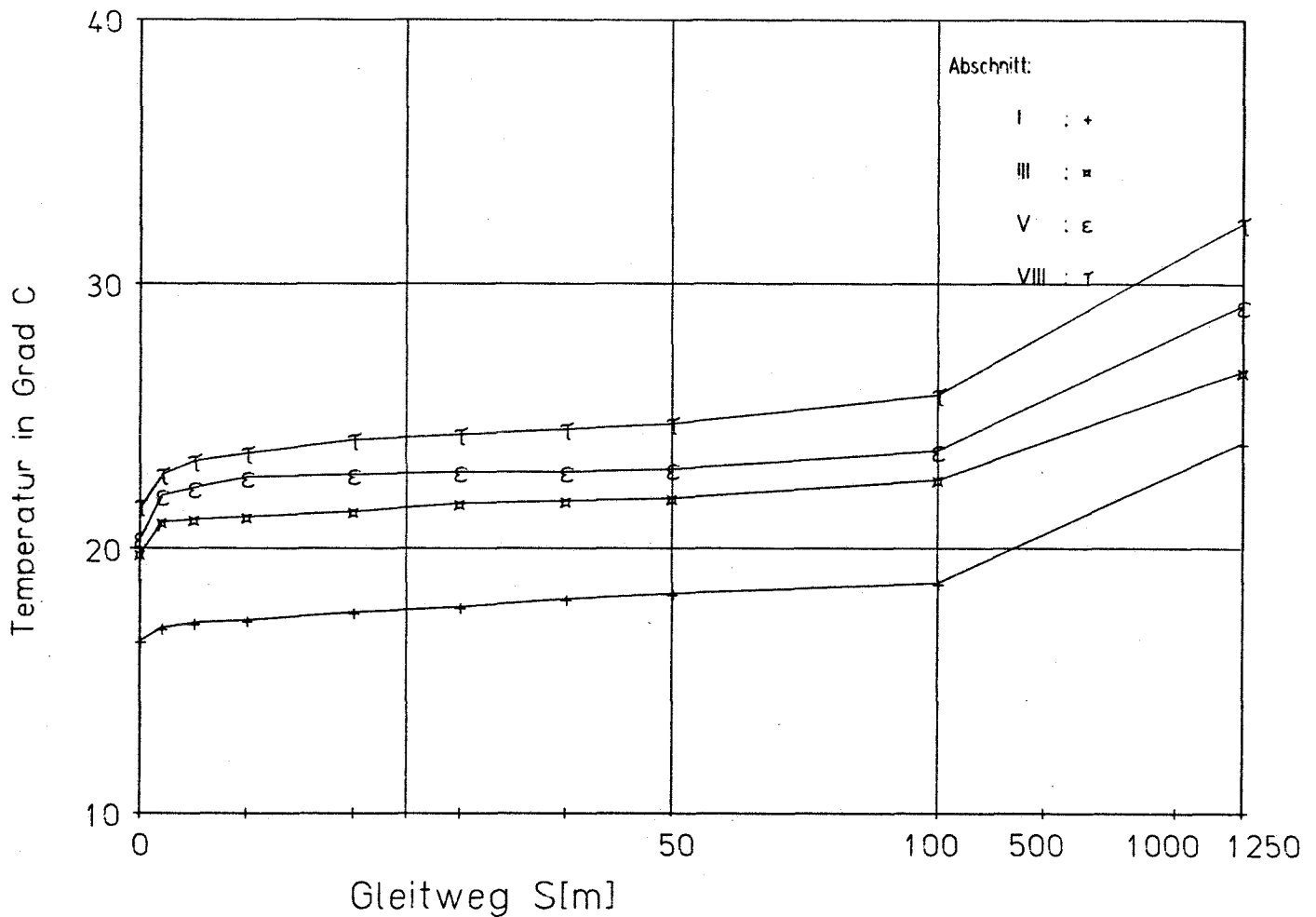
$s_0=\pm 75\text{mm}$



Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.2

Gleiten 2: $v=25\text{mm/s}$

$s_0=\pm 2.5\text{mm}$



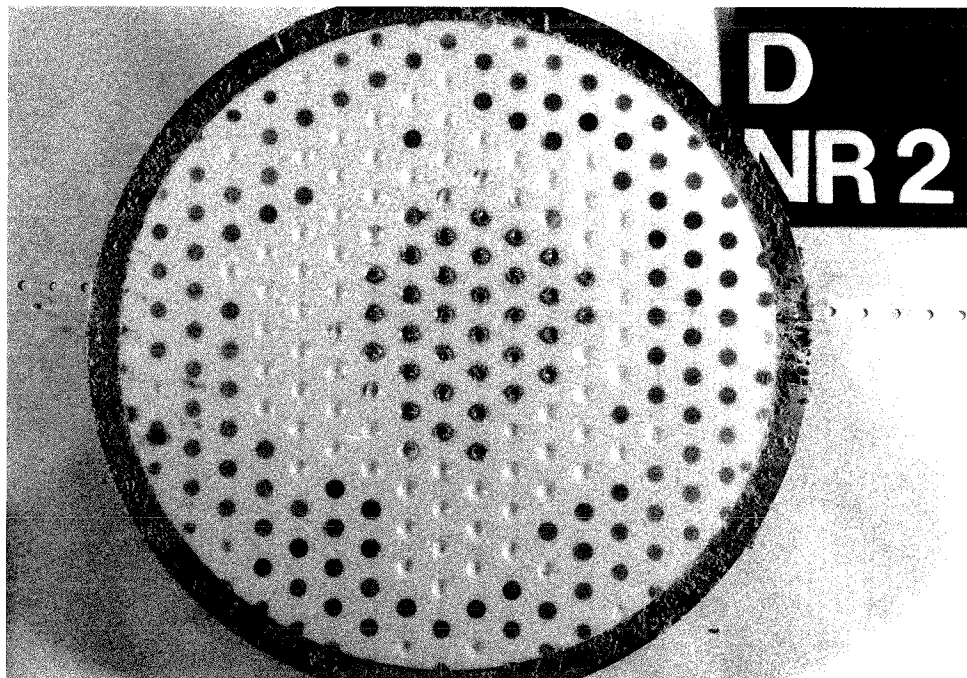
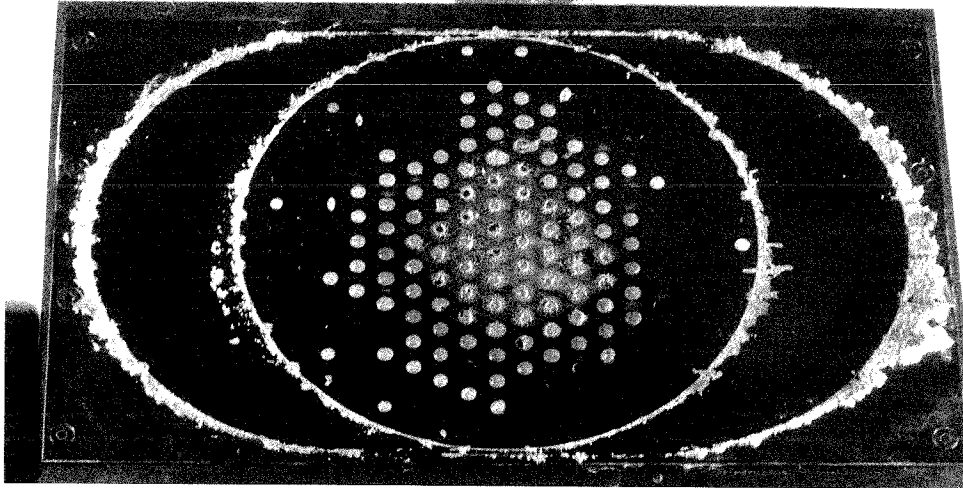
Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.2

Gleiten 2: $v=25\text{mm/s}$

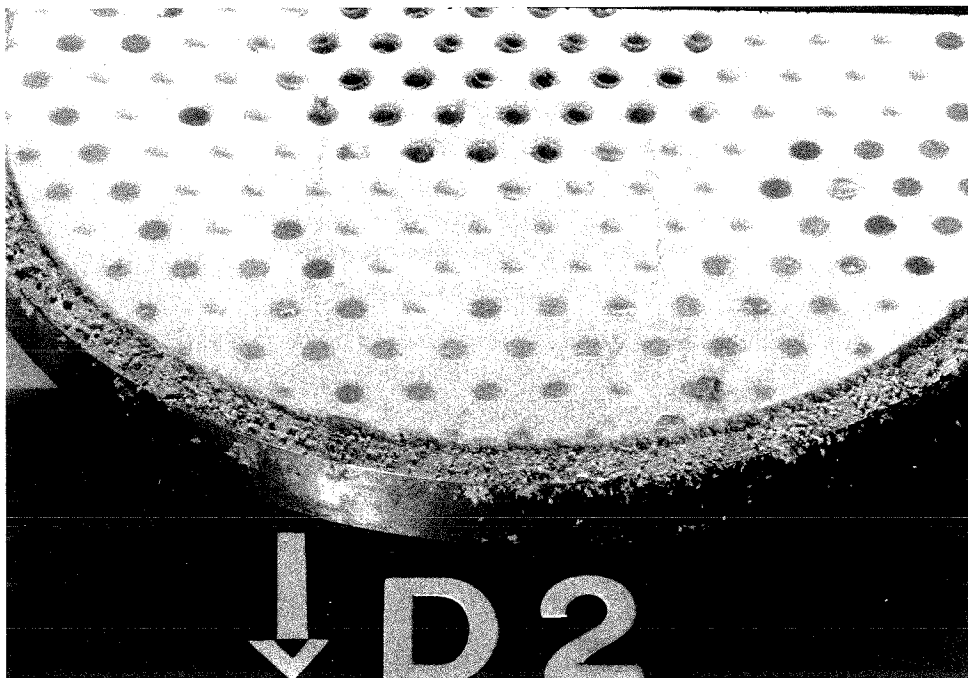
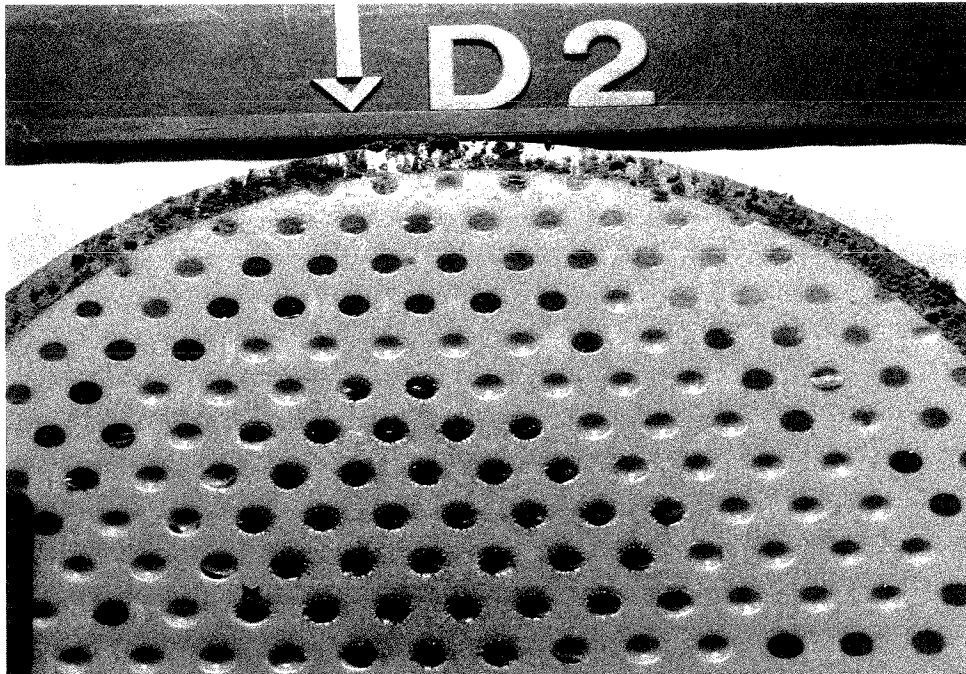
$s_0=\pm 2.5\text{mm}$

Temperatur am Gleitplattenrand in Abhängigkeit von Gleitweg in den Versuchsabschnitten "Gleiten 2"

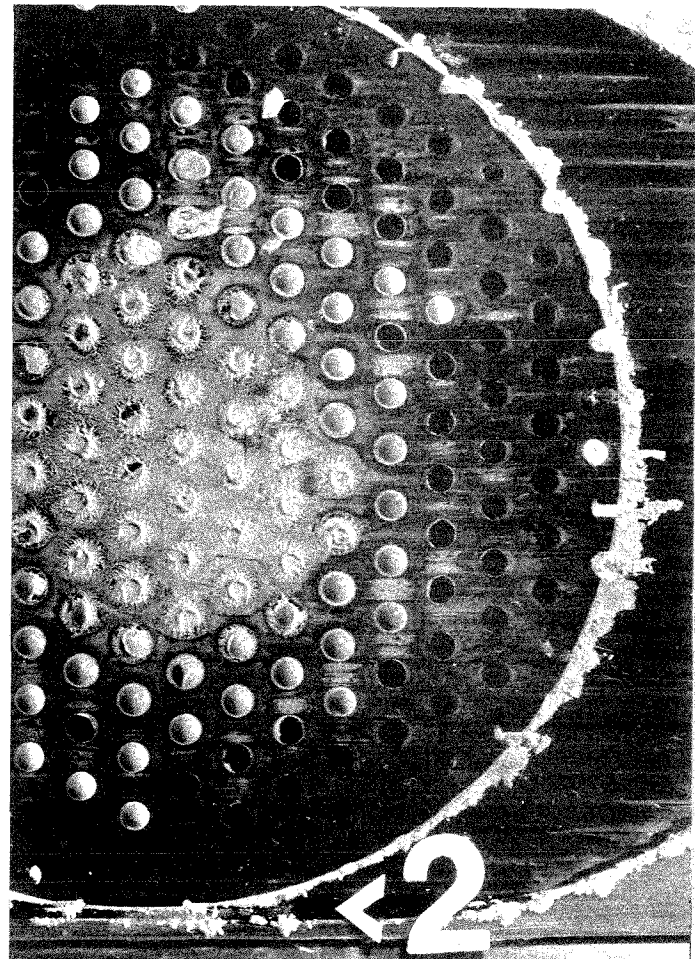
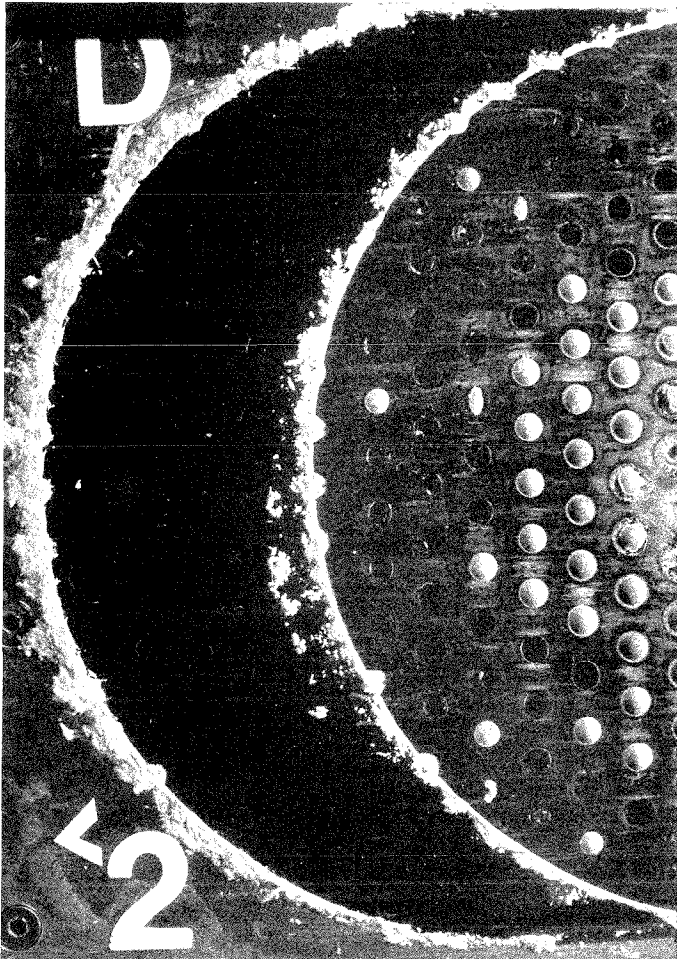
← D NR2 10024M
D250 P30 V0.1+25



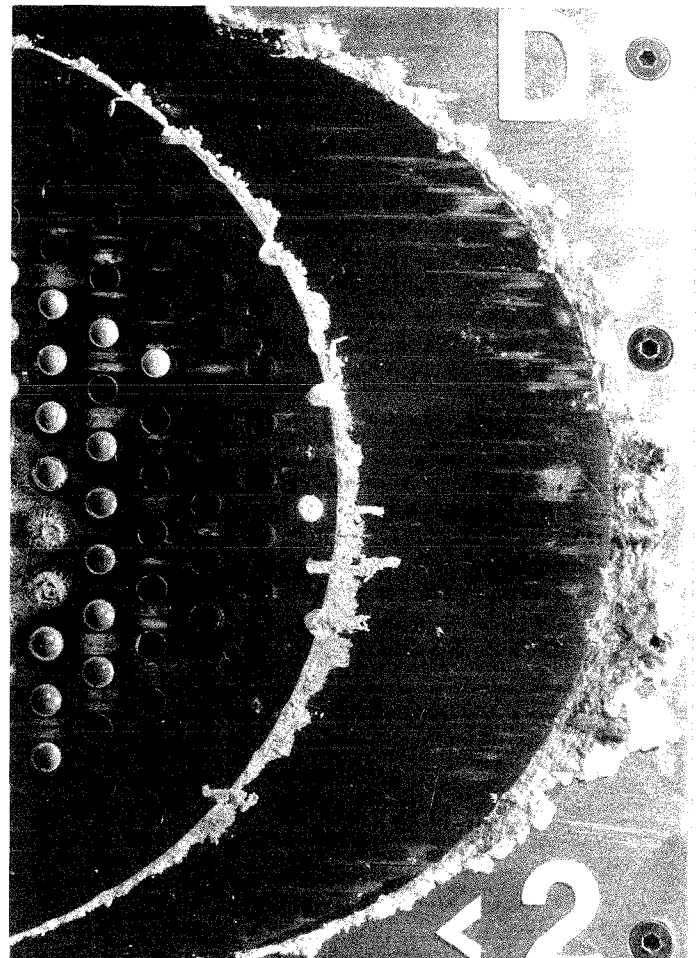
Bilder 49 und 50: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach ca. 10000 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 0,1 und 25 mm/s
Verschiebeweg ± 75 und $\pm 2,5$ mm)



Bilder 51 und 52: PTFE-Ronde \varnothing 250 mm nach ca. 10000 m Gleitweg mit Verschleißspuren und am Gleitflächenrand abgelagerten PTFE-Verschleißpartikeln, Versuch D-D250 P30 V0,1/25 Nr. 2 (Detailfotos zu Anlage 77)

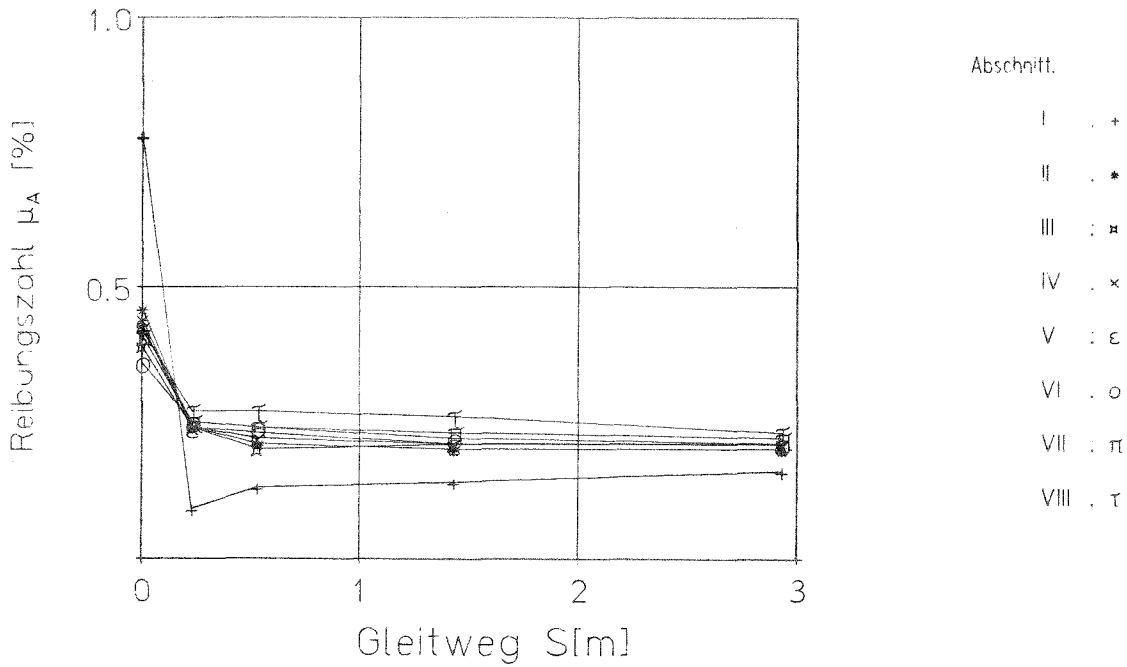


Bilder 53, 54 und 55:
Gleitblech nach ca. 10000 m Gleitweg
mit am Gleitflächenrand abgelagerten
PTFE-Verschleißprodukten und örtlichem
PTFE-Auftrag zwischen den
Schmiertaschenabdrücken
(Versuch D-D250 P30 VO,1/25 Nr. 2)



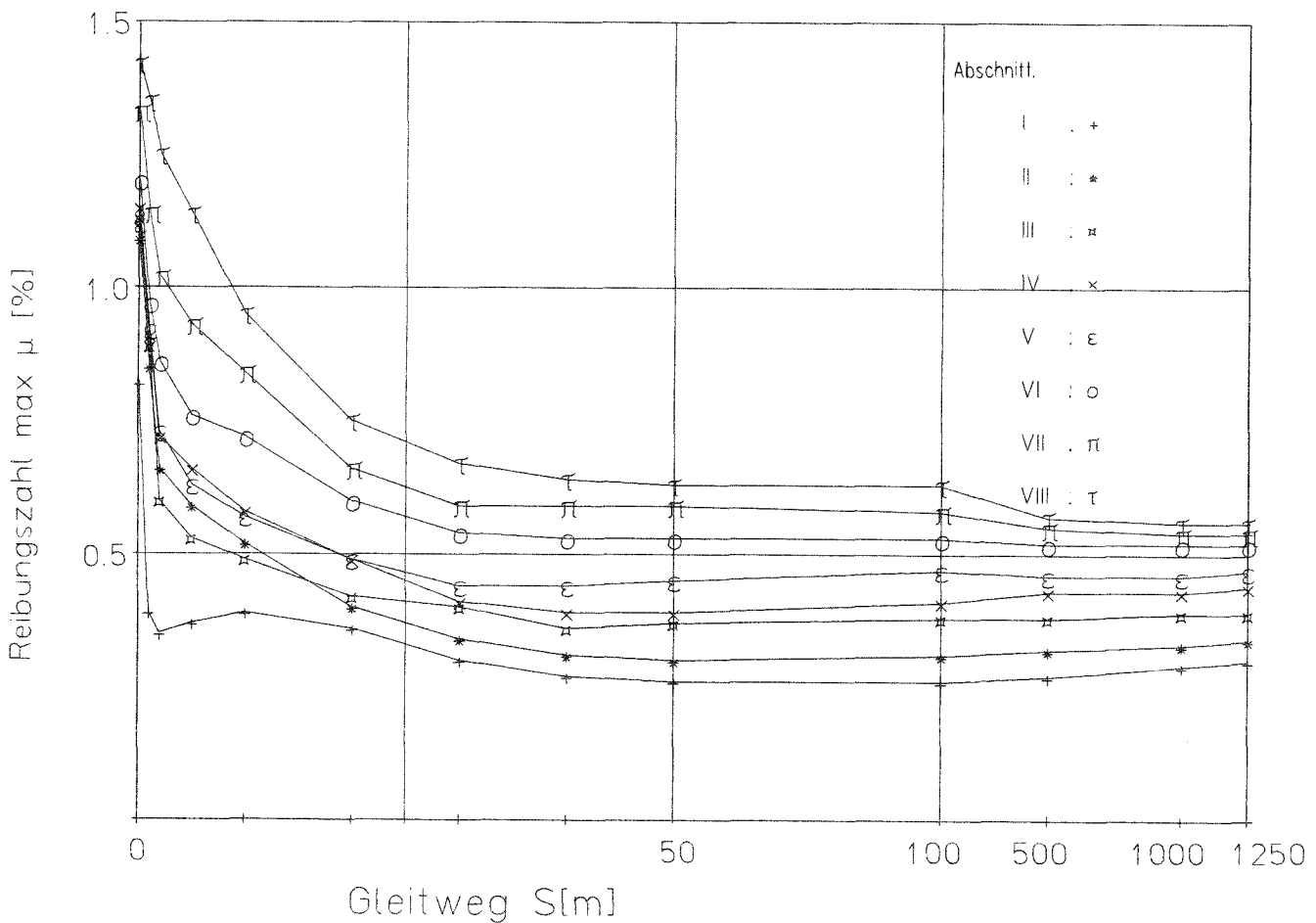
Versuch Nr		D-D250 P30 V 0.1 und 25 Nr.3																		
Gleitgeschwindigkeit v		0.1 mm/s					25 mm/s													
Verschiebeweg s ₀		±75 mm					±2.5 mm													
Gleitweg S _f [m]		0	~0.23	~0.53	~1.43	~2.93	0	≤0.20	1	2	5	10	20	30	40	50	100	500	1000	1250
Abschnitt		Gleiten 1					Gleiten 2													
I 0 - 1253 m	μ	0.78	0.09	0.13	0.14	0.16	0.82	0.61	0.39	0.35	0.37	0.39	0.36	0.30	0.27	0.26	0.26	0.27	0.29	0.30
	T	19.7				19.7	19.7			20.1	20.3	20.6	21.2	21.7	21.9	22.1	22.7			28.8
II 1253 - 2506 m	μ	0.46	0.24	0.21	0.20	0.20	0.91	1.09	0.85	0.66	0.59	0.52	0.40	0.34	0.31	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34
	T	25.2				20.4	20.4			21.5	21.9	22.5	22.9	23.1	23.2	23.3	23.9			28.2
III 2506 - 3759 m	μ	0.39	0.24	0.20	0.21	0.21	0.89	1.13	0.89	0.60	0.53	0.49	0.42	0.40	0.36	0.37	0.38	0.38	0.39	0.39
	T	24.7				19.1	19.1			20.6	21.1	21.5	22.0	22.2	22.4	22.6	23.1			28.5
IV 3759 - 5012 m	μ	0.44	0.24	0.22	0.21	0.21	0.95	1.15	0.91	0.72	0.66	0.58	0.49	0.41	0.39	0.39	0.41	0.43	0.43	0.44
	T	24.3				18.7	18.6			20.0	20.7	21.3	21.8	21.9	22.0	22.2	22.8			29.7
V 5012 - 6265 m	μ	0.43	0.24	0.23	0.21	0.21	0.97	1.12	0.92	0.73	0.63	0.57	0.49	0.44	0.44	0.45	0.47	0.46	0.46	0.47
	T	25.6				20.7	20.4			21.7	22.5	23.1	23.7	23.9	24.0	24.2	25.4			32.5
VI 6265 - 7518 m	μ	0.36	0.25	0.24	0.22	0.21	0.97	1.20	0.97	0.86	0.76	0.72	0.60	0.54	0.53	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52
	T	27.8				20.8	20.4			21.9	22.6	23.2	23.9	24.2	24.5	24.8	26.1			33.0
VII 7518 - 8771 m	μ	0.41	0.25	0.24	0.23	0.22	1.04	1.33	1.14	1.02	0.93	0.84	0.66	0.59	0.59	0.59	0.58	0.55	0.54	0.54
	T	27.6				21.2	20.9			22.2	23.7	24.5	25.2	25.3	25.6	26.1	27.6			35.7
VIII 8771 - 10024 m	μ	0.42	0.27	0.27	0.26	0.23	1.08	1.42	1.35	1.25	1.14	0.95	0.75	0.67	0.64	0.63	0.63	0.57	0.56	0.56
	T	29.2				22.4	22.0			24.0	25.6	26.5	27.2	27.3	27.3	27.6	29.0			37.5

Reibungszahl μ[%]; Temperatur T[°C] der Gleitplatte



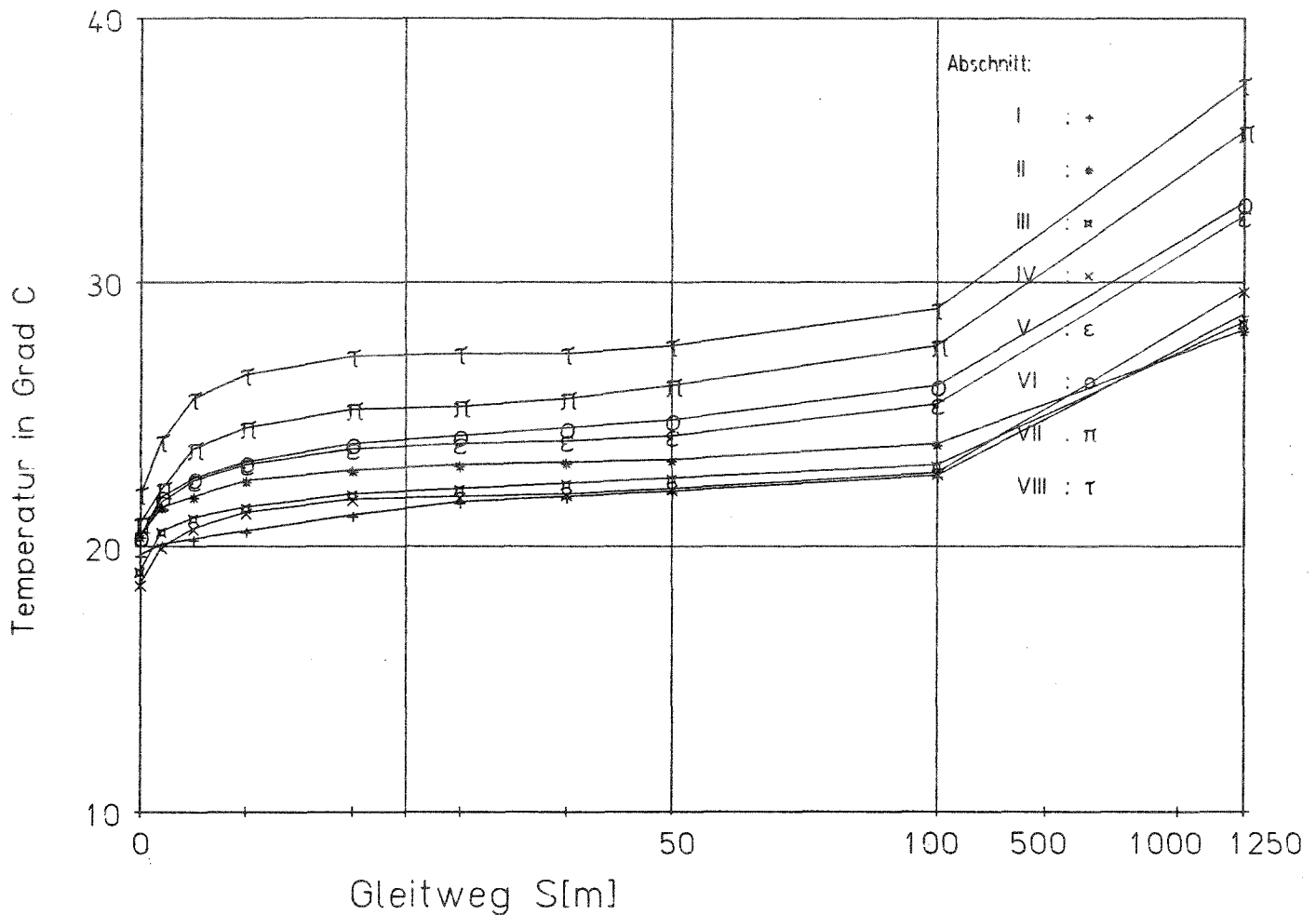
Versuch : D-D250 P30 V 0.1 und 25 Nr.3

Gleiten 1: $v=0.1\text{mm/s}$
 $s_0=\pm 75\text{mm}$



Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.3

Gleiten 2: $v=25\text{mm/s}$
 $s_0=\pm 2.5\text{mm}$

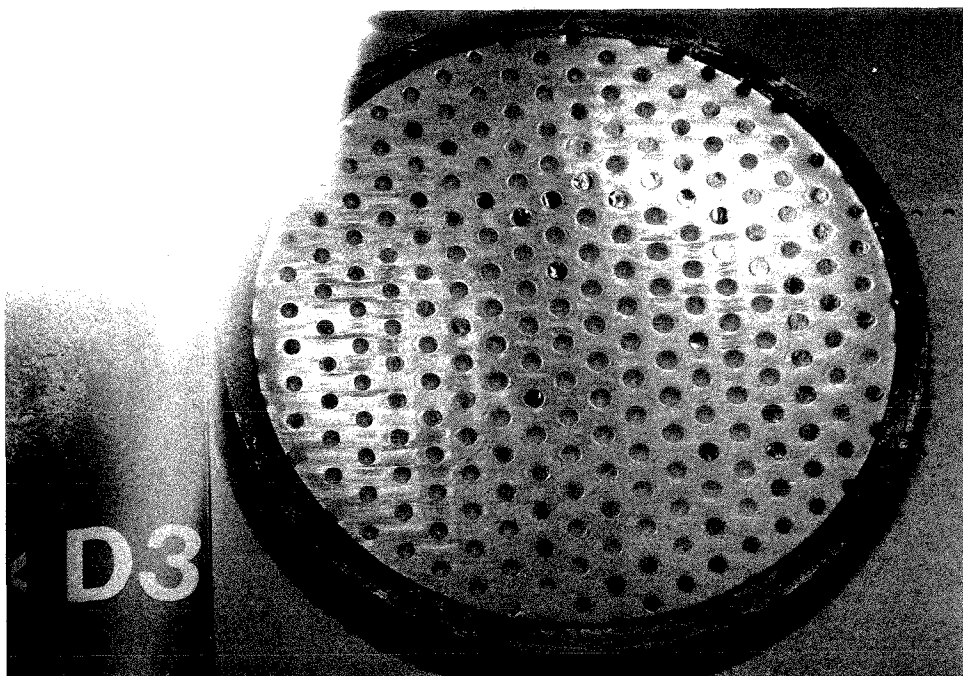


Versuch : D-D 250 P30 V 0.1 und 25 Nr.3

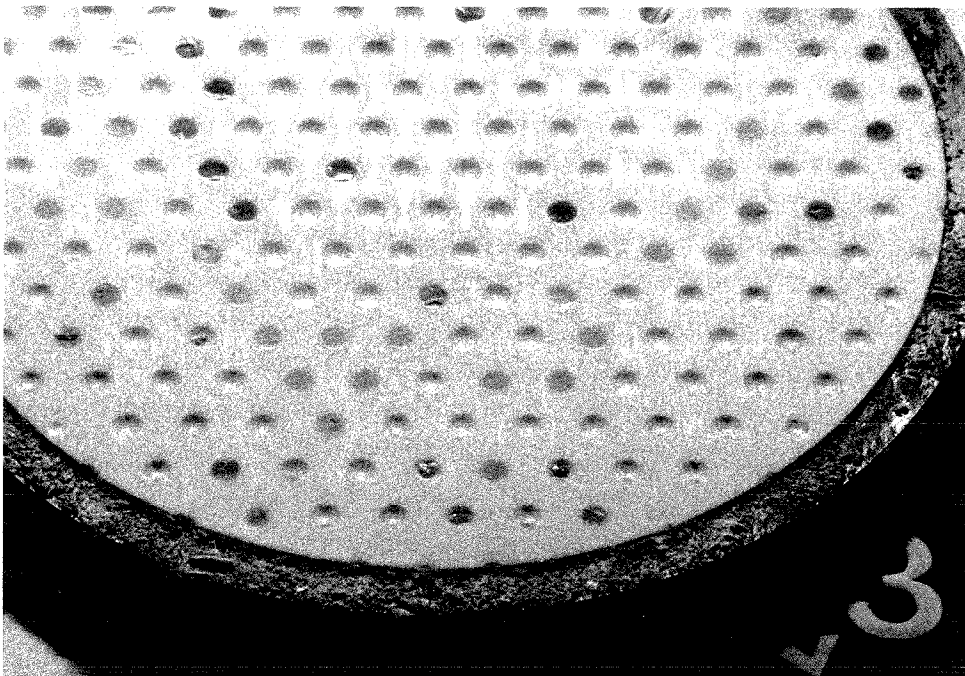
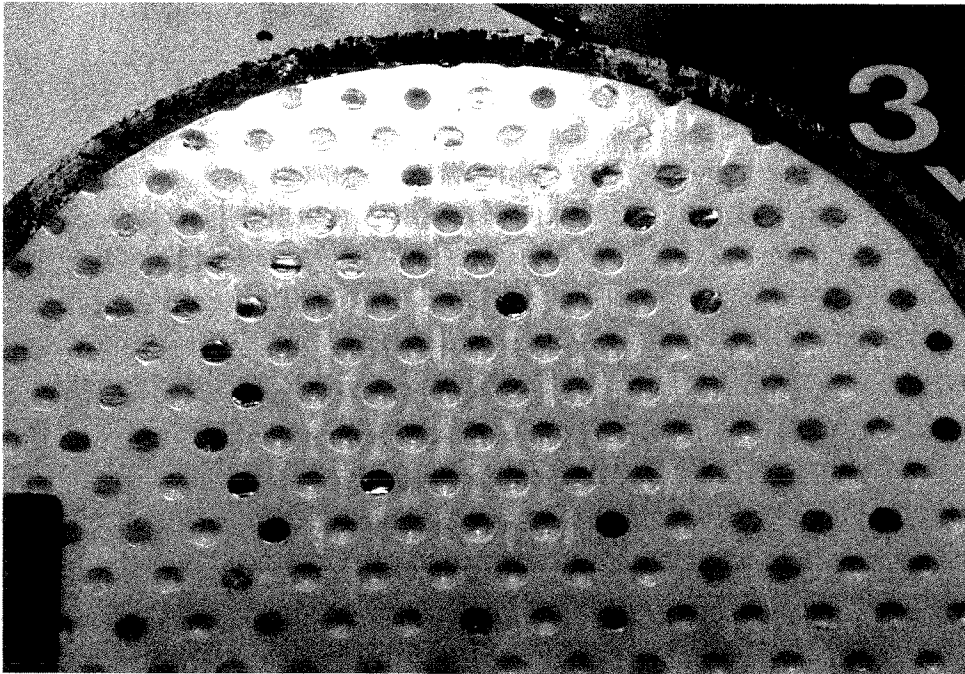
Gleiten 2: $v=25\text{mm/s}$

$s_0=\pm 2.5\text{mm}$

Temperatur am Gleitplattenrand in Abhängigkeit von Gleitweg in den Versuchsabschnitten "Gleiten 2"



Bilder 56 und 57: Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach ca. 10000 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 0,1 und 25 mm/s,
Verschiebeweg ± 75 und $\pm 2,5$ mm)



Bilder 58 und 59: PTFE-Ronde \varnothing 250 mm nach ca. 10000 m Gleitweg mit Verschleißspuren und am Gleitflächenrand abgelagerten Verschleißpartikeln, Versuch D-D250 P30 V0,1/25, Nr. 3 (Detailfotos zu Anlage 83)

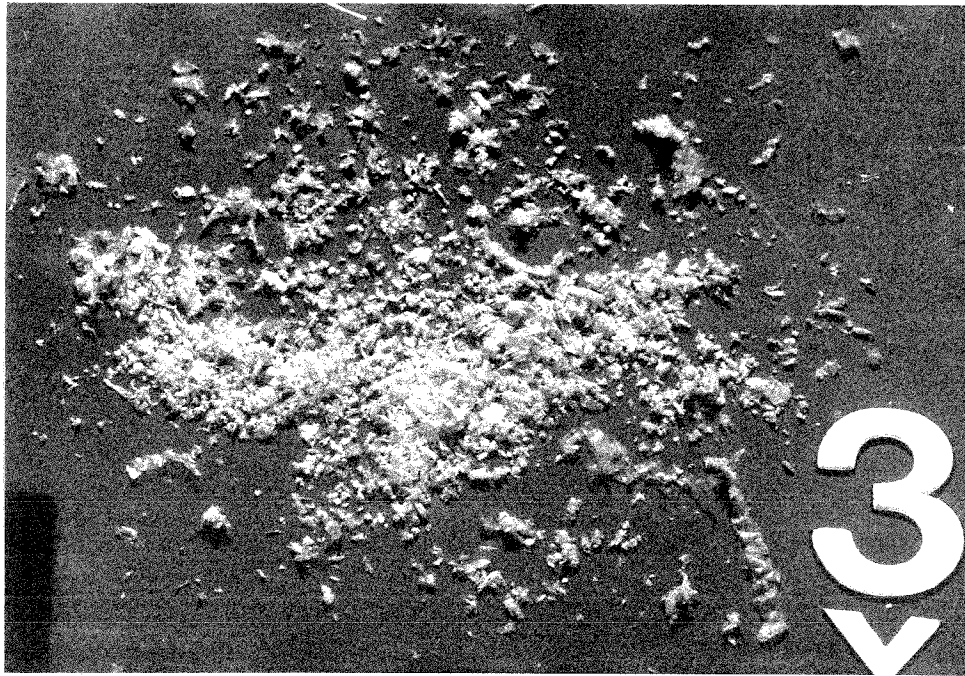


Bild 60: Während des Versuchs über ca. 10000 m Gleitweg aus den Gleitspalt herausgeschobene PTFE-Verschleißprodukte (Versuch D-D250 P30 V0,1/25, Nr. 3)

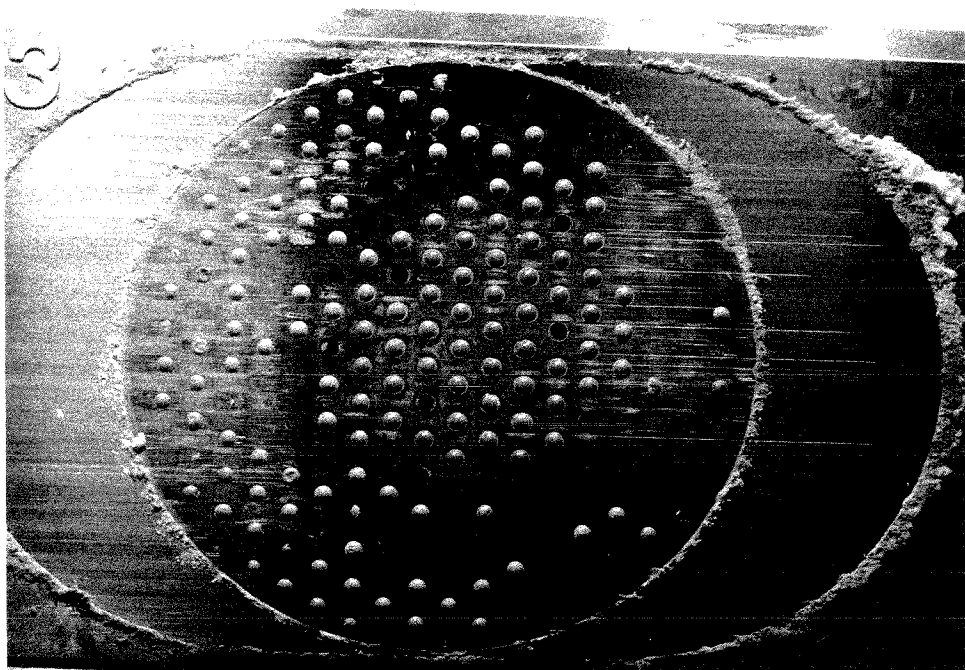


Bild 61: Aust. Gleitblech nach ca. 10000 m Gleitweg mit Kratz-Verschleißspuren, am Gleitflächenrand abgelagerten PTFE-Verschleißpartikeln und örtlichem PTFE Auftrag zwischen den Schmiertaschenabdrücken (Versuch D-D250 P30 V0,1/25, Nr. 3)

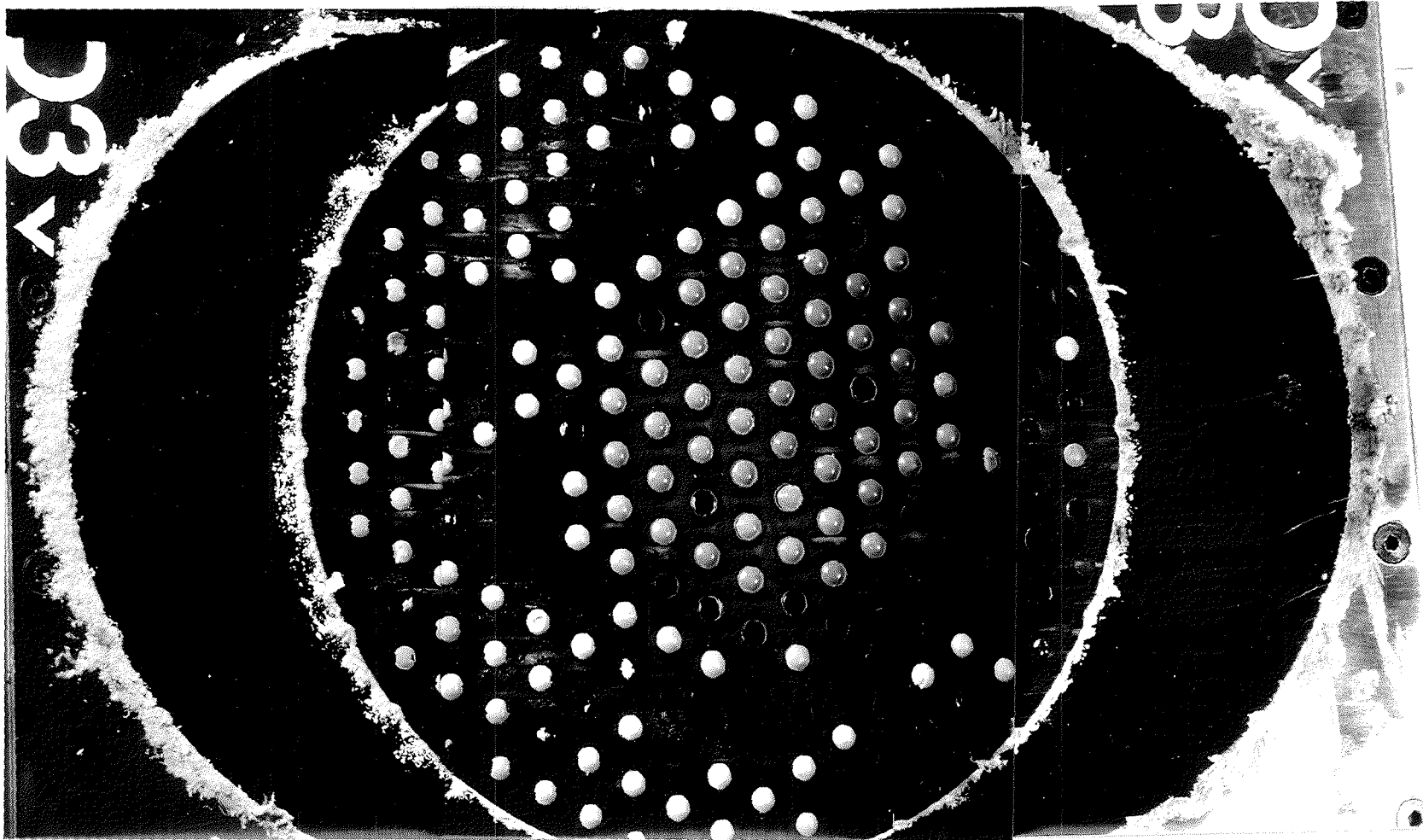


Bild 62: Aust. Gleitblech nach ca. 10000 m Gleitweg
(Detailfotos zu Anlage 85)
Versuch D-D250 P30 V0,1/25, Nr. 3

Versuchsreihe D: Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur an
3 geschmierten Gleitlagern über 6265 m bzw. 10024 m Gleitweg
(PTFE weiß/aust. Stahl, Schmierung mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung)

Versuchsergebnisse: Zusammenstellung der max. Reibungszahlen zu Beginn
und am Ende der einzelnen Versuchsabschnitte
in Abhängigkeit vom aufaddierten Gleitweg

Versuchs- abschnitt	I/1		I/2		II/1		II/2		III/1		III/2		IV/1		IV/2	
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
S [m]	0	3	3	1253	1253	1256	1256	2506	2506	2509	2509	3759	3759	3762	3762	5012
v [mm/s]	0,1		25		0,1		25		0,1		25		0,1		25	
$\pm s_0$ [mm]	75		2,5		75		2,5		75		2,5		75		2,5	
Nr.1 μ [%]	0,96	0,14	0,65	0,24	0,31	0,23	0,93	0,27	0,38	0,23	0,87	0,30	0,31	0,20	0,97	0,36
Nr.2 μ [%]	0,46	0,13	0,69	0,23	0,39	0,21	1,00	0,25	0,35	0,21	0,93	0,28	0,42	0,21	0,94	0,30
Nr.3 μ [%]	0,78	0,16	0,82	0,30	0,46	0,20	1,09	0,34	0,39	0,21	1,13	0,39	0,44	0,21	1,15	0,44
Versuchs- abschnitt	V/1		V/2		VI/1		VI/2		VII/1		VII/2		VIII/1		VIII/2	
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
S [m]	5012	5015	5015	6265	6265	6268	6268	7518	7518	7521	7521	8771	8771	8774	8774	10024
v [mm/s]	0,1		25		0,1		25		0,1		25		0,1		25	
$\pm s_0$ [mm]	75		2,5		75		2,5		75		2,5		75		2,5	
Nr.1 μ [%]	0,36	0,20	0,92	0,44	(Versuch abgebrochen)											
Nr.2 μ [%]	0,38	0,22	0,96	0,31	0,45	0,21	0,94	0,34	0,41	0,22	1,08	0,36	0,37	0,23	1,09	0,39
Nr.3 μ [%]	0,43	0,21	1,12	0,47	0,36	0,21	1,20	0,52	0,41	0,22	1,33	0,54	0,42	0,23	1,42	0,56

PTFE-Durchmesser = 250 mm; mittlere Lagerpressung = 30 N/mm²

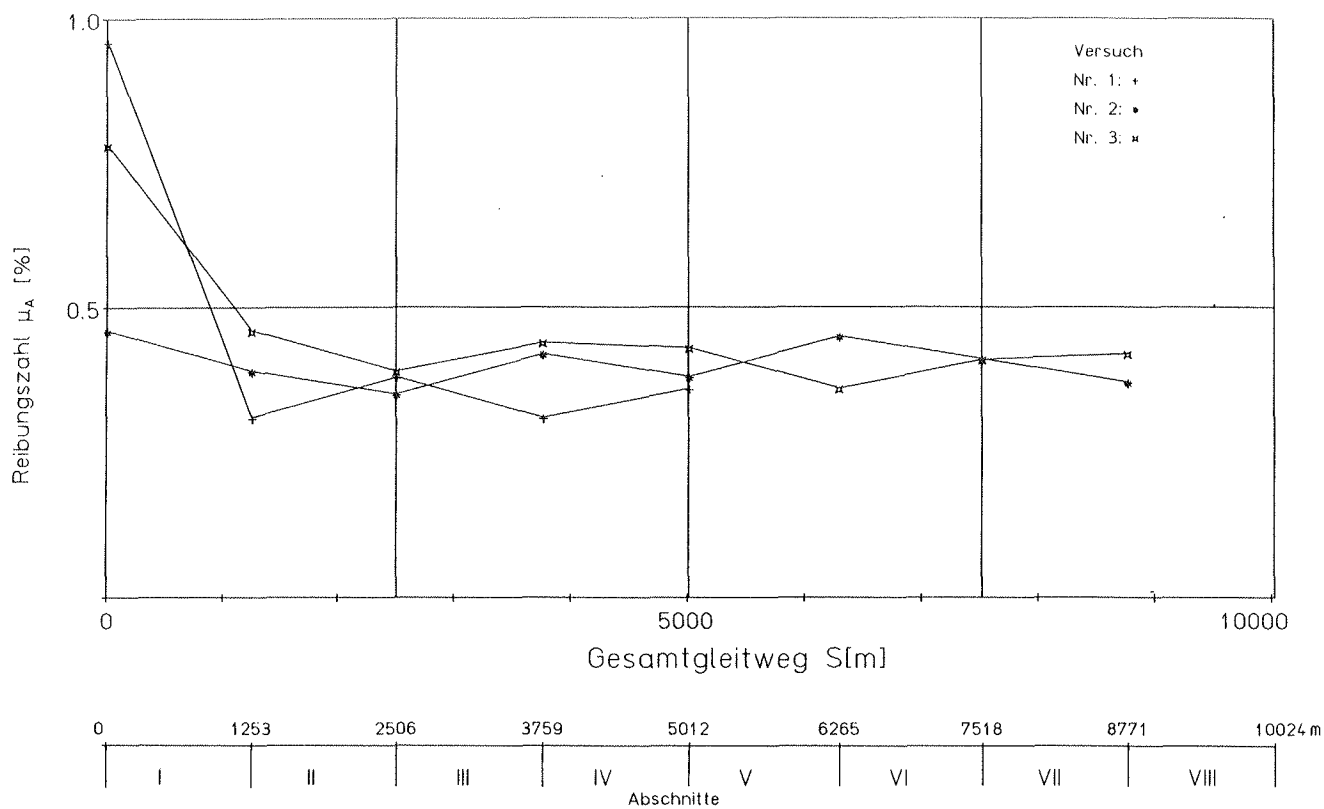
Vorbelastungszeit vor Beginn der ersten Gleitbewegung = 24 Stunden

Standzeit ohne Bewegung zwischen den einzelnen Versuchsabschnitten = 1 Stunde

A = Maximalwert zu Beginn des Versuchsabschnitts; E = Max. Wert am Ende des Versuchsabschnitts

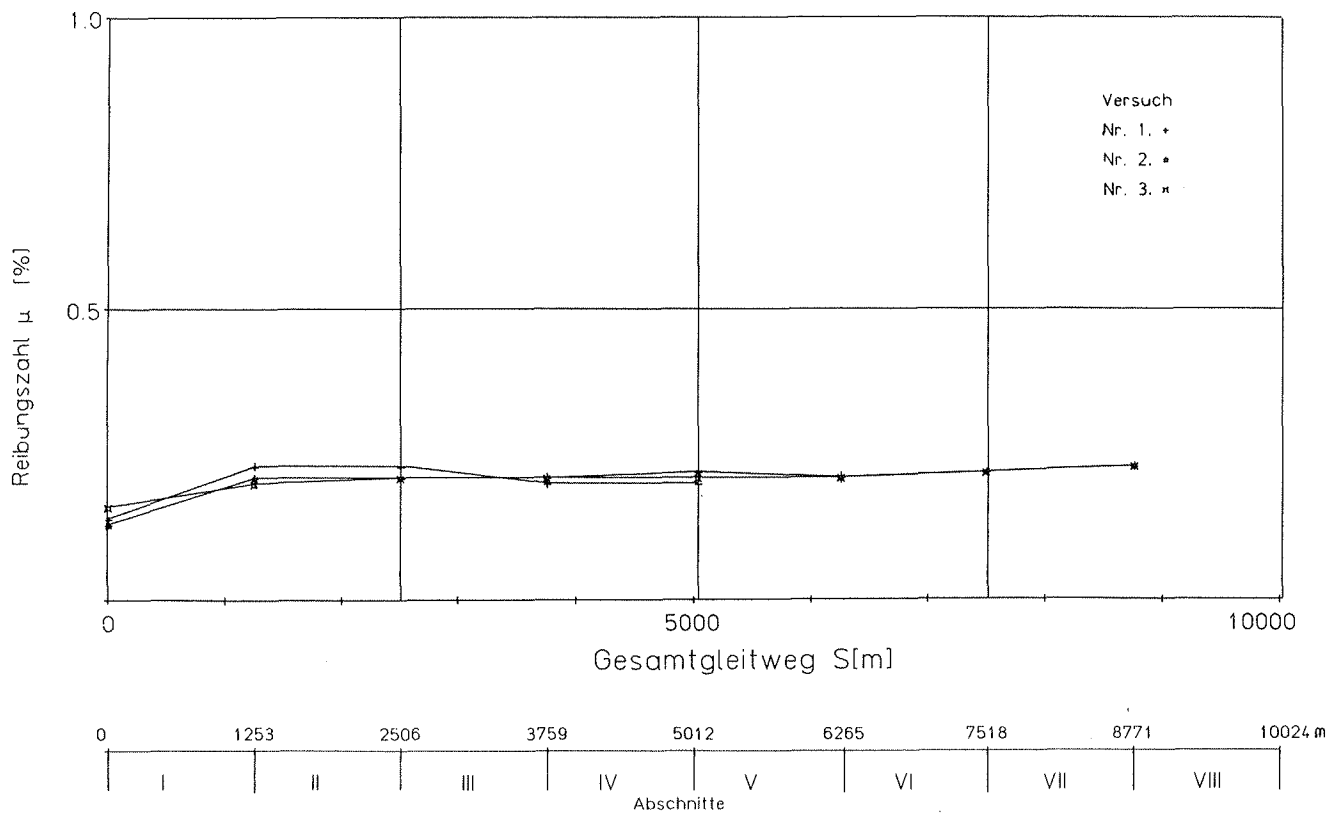
S = aufaddierter Gleitweg; v = mittlere Verschiebegeschwindigkeit; s_0 = Verschiebeweg

μ = Reibungszahl



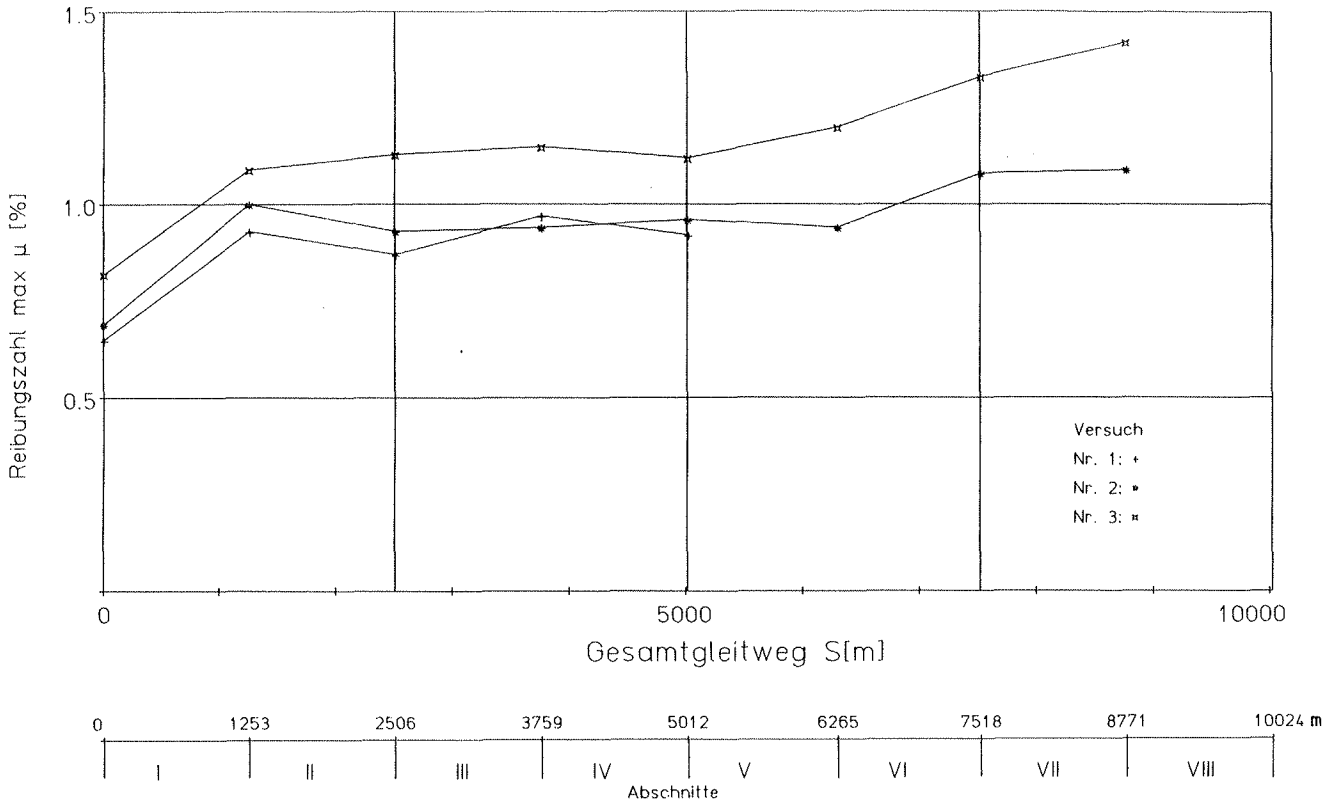
Versuche: D-D250 P30 V 0.1 und 25mm/s; Nr. 1,2,3

Reibungszahlen μ_A zu Beginn von Gleiten 1 ($v=0.1\text{mm/s}$; $s_0=\pm 75\text{mm}$) in Abhängigkeit vom Gesamtgleitweg



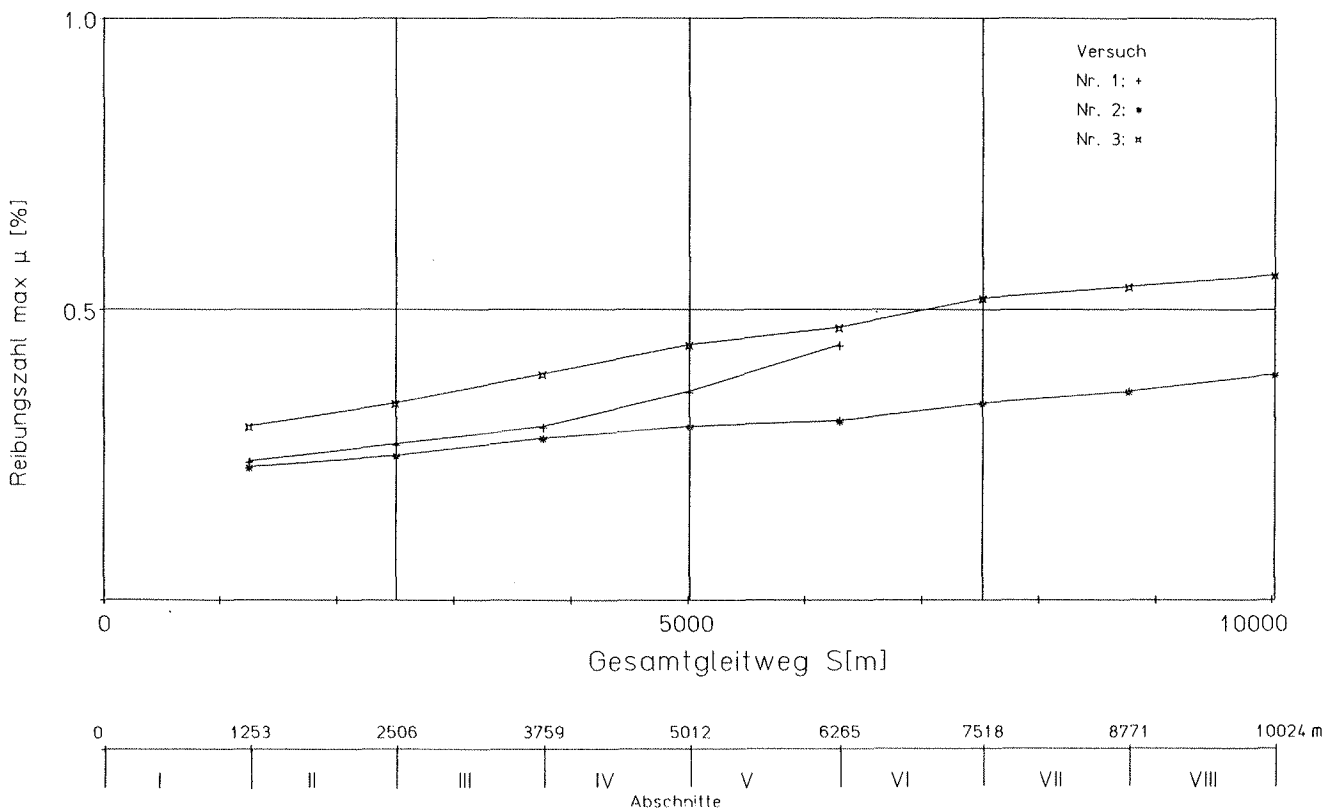
Versuche: D-D250 P30 V 0.1 und 25mm/s; Nr. 1,2,3

Reibungszahlen μ am Ende von Gleiten 1 ($v=0.1\text{mm/s}$; $s_0=\pm 75\text{mm}$) in Abhängigkeit vom Gesamtgleitweg



Versuche: D-D250 P30 V 0.1 und 25mm/s; Nr. 1,2,3

Max. Reibungszahlen zu Beginn von Gleiten 2 ($v=25\text{mm/s}$; $s_0=\pm 2.5\text{mm}$) in Abhängigkeit vom Gesamtgleitweg



Versuche: D-D250 P30 V 0.1 und 25mm/s; Nr. 1,2,3

Max. Reibungszahlen am Ende von Gleiten 2 ($v=25\text{mm/s}$; $s_0=\pm 2.5\text{mm}$) in Abhängigkeit vom Gesamtgleitweg

Versuchsreihe D:

Dauergleitprogrammversuche an geschmierten Gleitlagern über ca. 10000 m Gleitweg
 Versuchsergebnisse der Verformungs- und Verschleißmessungen

Versuch	D - D250 P30 V0,1/25		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
δ_1 [mm]	0,22	0,19	0,19
$\Delta\delta_2$ [mm]	0,03	0,02	0,03
$\Delta\delta_3$ [mm]	0,045	0,09	0,11
δ_4 [mm]	0,14	0,13	0,15
$\Delta\ddot{u}$ [mm]	0,20	0,25	0,30
$\Delta\emptyset$ [mm]	0,8	0,4	0,8
Δt [mm]	0,12	0,11	0,16
$\Delta t/t_0$ [%]	2,5	2,25	3,4
ΔG [gr]	3,55	4,49	7,46
$\Delta G/G_0$ [o/oo]	7,4	9,5	15,5
Gesamtgleitweg [m]	6265	10024	10024

δ_1 = PTFE-Zusammendrückung bei Belastung von 0,1 F_v auf $F_v = 1473$ kN

$\Delta\delta_2$ = Zunahme der PTFE-Zusammendrückung während der Vorbelastungszeit von 24 Stunden

$\Delta\delta_3$ = Änderung der PTFE-Zusammendrückung während des Gleitversuchs bei F_v (wegen Beeinflussung der Werte durch Temperaturerhöhung in den Versuchsabschnitten "Gleiten 2" nur bis zu Gleitwegen von 5015 m (Nr. 1) bzw. 8874 m (Nr. 2 und 3) bei etwa 22 °C ausgewertet).

δ_4 = bleibende PTFE-Restverformung bei Belastung mit 0,1 F_v

$\Delta\ddot{u}$ = Überstandsänderung der PTFE-Ronde aus der Stahlunterlage im unbelasteten Zustand

$\Delta\emptyset$ = Durchmesseränderung der PTFE-Ronde durch Wulstbildung

Δt = Dickenänderung der PTFE-Ronde im unbelasteten Zustand

ΔG = Gewichtsänderung der PTFE-Ronde (Verschleiß)

t_0 bzw. G_0 = Ursprungsdicke bzw. Gewicht der PTFE-Ronde vor dem Versuch

Versuchsreihe B1: Schubversuche an bewehrten
Elastomerlagern

Versuchsreihe B1

Schubversuche bei Raumtemperatur an 3 bewehrten Elastomerlagern

Aufbau der Elastomerlager									
Bezeichnung	\emptyset [mm]	d [mm]	T_N [mm]	n	t [mm]	s [mm]	n_s	SH	Nr.
EL 450x 99 SH50	450	99	71	6	11	4	7	51±1	217614
EL 450x 99 SH65	450	99	71	6	11	4	7	65±1	63699
EL 450x159 SH50	450	159	115	10	11	4	11	49±1	817692

\emptyset = Außendurchmesser
d = Einbaudicke
 T_N = Elastomerdicke
n = Zahl der Elastomerschichten
t = Elastomer-Schichtdicke
s = Dicke der Bewehrungsbleche
 n_s = Anzahl der Bewehrungsbleche
SH = Shore-A-Härte
Nr. = Fabrikations-Nr. des Herstellers

Schubversuche an Elastomerlagern bei Raumtemperatur: Versuchsbedingungen			
Versuchs- bezeichnung	v [mm/s]	max min (tan γ)	p [N/mm ²]
EL 450x 99 SH50	0,4; 50; 150	± 0,025*	9,26
EL 450x 99 SH65	0,4; 150	± 0,05 ± 0,10	9,26
EL 450x159 SH50	0,4; 150	± 0,20 ± 0,40	9,26

Vorgegebene Weg-Zeit-Funktion des Gleitschiebers: linear

Anzahl der Doppelhübe: ≥ 3 je untersuchtem v und tan γ

Messungen: - Verschiebewiderstand zeitabhängig
- Schubverformung zeitabhängig
- Oberflächentemperatur an der Schmalseite des Lagers

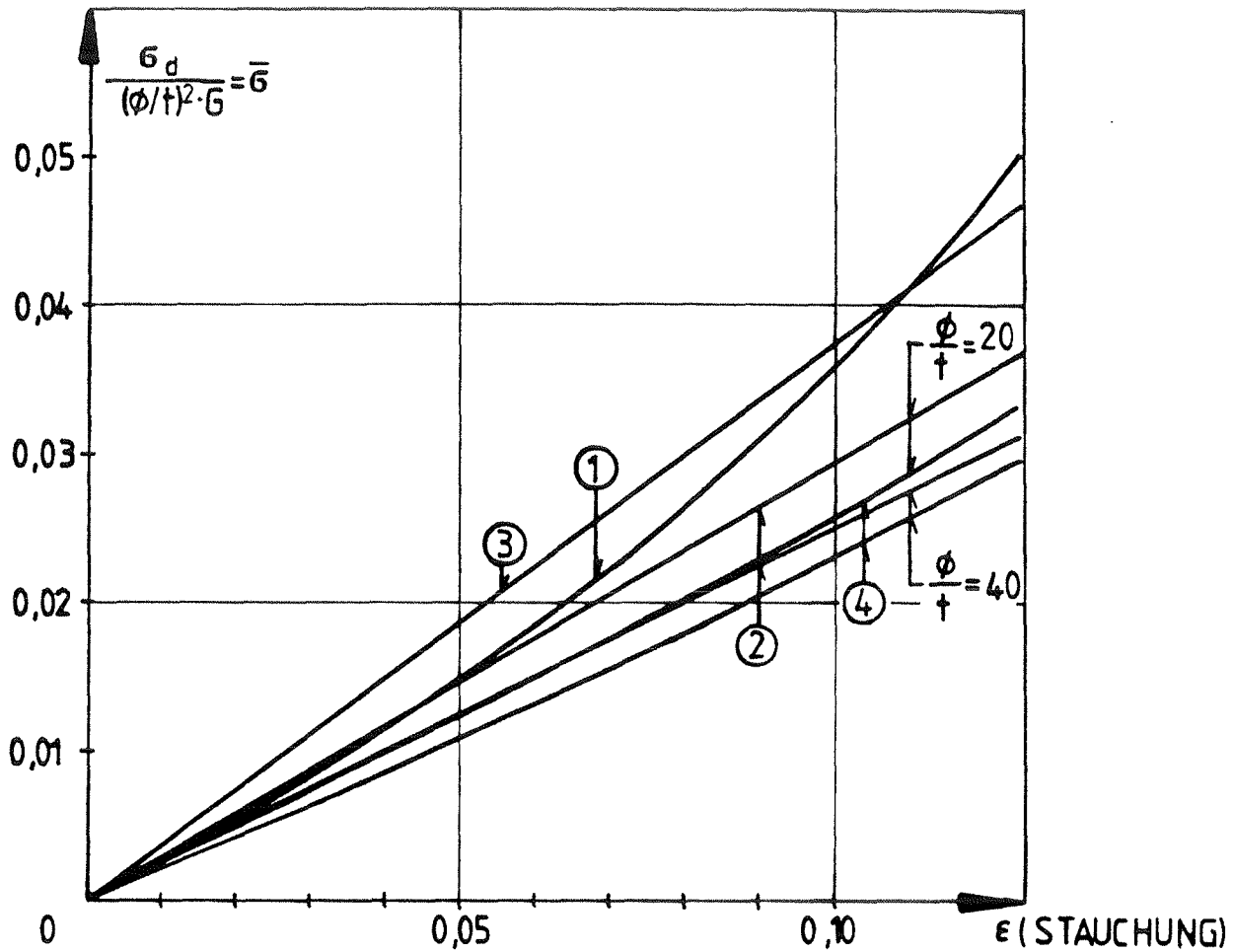
v = Verschiebegeschwindigkeit des Gleitschiebers

$$\max_{\min} (\tan\gamma) = \pm \frac{s_0}{T_N} = \max_{\min} \text{ Schubverformung}$$

s_0 = Schubausslenkung, T_N = Elastomerdicke

$$p = \frac{F}{A_N} = \text{mittlere Elastomerpressung}$$

*tan γ = ± 0,025 nur bei v = 0,4 und 50 mm/s



$$\frac{\sigma_d}{(\phi/t)^2 \cdot G} = \bar{\sigma}$$

- ① $\bar{\sigma} = 0,25\epsilon / (1 - 3\epsilon)$; (ORE)
- ② $\bar{\sigma} = 0,313\epsilon / (1 + 5GS^2/E_k)$; (BSI)
 $G = 1,0 \text{ N/mm}^2$; $E_k = 2000 \text{ N/mm}^2$
- ③ $\bar{\sigma} = 0,375\epsilon$; (Topaloff; Eggert/Grote/Kauschke)
- ④ $\bar{\sigma} = k \cdot \epsilon / (1 - \epsilon)$; (Battermann/Köhler)
 $k = 0,188(1 + \frac{1}{s} + \frac{1}{s^2})$

s = Formfaktor; für runde Lager $S = \phi / (4t)$

σ_d = mittlere Druckspannung bei zentrischer Last

Druckspannungs- Stauchungs- Diagramme für runde bewehrte Elastomerlager nach Formeln aus der Literatur

Lagerstauchungen: Versuchswerte

Lager	σ_1 (N/mm ²)	σ_2 (N/mm ²)	$\Delta\sigma$ (N/mm ²)	$\Delta\varepsilon$ (%)
EL 450x99 SH51	0,926	9,26	8,334	2,8
EL 450x99 SH65				1,58
EL 450x159 SH49				2,74
$\sigma_1 =$ Vorbelastung; $\sigma_2 =$ max. Belastung				

Ermittlung von Schubmoduln aus gemessenen Stauchungen im Versuch und mit Formeln aus der Literatur

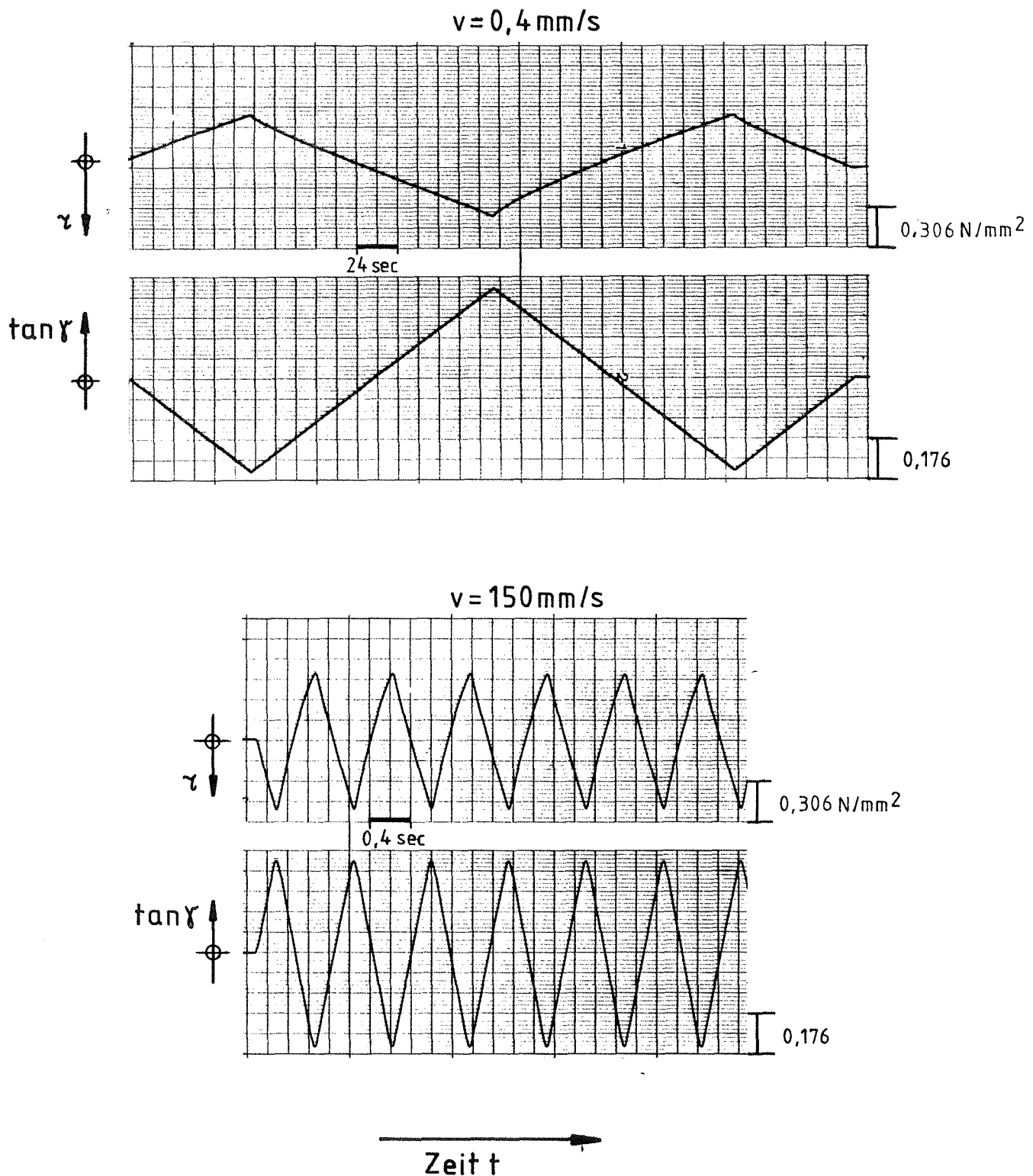
Lager	G_R (N/mm ²)	G_R (N/mm ²)	G_R (N/mm ²)	G_R (N/mm ²)
EL 450x99 SH51	0,64	0,67	0,83	0,47
EL 450x99 SH65	1,19	1,37	1,49	0,84
EL 450x99 SH49	0,65	0,69	0,85	0,48
Berechnung nach:	①	②	③	④

① ORE $\sigma_d = 4GS^2 \frac{\varepsilon}{1-3\varepsilon}$

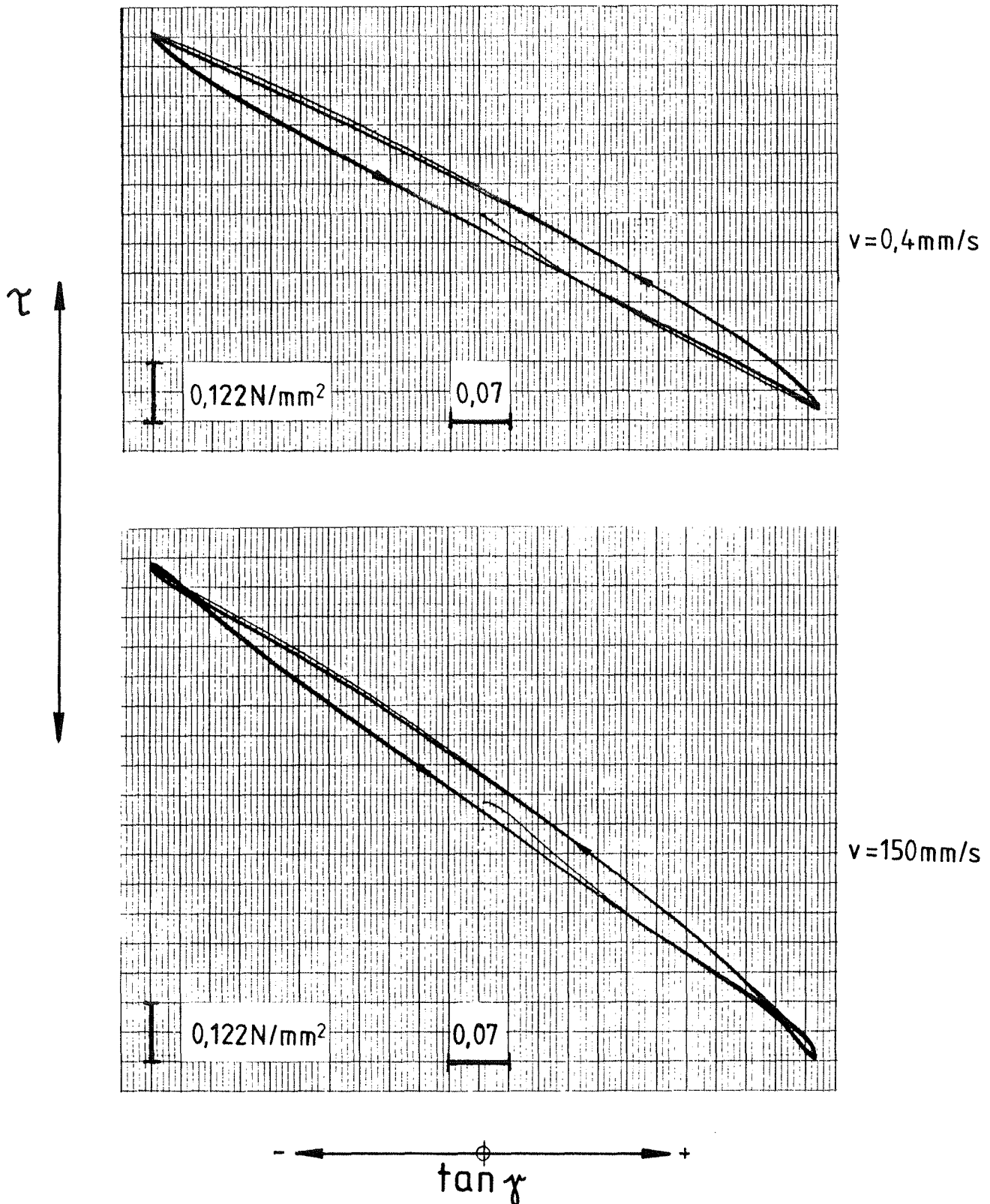
② BSI
(Brit. Norm) $\sigma_d = \frac{5GS^2}{(1+5GS^2/E_k)} \varepsilon$
 $E_k = 2000 \text{ N/mm}^2$

③ Battermann/
Köhler $\sigma_d = E_d \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}$
 $E_d = 3G(1+S+S^2)$

④ Topaloff;
Eggert/Grote/
Kauschke $\sigma_d = E_i(\varepsilon - \varepsilon_0)$
 $E_i = \frac{3}{8}G(\phi/t)^2$



Zeitlicher Verlauf von Schubspannung und Gleitwinkel für das Elastomerlager 450×99 SH65 bei Verschiebegeschwindigkeiten von 0,4 und 150 mm/s und einem max. Gleitwinkel von max. $\tan\gamma = \pm 0,4$

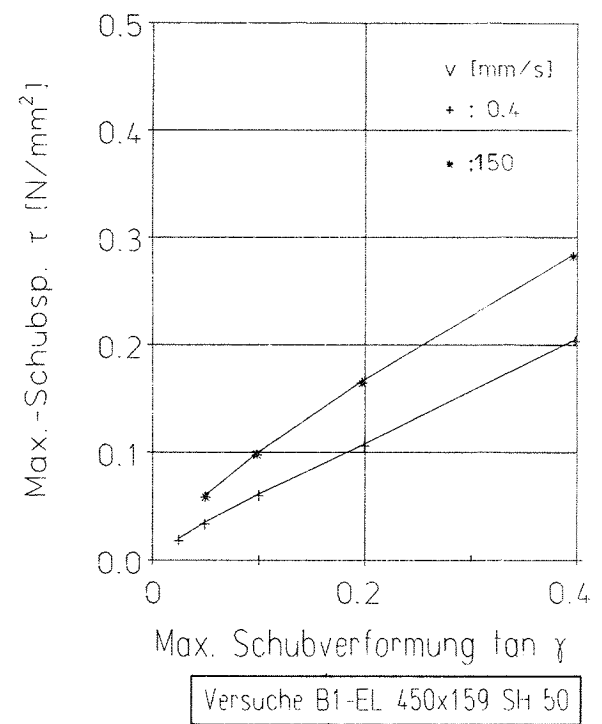
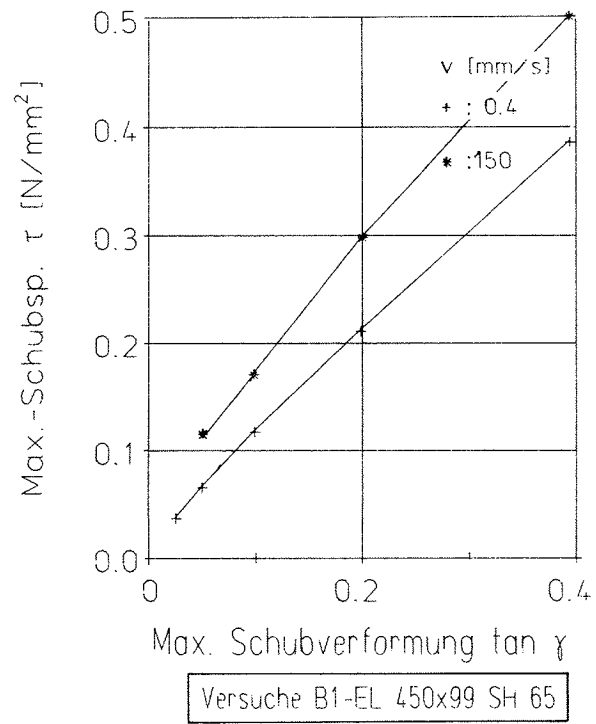
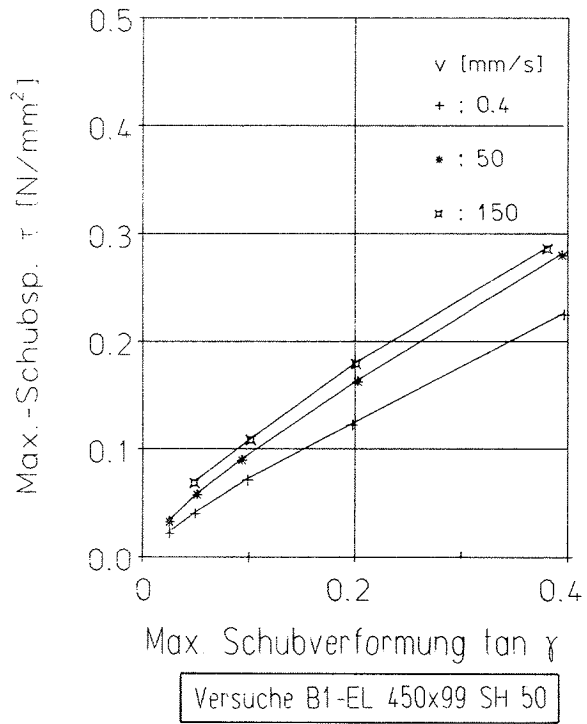


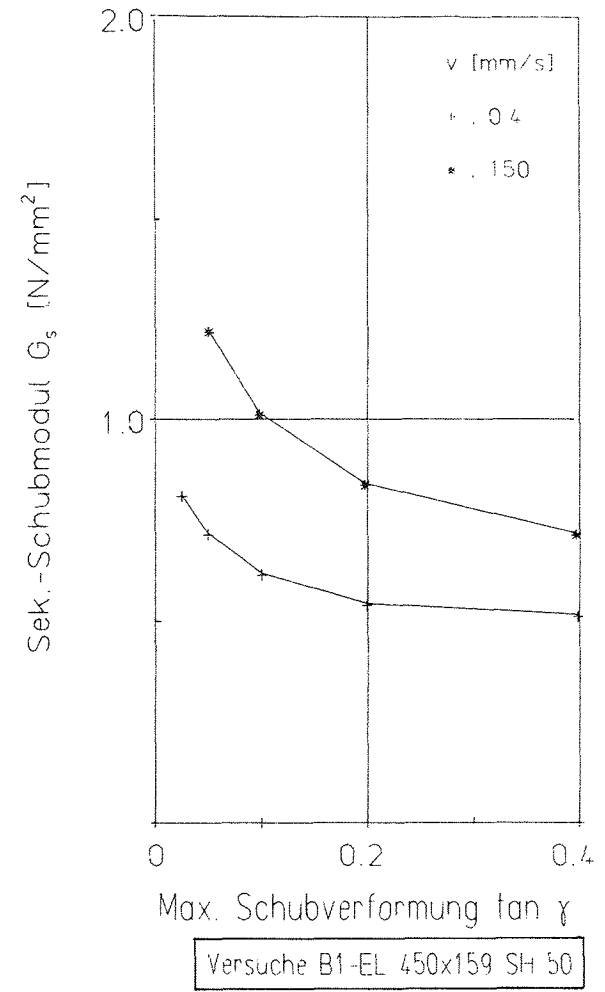
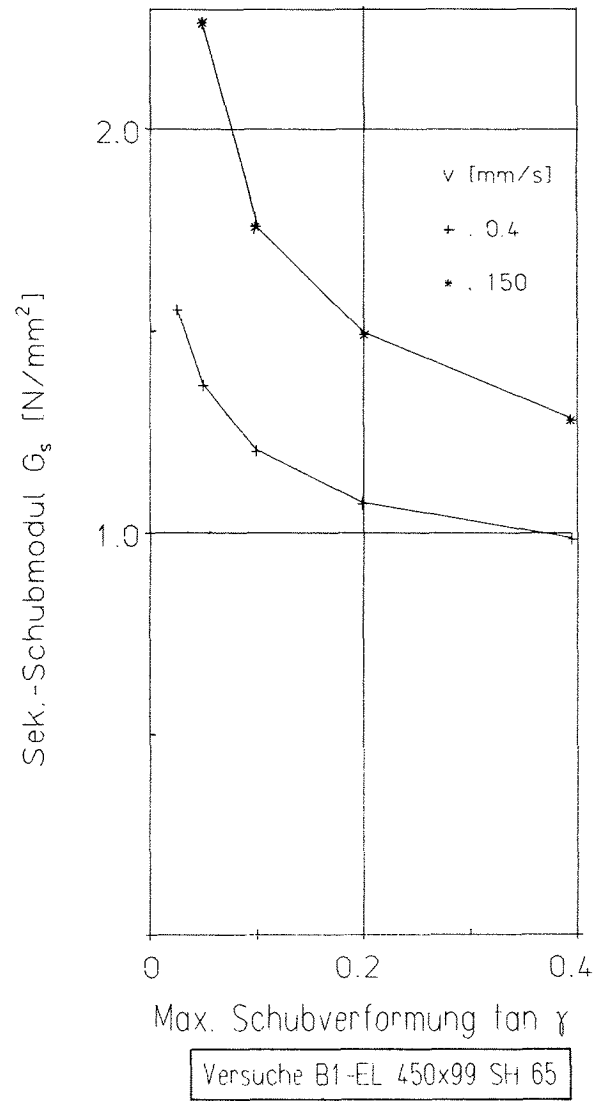
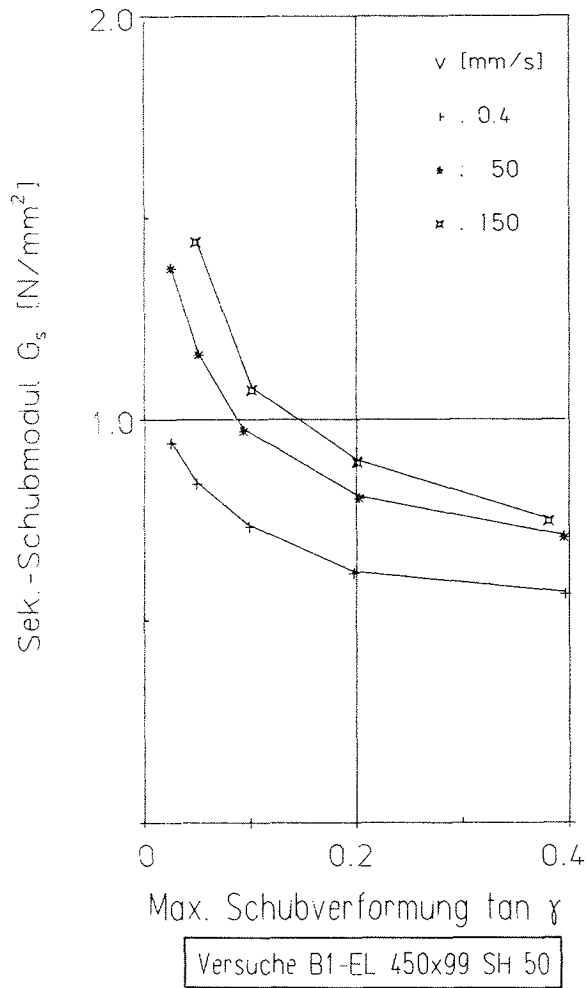
Schubspannung - Gleitwinkel - Diagramme für das Elastomerlager $\varnothing 450 \times 99 \text{ mm SH 65}$ bei Verschiebegeschwindigkeiten von $0,4 \text{ mm/s}$ und 150 mm/s und einem max. Gleitwinkel von $\max. \tan \gamma = \pm 0,4$

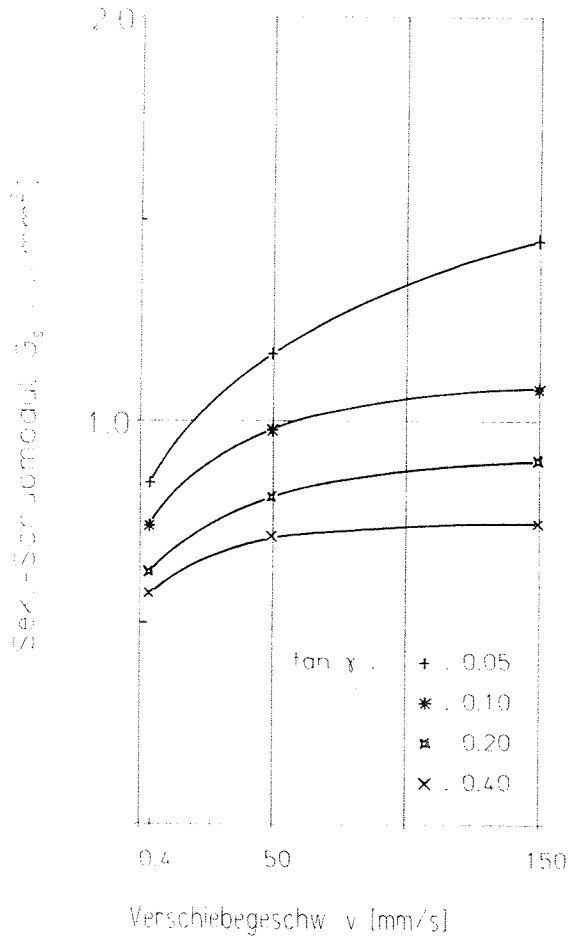
Versuchsreihe B1:

Schubversuche bei Raumtemperatur an bewehrten Elastomerlagern: Versuchsergebnisse

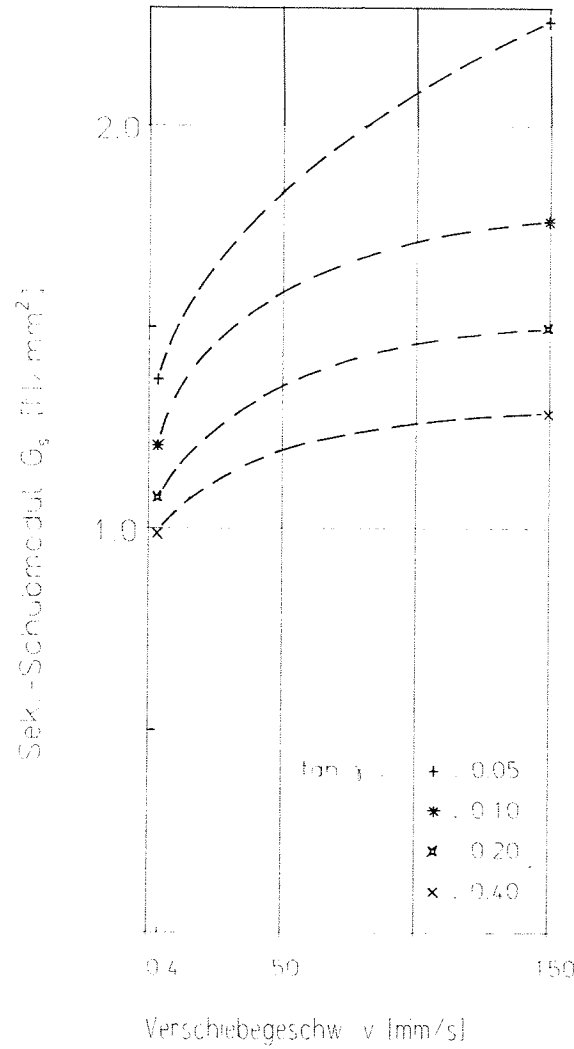
Lager	v [mm/s]	max tan γ	max τ [N/mm ²]	G _s [N/mm ²]
EL 450x99 SH50	0.4	0.025	0.023	0.946
		0.049	0.042	0.846
		0.099	0.073	0.739
		0.197	0.124	0.623
		0.396	0.226	0.571
	50	0.025	0.034	1.379
		0.051	0.059	1.165
		0.093	0.091	0.976
		0.203	0.164	0.810
150	0.394	0.281	0.713	
	0.049	0.071	1.444	
	0.102	0.110	1.078	
	0.201	0.181	0.899	
EL 450x99 SH65	0.4	0.381	0.287	0.754
		0.025	0.039	1.554
		0.049	0.067	1.368
		0.099	0.119	1.205
		0.198	0.213	1.073
	150	0.394	0.388	0.985
		0.051	0.115	2.208
		0.098	0.172	1.760
		0.200	0.299	1.494
EL 450x159 SH50	0.4	0.394	0.504	1.282
		0.025	0.019	0.814
		0.049	0.035	0.719
		0.099	0.062	0.618
		0.199	0.108	0.542
	150	0.398	0.205	0.514
		0.049	0.060	1.221
		0.098	0.099	1.015
		0.197	0.166	0.841
		0.396	0.284	0.717
Oberflächentemperatur : 22,5 - 23,5 °C				
Vertikalkraft F _v = 1473 kN (konstant) ; G _v = 9,26 N/mm ²				
Frequenz: f = v / (4 · max tan γ · T _N) ; G _s = max τ / max tan γ				



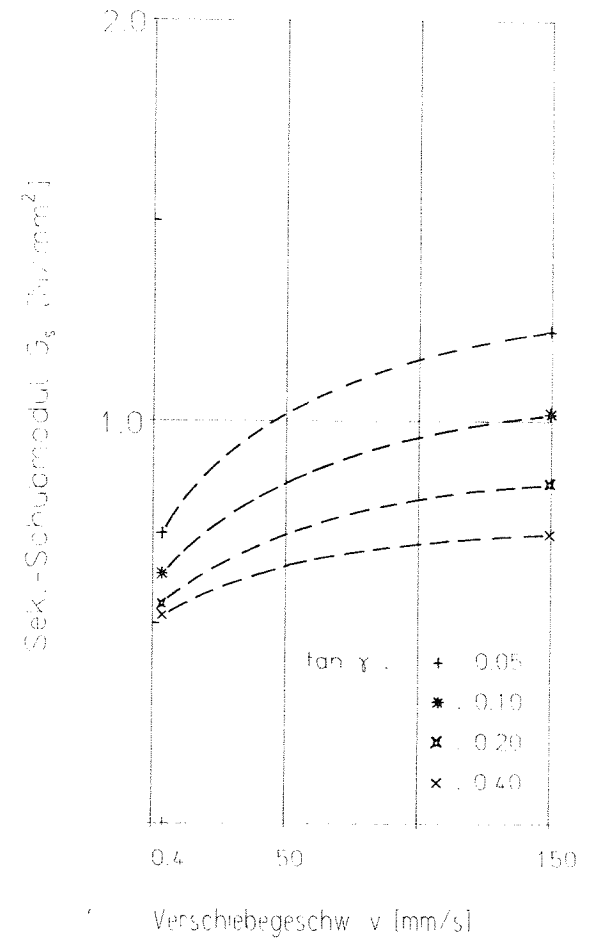




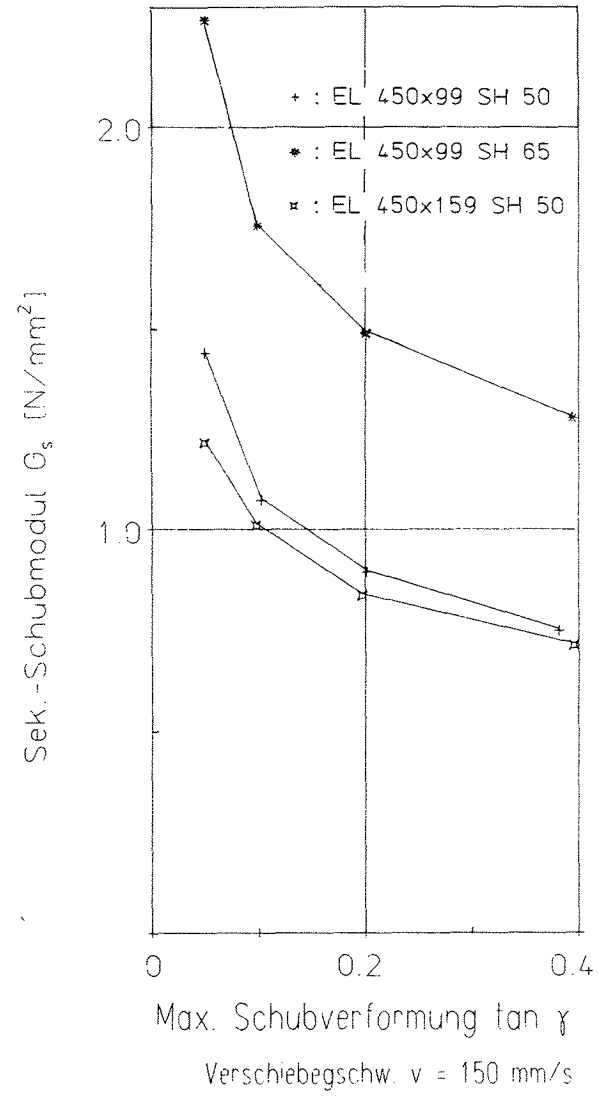
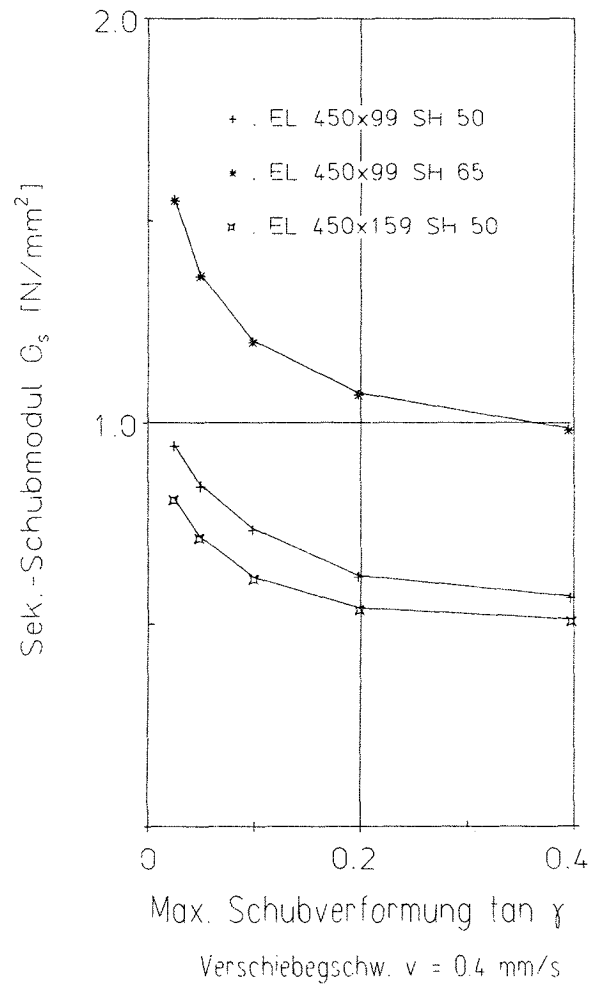
Versuche B1 - EL 450x99 SH50

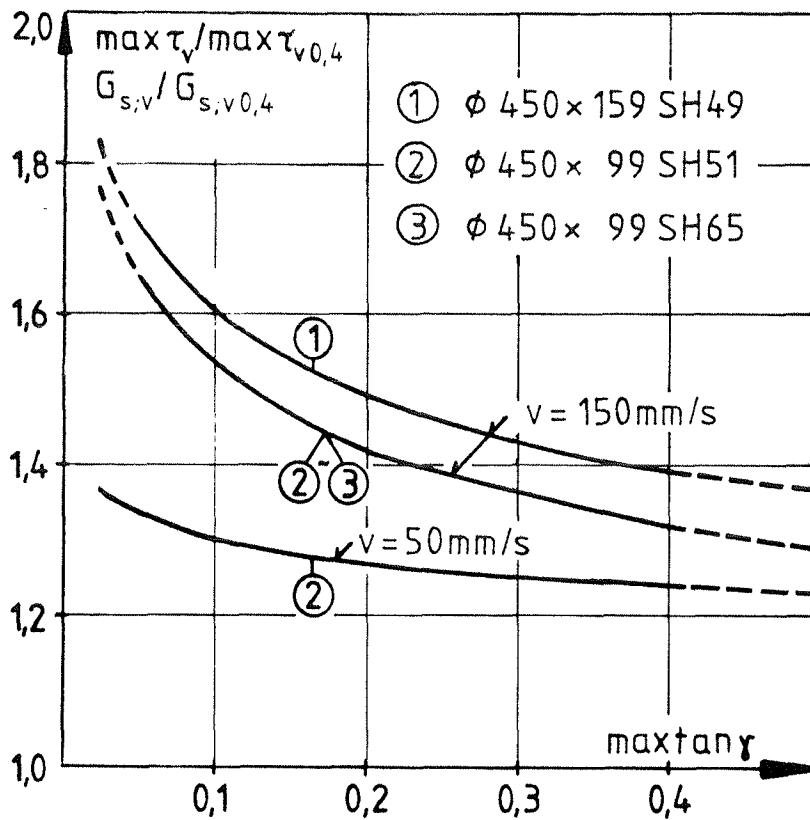


Versuche B1 - EL 450x99 SH65



Versuche B1 - EL 450x150 SH50





Schubversuche bei Raumtemperatur an bewehrten Elastomerlagern (Versuchsreihe B1):

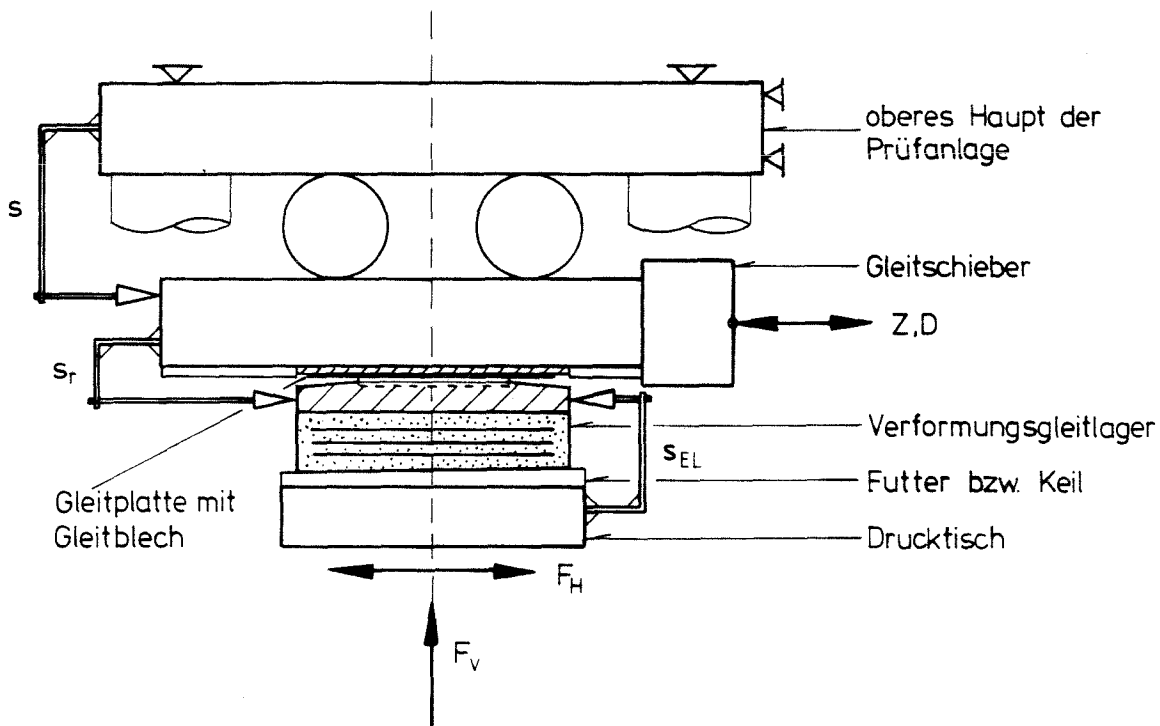
Erhöhungsfaktoren für den Sekantenschubmodul G_s bzw. für die Schubspannungen $\max \tau$ in Abhängigkeit von der Verschiebegeschwindigkeit v und dem max. Gleitwinkel $\tan \gamma$

Versuchsreihe B2: Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten, zentrisch belasteten Verformungsgleitlagern

Versuchsreihe B2

Kurzzeitversuche an geschmierten Verformungsgleitlagern (ohne Keil)
bei Raumtemperatur

Versuchsbezeichnung	v [mm/s]	f [1/s]
B2 - VGL 450x 99 SH50 V0,4 Nr. 1 Nr. 2* Nr. 3	0,4	$1,33 \cdot 10^{-3}$
B2 - VGL 450x 99 SH50 V 50 Nr. 1 Nr. 2 Nr. 3	50	0,167
B2 - VGL 450x 99 SH50 V150 Nr. 1 Nr. 2 Nr. 3	150	0,5
B2 - VGL 450x 99 SH50 V2000 Nr. 1 Nr. 2 Nr. 3	~ 2000	—
B2 - VGL 450x 99 SH65 V150 Nr. 1 Nr. 2 Nr. 3	150	0,5
B2 - VGL 450x159 SH50 V150 Nr. 1 Nr. 2 Nr. 3	150	0,5
Gleitpartner:	PTFE \varnothing 250x4,5 mm / aust. Stahl 2,5 mm Schmierung mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung	
Elastomerlager: (bewehrt)	\varnothing 450 mm; Einbauhöhe 99 mm bzw. 159 mm Shore-A-Härte \sim 50 bzw. 65; (Aufbau vgl. Anlage 91)	
Mittlere Pressung	PTFE : $p = 30 \text{ N/mm}^2$ Elastomerlager : $p = 9,26 \text{ N/mm}^2$	
Vorbelastungszeit	$t_v = 1 \text{ Stunde}$	
Gleitschieber	Verschiebeweg : $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$ Gesamtgleitweg : $S = 30 \text{ m}$ (Nr. 1, Nr. 2) $S = 100 \text{ m}$ (Nr. 3) Weg-Zeit-Funktion : linear ohne Leerlaufspiel trapezartig bei $v=2000 \text{ mm/s}$ Verschiebegeschwindigkeit: v Frequenz f	
Messungen	<ul style="list-style-type: none"> - Verschiebewiderstand $F_H(t)$ - Gleitschieberweg $s(t)$ - Elastomerverformung $\tan\gamma(t)$ - Relativbewegung zwischen Gleitschieber und Elastomerlager - Dicken- und Gewichtsänderung der PTFE-Ronden soweit mit vorh. Geräten meßbar - Temperatur T der Gleitplatte 	
*Der Versuch B2-VGL 450x99 SH50 V0,4 Nr. 2 wird als Dauerleitprogrammversuch bis ca. 2200 m Gesamtgleitweg weitergeführt (vgl. Anlage 145)		



Meßgrößen:

s = Gleitschieberweg

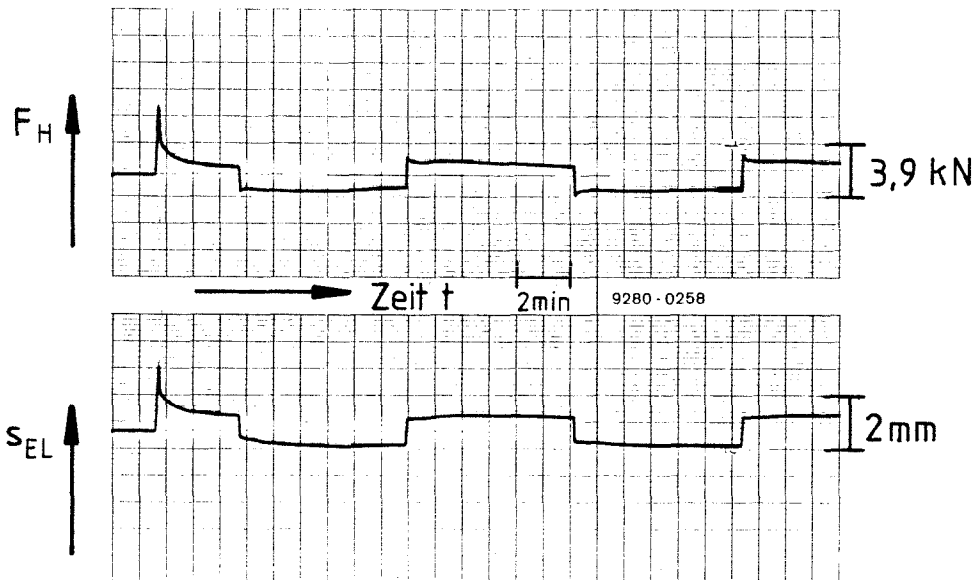
s_r = Relativverschiebung zwischen Gleitschieber und PTFE-Aufnahme
bzw. Elastomerlager

s_{EL} = Elastomerlagerverformung

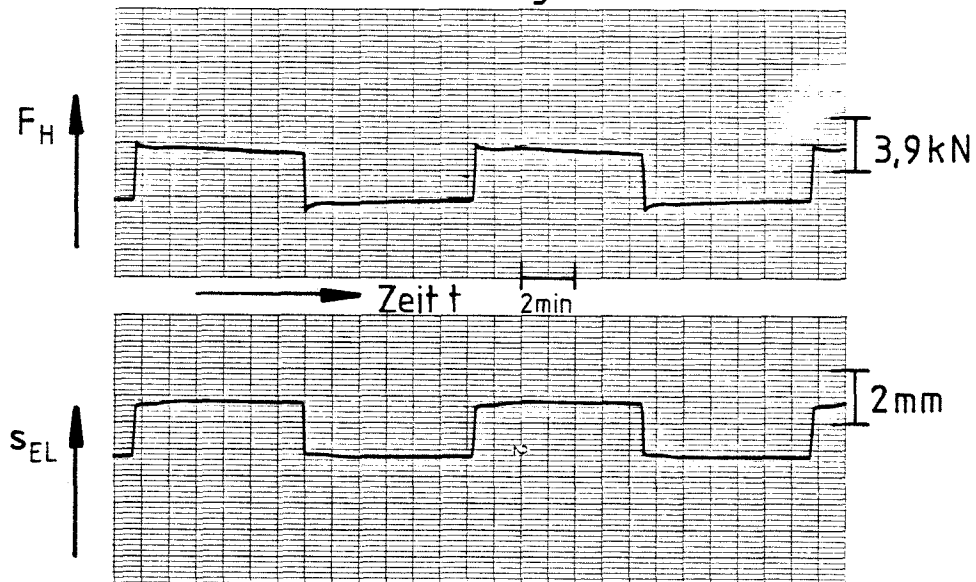
F_H = Verschiebewiderstandskraft

Versuchsanordnung (schematisch) und Meßgrößen-
bezeichnung für die Versuche mit Verformungsgleit-
lagern (Versuchsreihen B 2 und C)

Beim Anfahren



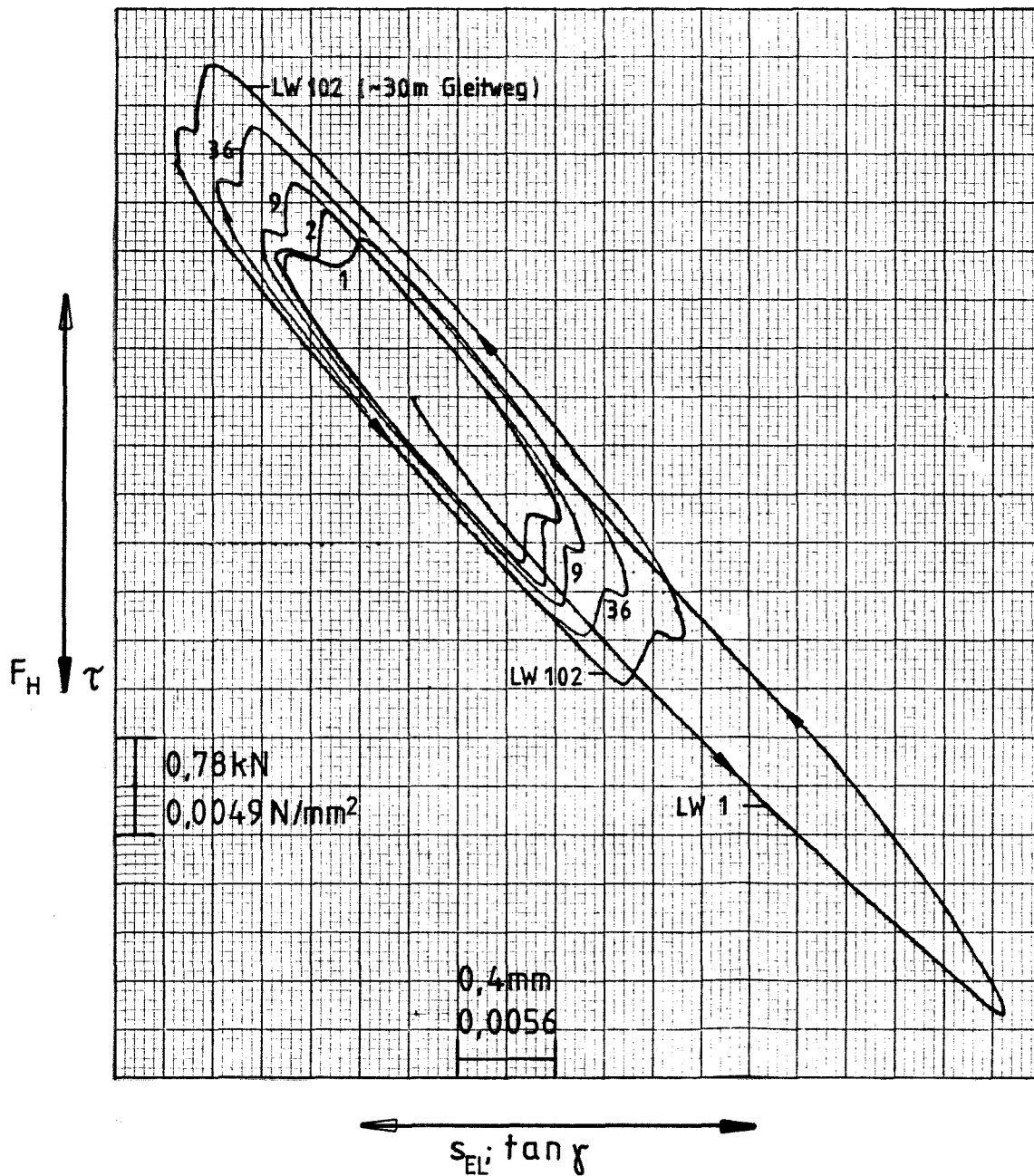
Nach ca. 30m Gleitweg



Versuch: B2 - VGL 450×99 SH50 V0,4 Nr.1

Versuchsreihe B: Versuche an Verformungsgleitlagern

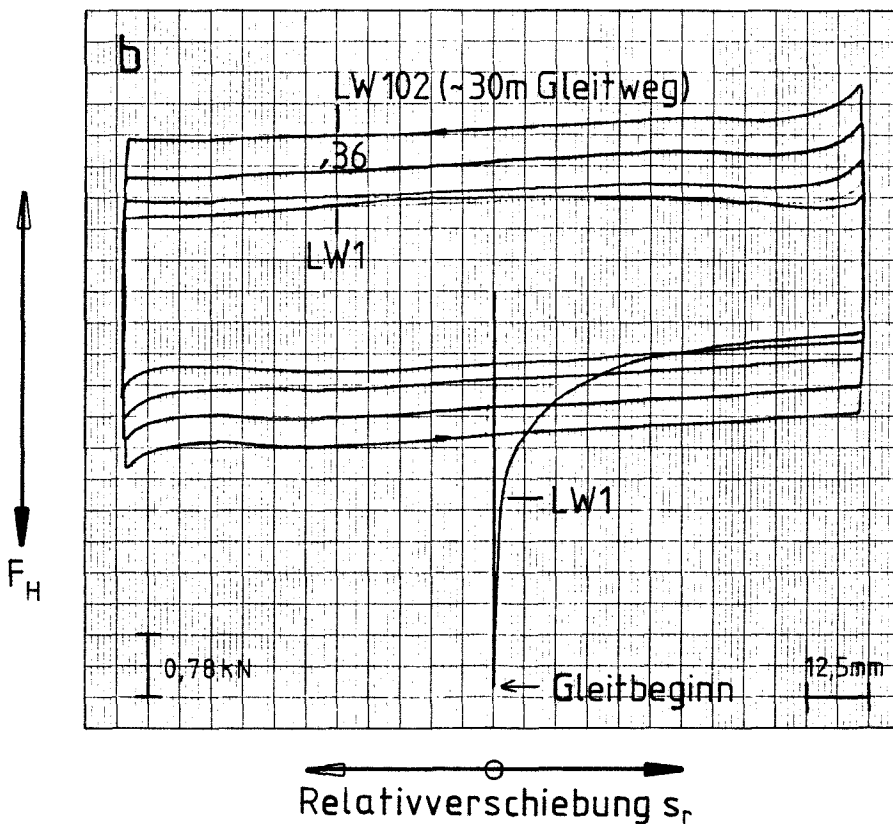
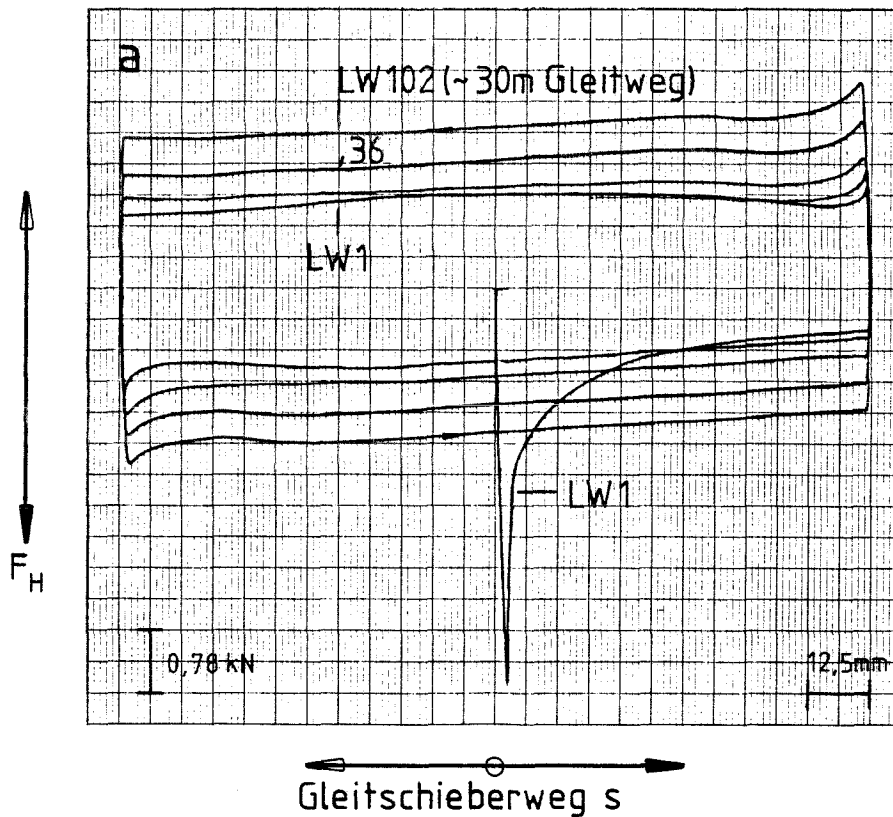
Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H und der Elastomerverformung s_{EL} bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von $v=0,4$ mm/s



Versuch: B2-VGL450x99SH50 V0,4 Nr.1

Versuchsreihe B2: Versuche an Verformungsgleitlagern
 Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramme zu verschiedenen Last-
 wechselln LW bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von
 $v=0,4 \text{ mm/s}$

Versuch: B2-VGL 450×99SH50 V0,4 Nr.1

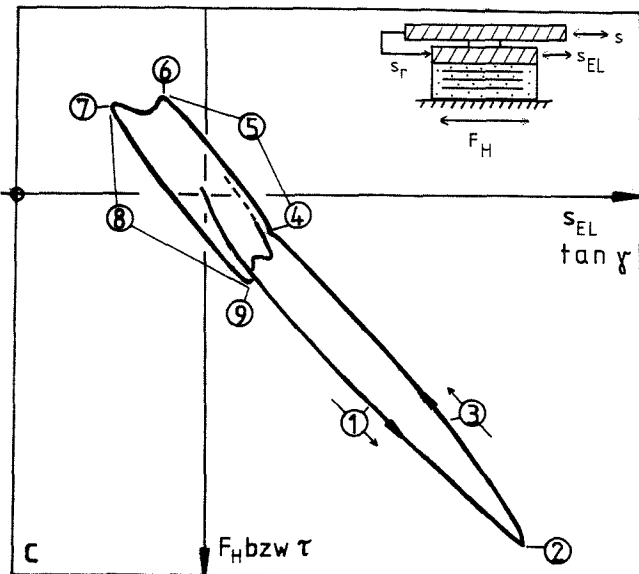
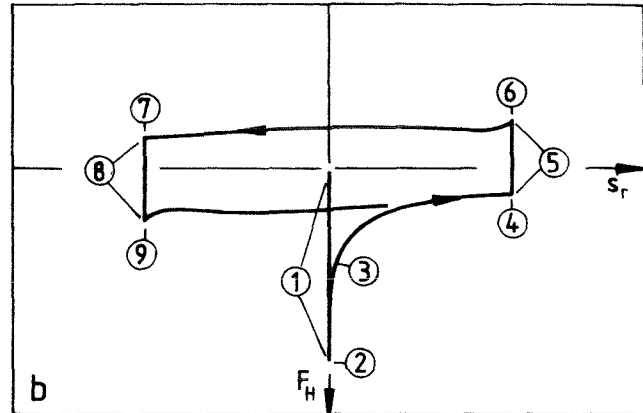
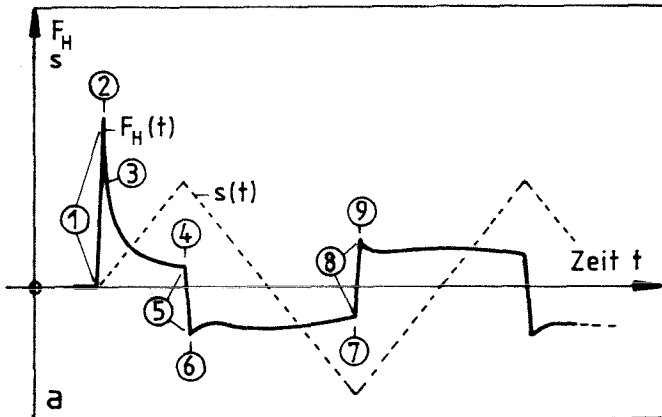
Versuchsreihe B2: Versuche an Verformungsgleitlagern

Verschiebewiderstand F_H bzw. Reibungskraft in der Gleitfuge in Abhängigkeit von

a) der Verschiebung s des Gleitschiebers (Gleitweg)

b) der Relativverschiebung s_r in der Gleitfuge

zu verschiedenen Lastwechseln LW bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von $v=0,4$ mm/s

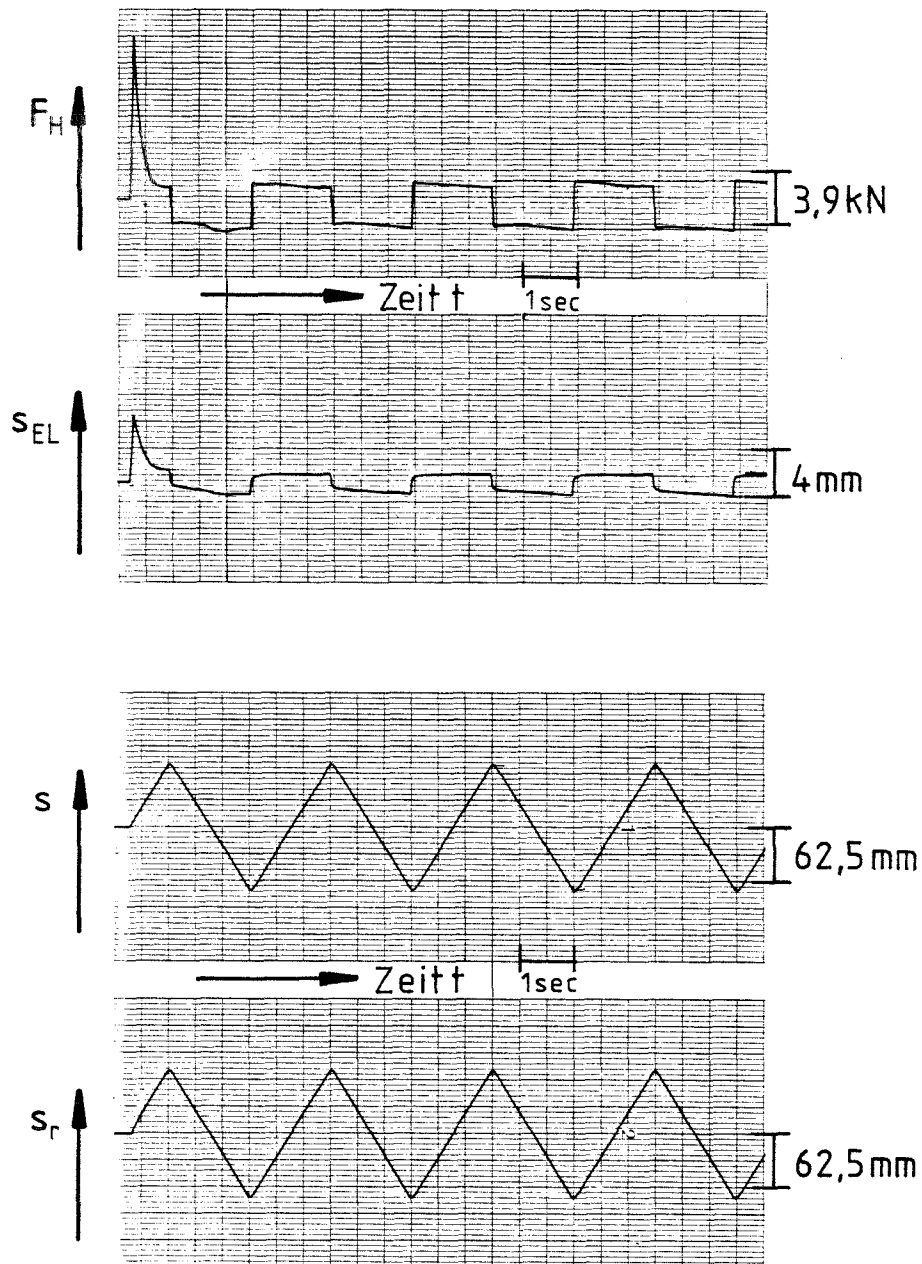


- ① Anfahrphase:
Verschiebung des Elastomerlagers mit der Gleitplatte ohne Relativverschiebung in der Gleitfuge
Haftreibung
- ② Ende der Haftphase bzw. Gleitbeginn nach Überschreiten der Haftreibung in der Gleitfuge
- ③ Rückfedern des Elastomerlagers entgegen der Gleitrichtung durch Abfall der Reibungskraft beim Gleiten
- ④ Ende der Gleitphase, Änderung der Bewegungsrichtung der Gleitplatte bzw. des Gleitschiebers
- ⑤ Haftphase: Mitnahme des Elastomerlagers durch die Gleitplatte ohne Relativverschiebung in der Gleitfuge
- ⑥ Ende der Haftphase bzw. Gleitbeginn; in der nachfolgenden Gleitphase geringe Zunahme der Elastomerlagerverformung in Bewegungsrichtung der Gleitplatte
- ⑦ Ende der Gleitphase, Änderung der Bewegungsrichtung der Gleitplatte
- ⑧ Haftphase (analog 5)
- ⑨ Ende der Haftphase bzw. Gleitbeginn (analog 6)

Versuchsreihe B2:

Verhalten der Verformungsgleitlager beim Anfahren mit einer Verschiebegeschwindigkeit von $v=0,4 \text{ mm/s}$ (schematisch)

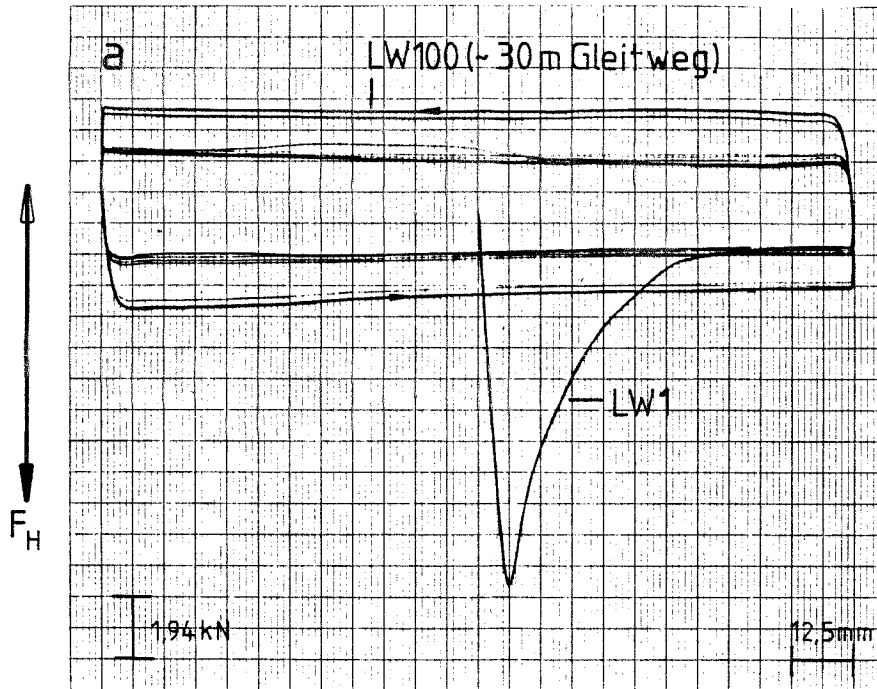
- a) Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H und des Gleitschieberweges s
- b) Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von der Relativverschiebung s_r in der Gleitfuge
- c) Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von der Elastomerverformung
(Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramm)



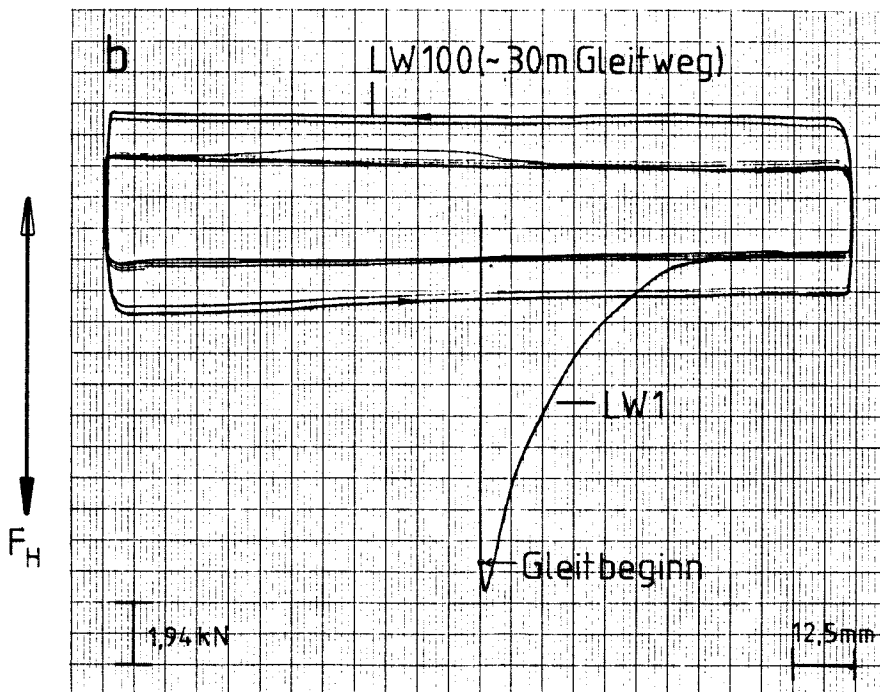
Versuch: B2 - VGL 450x99SH50 V50 Nr.2

Versuchsreihe B2: Versuche an Verformungsgleitlagern
 Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H , der Elastomerverformung s_{EL} , des Gleitschieberweges s und der Relativverschiebung s_r bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von $v=50$ mm/s

Versuch: B2-VGL450×99SH50 V50 Nr.2



Gleitschieberweg s



Relativverschiebung s_r

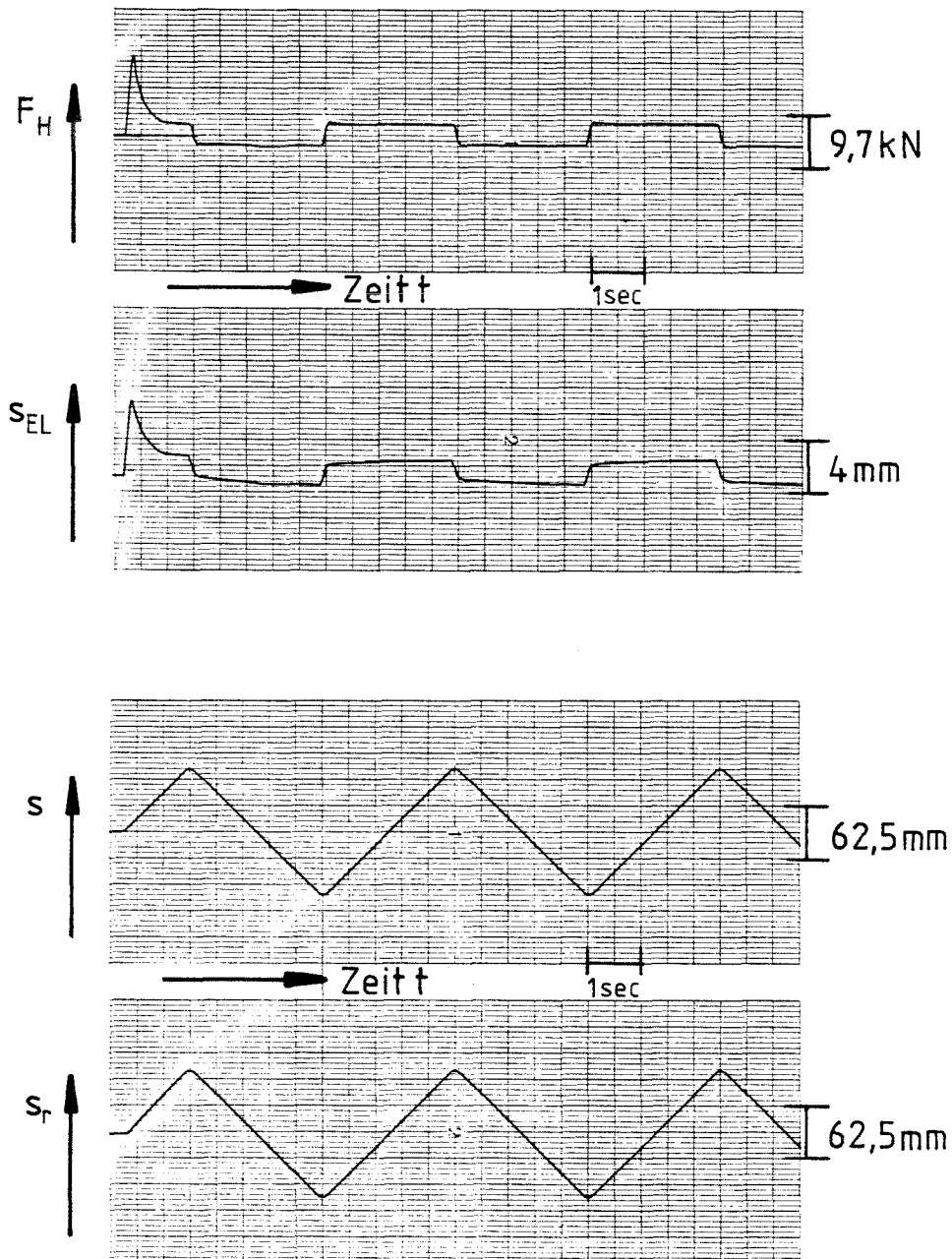
Versuchsreihe B2: Versuche an Verformungsgleitlagern

Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von

a) der Verschiebung s des Gleitschiebers

b) der Relativverschiebung s_r in der Gleitfuge

zu Versuchsbeginn und nach ca. 30 m Gesamtgleitweg bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von $v=50$ mm/s

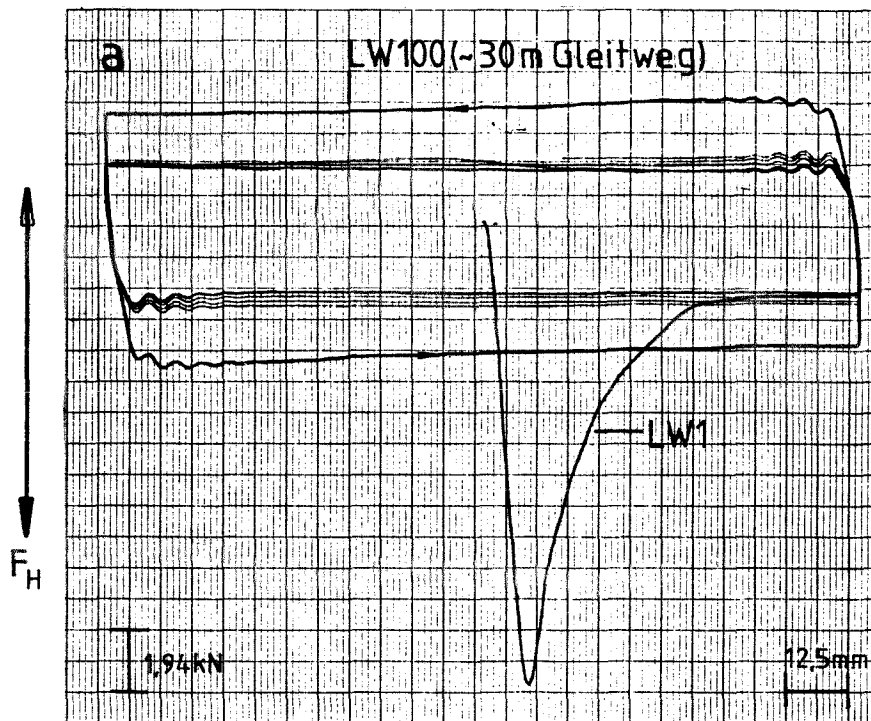


Versuch: B2-VGL450x99SH50 V150 Nr.2

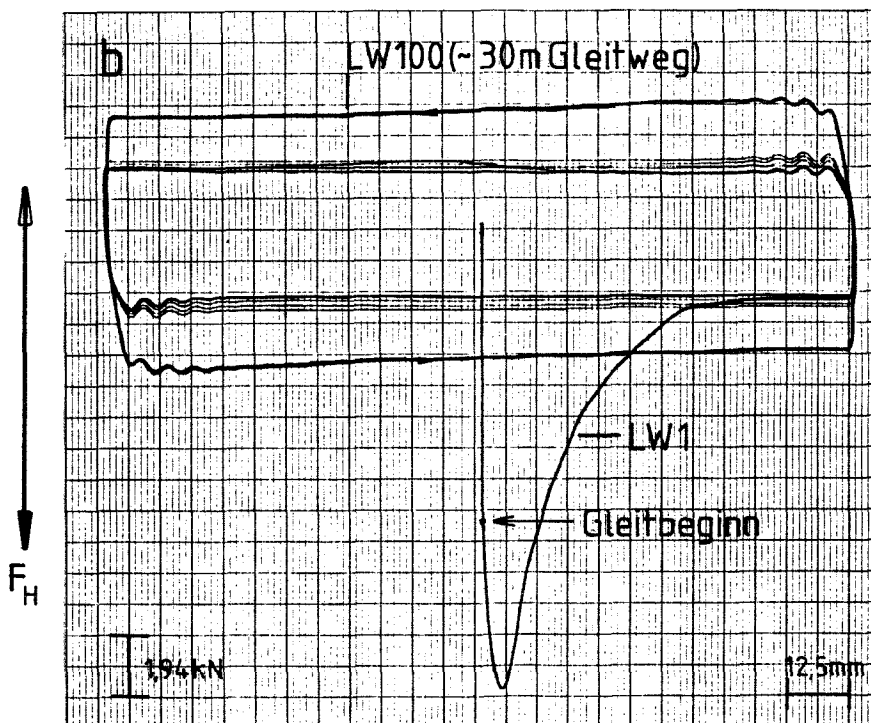
Versuchsreihe B2: Versuche an Verformungsgleitlagern

Zeitlicher Verlauf des Verschiebewiderstandes F_H , der Elastomerverformung s_{EL} , des Gleitschieberweges s und der Relativverschiebung s_r bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von $v=150$ mm/s

Versuch: B2-VGL450x99SH50 V150 Nr.2



← ○ →
Gleitschieberweg s



← ○ →
Relativverschiebung s_r

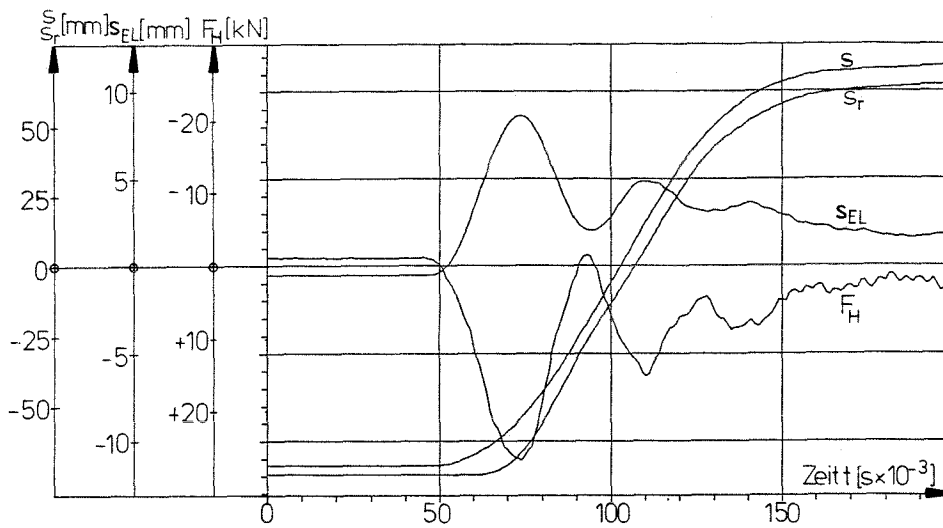
Versuchsreihe B2: Versuche an Verformungsgleitlagern

Verschleibewiderstand F_H in Abhängigkeit von

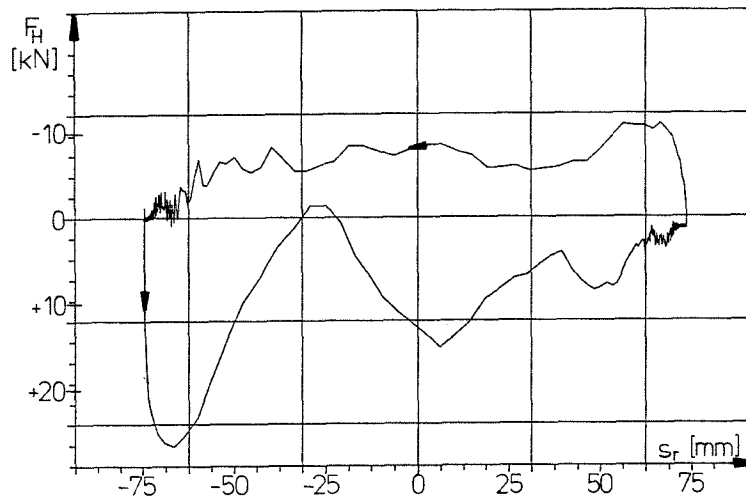
a) der Verschiebung s des Gleitschiebers

b) der Relativverschiebung s_r in der Gleitfuge

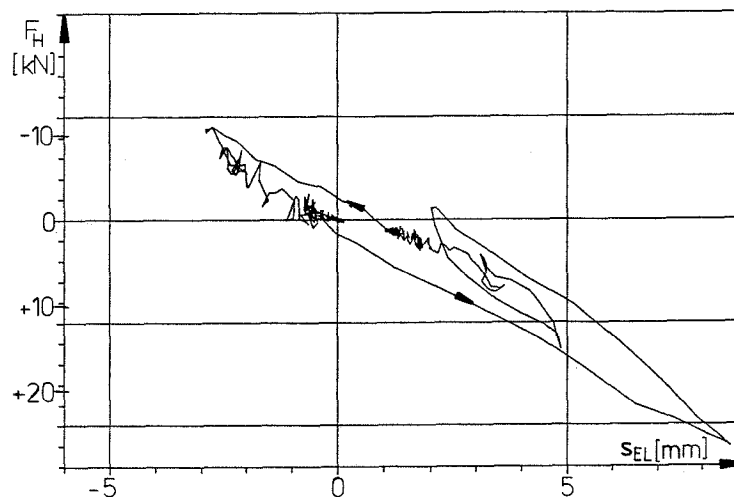
zu Versuchsbeginn und nach ca. 30 m Gesamtgleitweg bei einer Gleitschiebergeschwindigkeit von $v = 150 \text{ mm/s}$



a



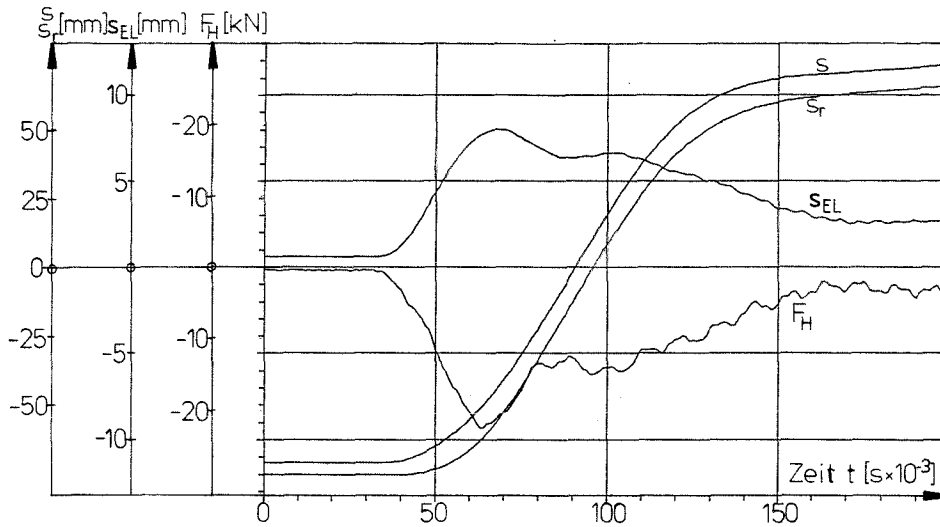
b



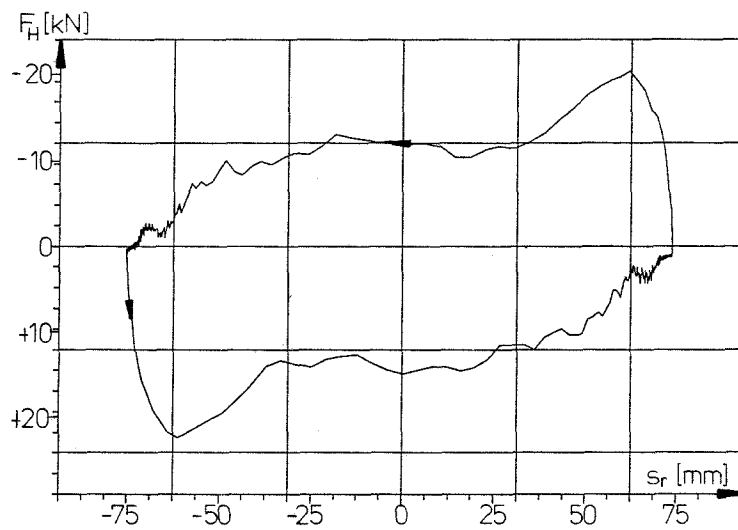
c

Versuch B2 - VGL 450 x 99 SH 50 V 2000 Nr.1 (erster Hub)

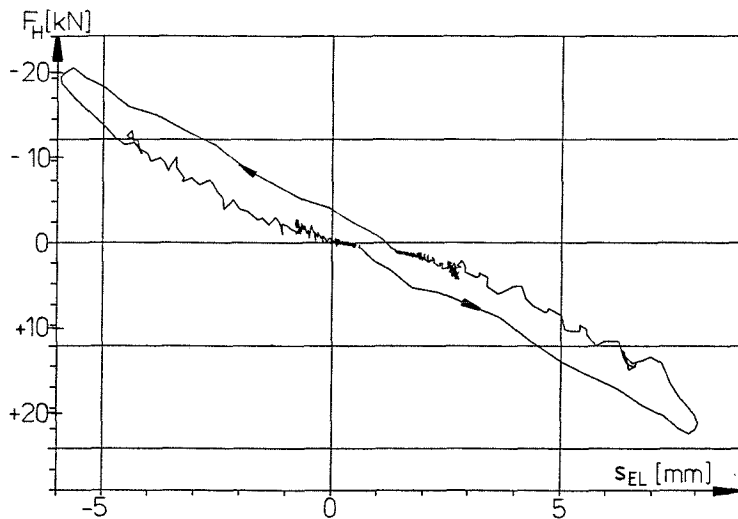
- a) Zeitlicher Verlauf der Meßgrößen F_H , s , s_r , s_{EL}
 - b) Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von der Relativverschiebung s_r zwischen Gleitschieber und PTFE-Aufnahme bzw. Elastomerlager
 - c) Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von der Elastomerverformung s_{EL}
- Mittlere Pressung: PTFE: $p = 30 \text{ N/mm}^2$, Elastomer: $p = 9,26 \text{ N/mm}^2$



a



b

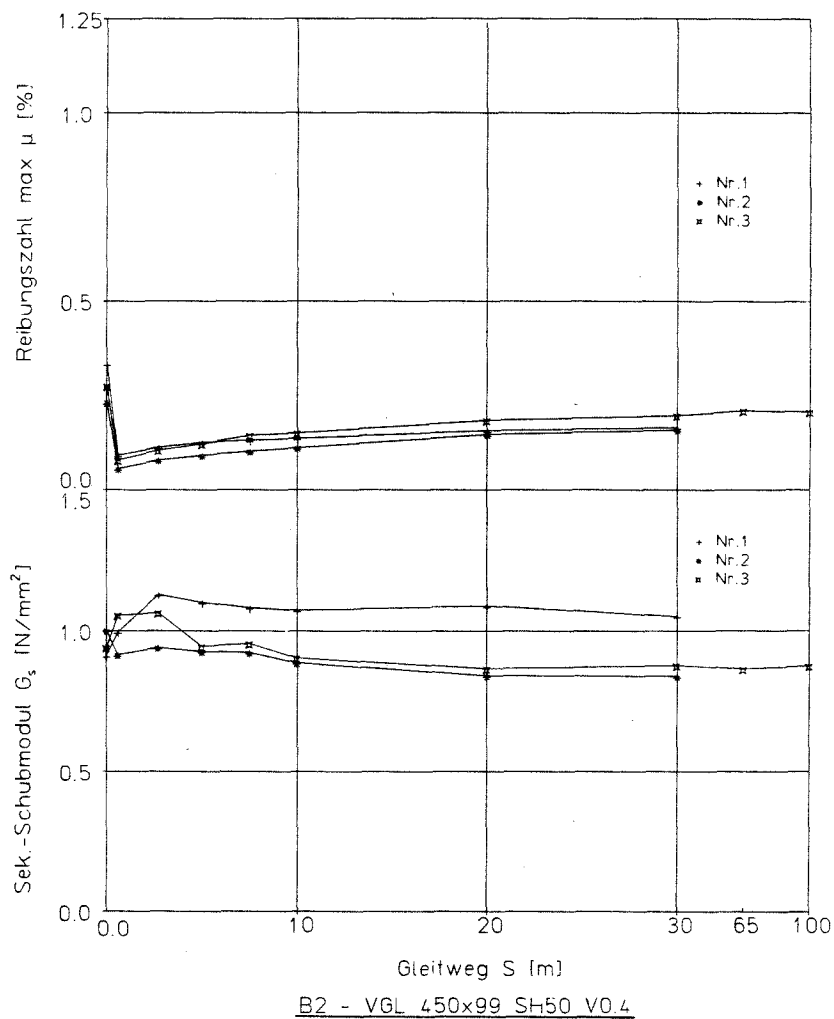
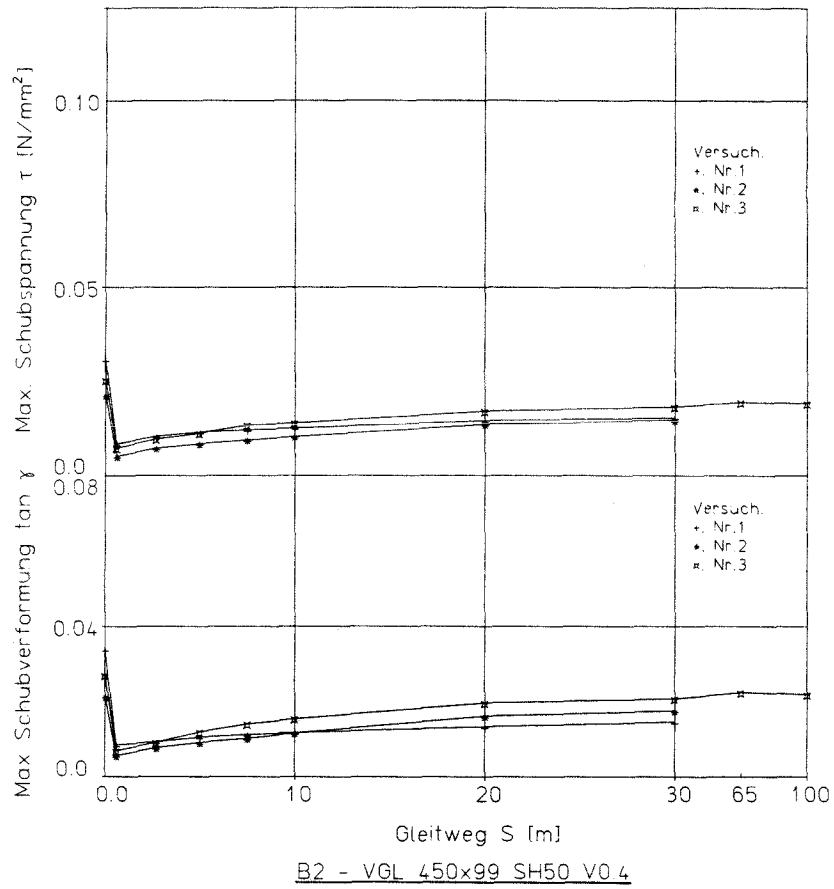


c

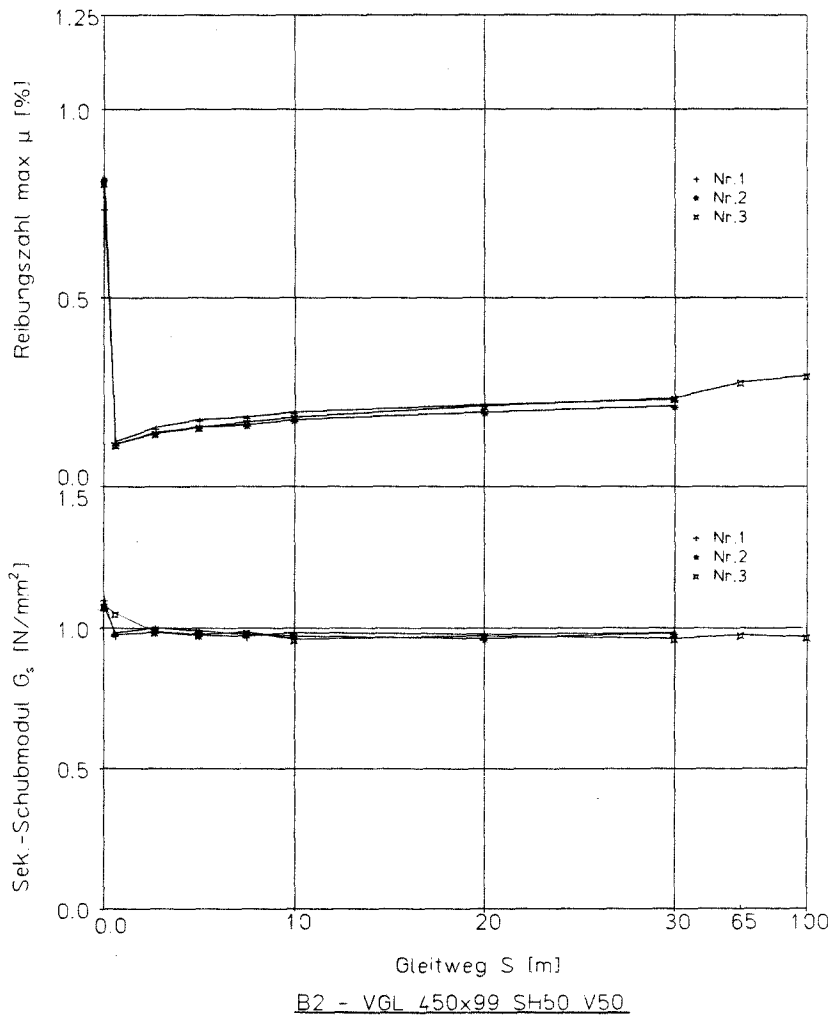
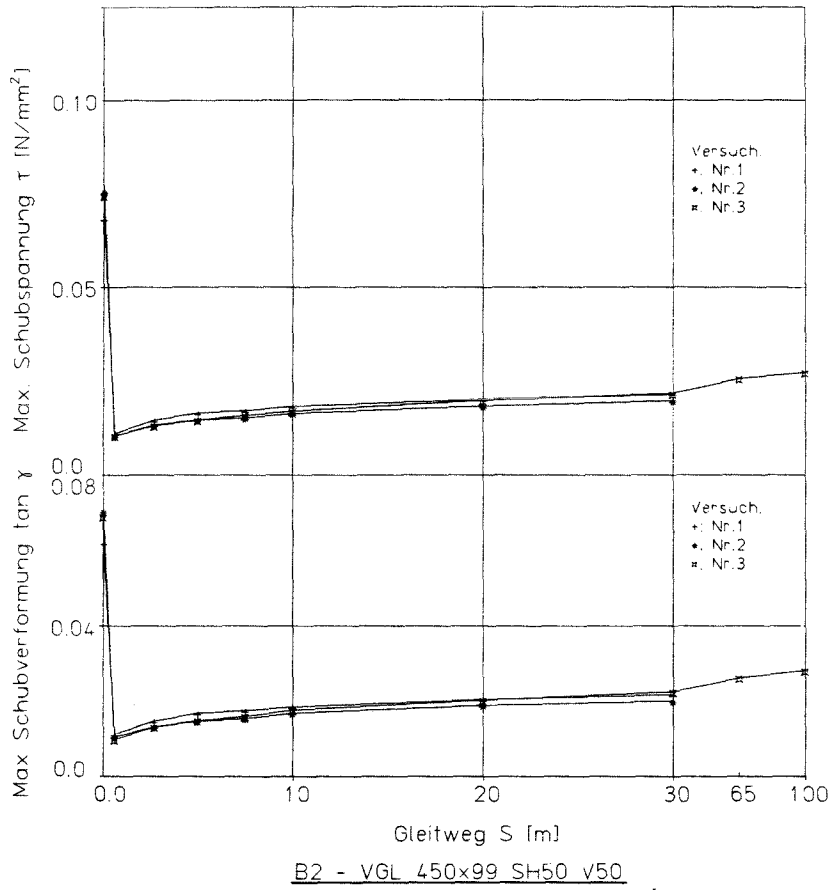
Versuch B2 - VGL 450 x 99 SH 50 V2000 Nr.1 (letzter Hub, Gleitweg ca 30 m)

- a) Zeitlicher Verlauf der Meßgrößen F_H , s , s_r , s_{EL}
 - b) Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von der Relativverschiebung s_r zwischen Gleitschieber und PTFE-Aufnahme bzw. Elastomerlager
 - c) Verschiebewiderstand F_H in Abhängigkeit von der Elastomerverformung s_{EL}
- Mittlere Pressung: PTFE: $p = 30 \text{ N/mm}^2$, Elastomer: $p = 9,26 \text{ N/mm}^2$

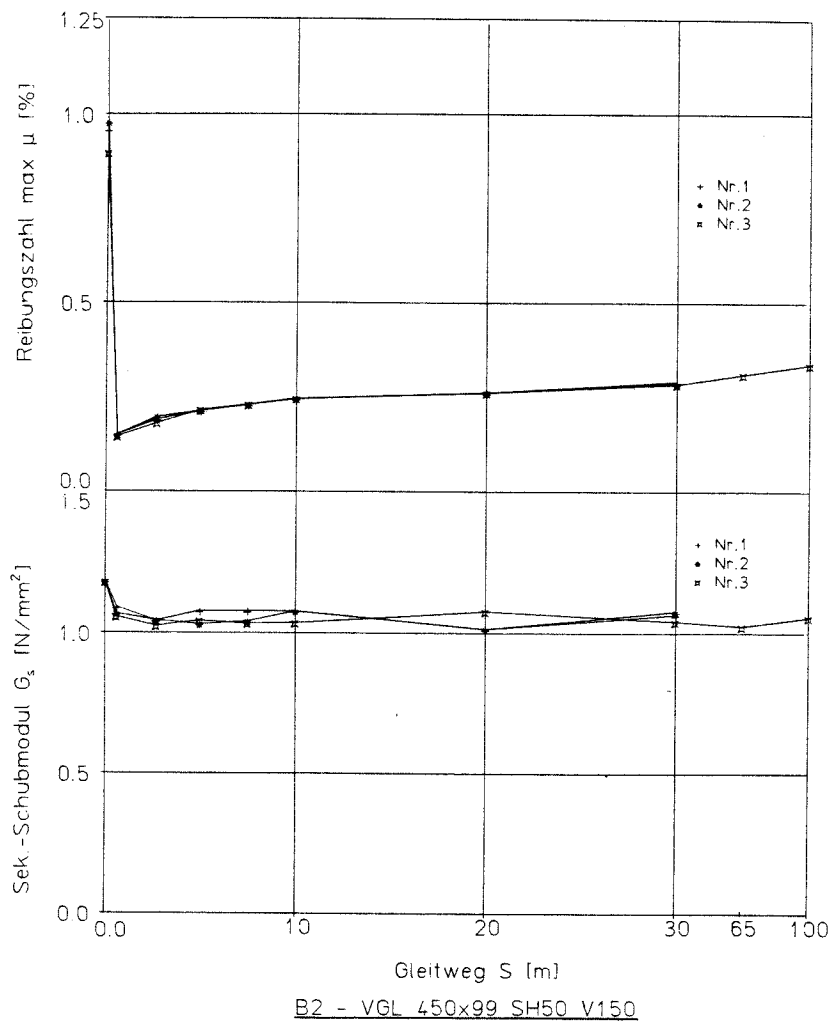
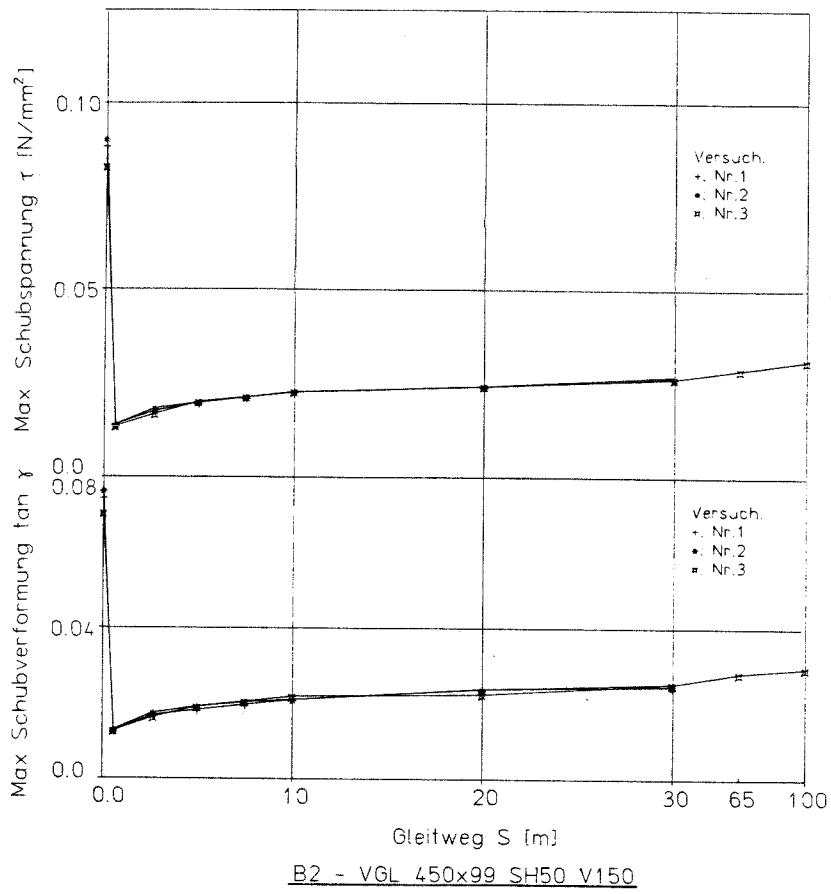
Versuch	B2 - VGL 450x99 SH50 V0.4						
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G_s [N/mm ²]	v_{EL} [mm/s]	T [°C]
1	0	0.33	0.031	0.034	0.91	0,4	23,3
	$3s_0$	0.09	0.008	0.008	1.00		
	2.7	0.11	0.011	0.009	1.13		
	5	0.13	0.012	0.011	1.10		
	7.5	0.13	0.012	0.011	1.08		
	10	0.14	0.013	0.012	1.07		
	20	0.16	0.015	0.013	1.09		
	30	0.17	0.015	0.015	1.05	0,4	23,3
2	0	0.23	0.021	0.021	1.00	0,4	23,9
	$3s_0$	0.06	0.005	0.006	0.92		
	2.7	0.08	0.007	0.008	0.94		
	5	0.09	0.008	0.009	0.93		
	7.5	0.10	0.009	0.010	0.92		
	10	0.11	0.010	0.012	0.89		
	20	0.15	0.014	0.016	0.84		
	30	0.16	0.015	0.018	0.84	0,4	23,0
3	0	0.27	0.025	0.027	0.94	0,4	25,4
	$3s_0$	0.08	0.007	0.007	1.06		
	2.7	0.11	0.010	0.009	1.06		
	5	0.12	0.011	0.012	0.95		
	7.5	0.15	0.013	0.014	0.96		
	10	0.15	0.014	0.015	0.91		
	20	0.18	0.017	0.020	0.87		
	30	0.20	0.018	0.021	0.88		
	65	0.21	0.019	0.023	0.87	0,4	23,5
100	0.21	0.019	0.022	0.88			
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager: Φ 450x 99. mm; Shore - A = 50.; $T_N = 71$. mm; $p = 9.26$ N/mm ²							
PTFE : Φ 250x 4.5 mm; $p = 30$ N/mm ²							
Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber : Geschwindigkeit $v = 0.4$ mm/s							
Verschiebeweg $s_0 = \pm 75$ mm; Frequenz = 0.00133 1/s							
S = Gleitweg des Gleitschiebers				$G_s = \max \tau / \max(\tan \gamma) = Se -$			
max $\mu = \max.$ Reibungszahl zwischen				kantenschubmodul			
PTFE und aust. Stahl				$v_{EL} = \max.$ Verschiebe- geschw. des			
max $\tau = \max.$ Schubspannung				Elastomers bei Bewegungsumkehr			
des Elastomerlagers				T = Temperatur der Gleitplatte			
max (tan γ) = max. Schubverformung							
des Elastomerlagers							



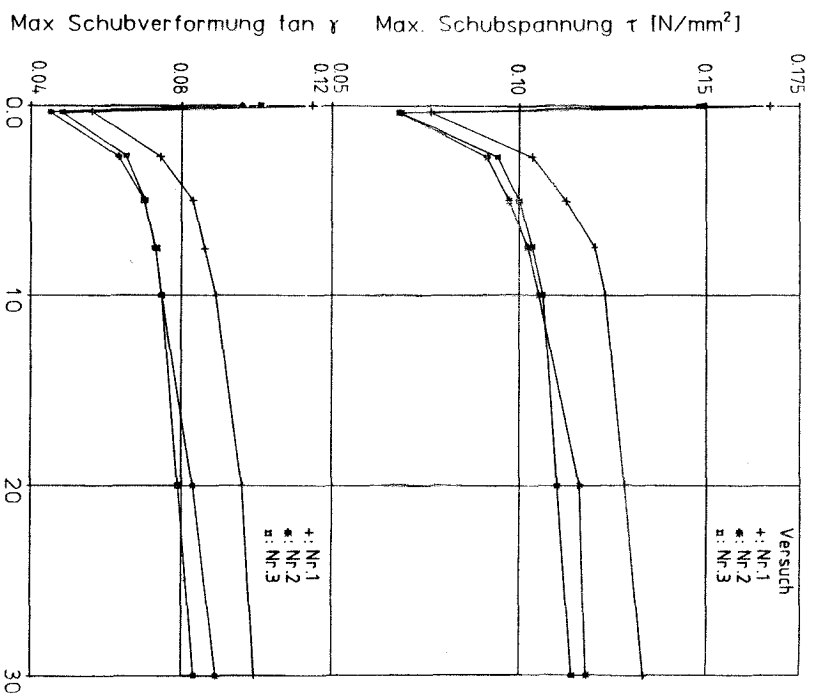
Versuch	B2 - VGL 450x99 SH50 V50						
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G_s [N/mm ²]	v_{EL} [mm/s]	T [°C]
1	0	0.74	0.068	0.062	1.10	~43	27,0
	3s ₀	0.12	0.011	0.011	0.98		
	2.7	0.16	0.015	0.015	0.99		
	5	0.18	0.016	0.017	0.97	~22	
	7.5	0.18	0.017	0.018	0.97		28,4
	10	0.20	0.018	0.019	0.98		
	20	0.22	0.020	0.021	0.98		
	30	0.23	0.021	0.022	0.98	25	
2	0	0.82	0.076	0.070	1.07	~45	27,3
	3s ₀	0.11	0.010	0.011	0.98		
	2.7	0.14	0.013	0.013	1.00		
	5	0.16	0.015	0.015	0.99	~20	
	7.5	0.16	0.015	0.015	0.98		28,7
	10	0.18	0.016	0.017	0.97		
	20	0.20	0.018	0.019	0.96		
	30	0.21	0.020	0.020	0.98	~26	
3	0	0.80	0.075	0.069	1.08	~47	27,6
	3s ₀	0.11	0.010	0.010	1.05		
	2.7	0.14	0.013	0.013	0.99		
	5	0.16	0.015	0.015	0.98	~24	
	7.5	0.17	0.016	0.016	0.99		30,4
	10	0.18	0.017	0.018	0.96		
	20	0.21	0.020	0.020	0.97		
	30	0.23	0.022	0.023	0.96	~28	
65	0.28	0.026	0.026	0.98			
100	0.29	0.027	0.028	0.97	~33		
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager: Φ 450x 99. mm; Shore - A = 50.; T _N = 71. mm; p = 9.26 N/mm ² PTFE : Φ 250x 4.5 mm; p = 30 N/mm ² Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber : Geschwindigkeit v = 50.0 mm/s Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm; Frequenz = 0.167 1/s							
S = Gleitweg des Gleitschiebers max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers				G_s = max τ /max(tan γ) = Se - kantenschubmodul v_{EL} = max. Verschiebe-geschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr T = Temperatur der Gleitplatte			



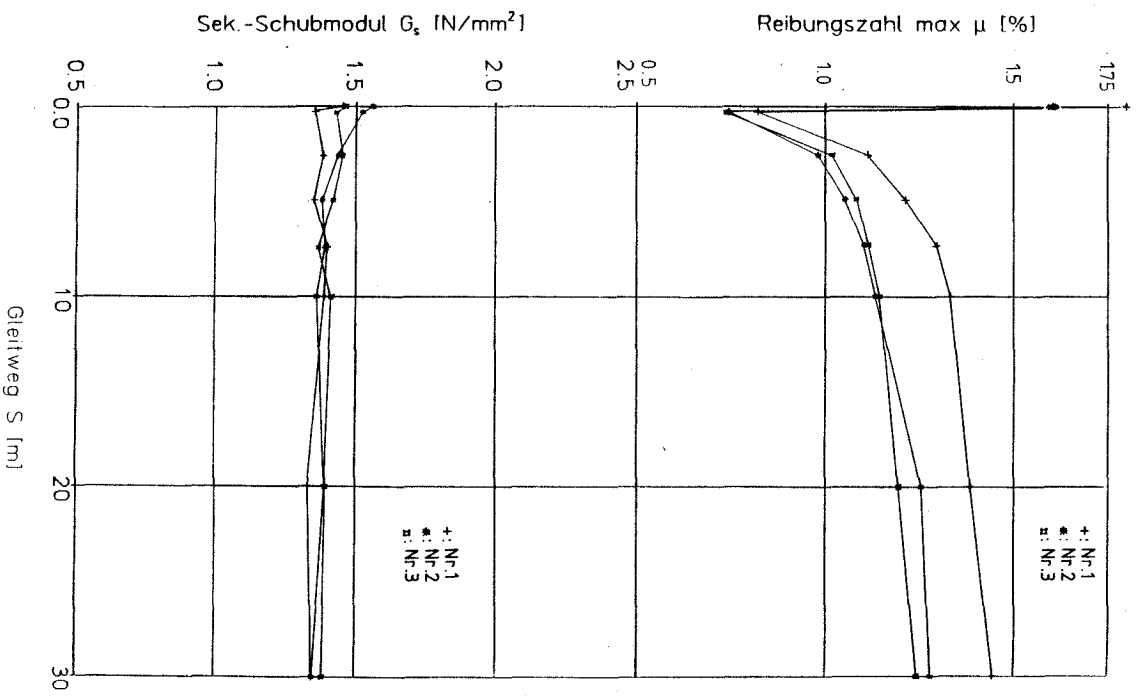
Versuch		B2 - VGL 450x99 SH50 V150					
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G _s [N/mm ²]	v _{EL} [mm/s]	T [°C]
1	0	0.96	0.089	0.075	1.19	~120	26,8
	3s ₀	0.15	0.014	0.013	1.09		
	2.7	0.19	0.018	0.017	1.04		
	5	0.21	0.020	0.018	1.08	~45	
	7.5	0.23	0.021	0.020	1.08		
	10	0.25	0.023	0.021	1.08	~47	
	20	0.26	0.024	0.024	1.01		
	30	0.29	0.027	0.025	1.07	~56	
2	0	0.98	0.091	0.077	1.18	~120	27,2
	3s ₀	0.15	0.014	0.013	1.07		
	2.7	0.20	0.018	0.017	1.04		
	5	0.21	0.020	0.019	1.03	~45	
	7.5	0.23	0.021	0.020	1.04		
	10	0.25	0.023	0.021	1.08	~47	
	20	0.26	0.024	0.024	1.01		
	30	0.29	0.027	0.025	1.08	~54	
3	0	0.90	0.083	0.070	1.18	~115	27,4
	3s ₀	0.14	0.013	0.013	1.06		
	2.7	0.18	0.017	0.016	1.02		
	5	0.22	0.020	0.019	1.04	~46	
	7.5	0.23	0.021	0.021	1.03		
	10	0.25	0.023	0.022	1.04		
	20	0.26	0.024	0.023	1.08		
	30	0.29	0.026	0.025	1.04	~57	
	65	0.31	0.029	0.028	1.02		
100	0.34	0.031	0.030	1.06	~59		
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager: Φ 450x 99. mm; Shore - A = 50; T _N = 71. mm; ρ = 9.26 N/mm ²							
PTFE : Φ 250x 4.5 mm; ρ = 30 N/mm ²							
Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber : Geschwindigkeit v = 150.0 mm/s							
Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm; Frequenz = 0.5 1/s							
S = Gleitweg des Gleitschiebers				G _s = max τ /max(tan γ) = Se -			
max μ = max. Reibungszahl zwischen				kantenschubmodul			
PTFE und aust. Stahl				v _{EL} = max. Verschiebegeschw. des			
max τ = max. Schubspannung				Elastomers bei Bewegungsumkehr			
des Elastomerlagers				T = Temperatur der Gleitplatte			
max (tan γ) = max. Schubverformung							
des Elastomerlagers							



Versuch	B2 - VGL 450x99 SH50 V 2000						
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G _s [N/mm ²]	v _{EL} [mm/s]	T [°C]
1	0	1,80	0,167	0,115	1,45	~550	18,7
	0,3	0,82	0,076	0,056	1,35	~295	
	2,7	1,11	0,103	0,0746	1,38		
	5	1,21	0,112	0,083	1,35	~290	
	7,5	1,29	0,120	0,086	1,40		
	10	1,33	0,123	0,089	1,39	~320	
	20	1,38	0,128	0,096	1,33		
	30	1,44	0,133	0,099	1,35	~325	23,8
2	0	1,61	0,149	0,096	1,56	~520	19,5
	0,3	0,74	0,068	0,045	1,52	~250	
	2,7	0,98	0,091	0,063	1,44		
	5	1,05	0,097	0,070	1,38	~230	
	7,5	1,10	0,102	0,073	1,39		
	10	1,13	0,105	0,075	1,36	~280	
	20	1,25	0,116	0,083	1,39		
	30	1,28	0,118	0,089	1,35	~300	24,4
3	0	1,60	0,148	0,101	1,46	~500	19,7
	0,3	0,74	0,068	0,048	1,43	~250	
	2,7	1,02	0,094	0,065	1,45		
	5	1,08	0,100	0,070	1,42	~230	
	7,5	1,11	0,103	0,073	1,37		
	10	1,14	0,106	0,075	1,41		
	20	1,19	0,110	0,079	1,39	~275	
	30	1,24	0,114	0,083	1,38	~295	
	65	1,33	0,123	0,092	1,35		
100	1,41	0,131	0,099	1,33	~325	29,5	
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager: ϕ 450x 99. mm; Shore - A = 50.; T _N = 71. mm; p = 9.26 N/mm ² PTFE : ϕ 250x 4.5 mm; p = 30 N/mm ² Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber : Geschwindigkeit v = 0.4 mm/s Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm;							
S = Gleitweg des Gleitschiebers max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers				G _s = max τ /max(tan γ) = Se - kantenschubmodul v _{EL} = max. Verschiebe-geschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr T = Temperatur der Gleitplatte			

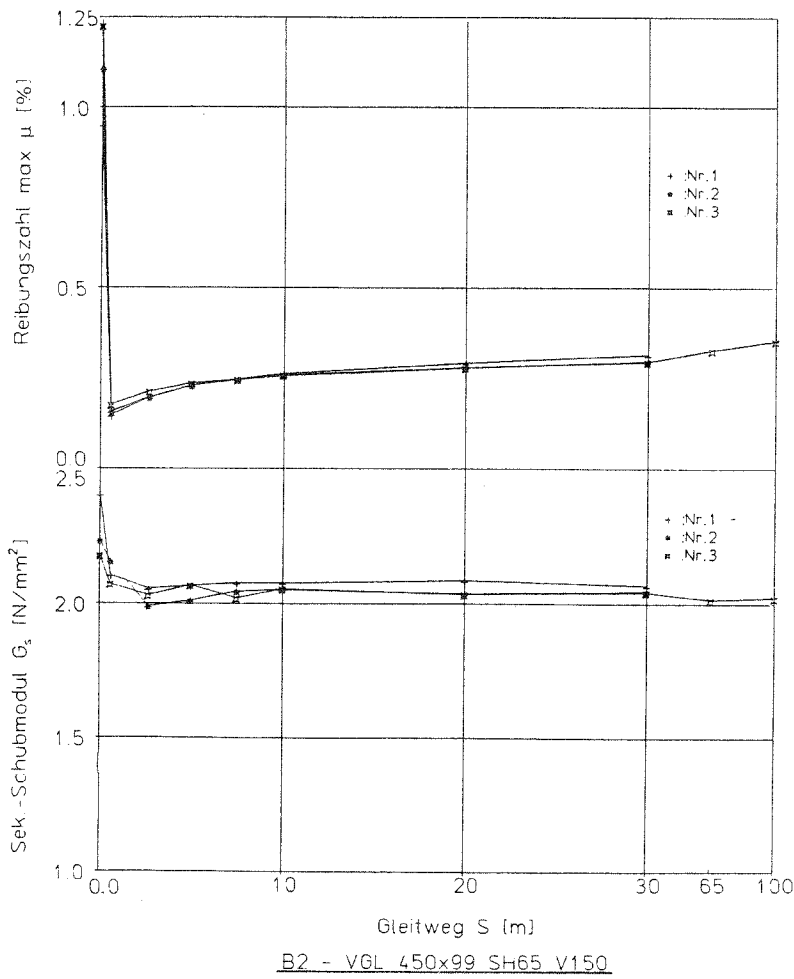
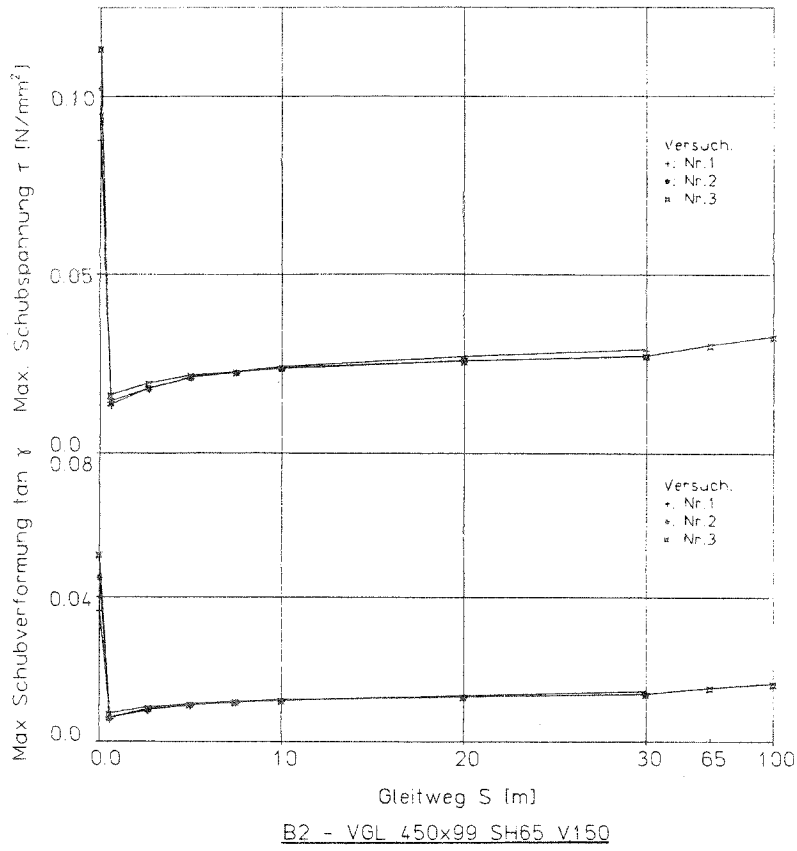


Versuche B2 - YG1_450x99 SH50_V2000

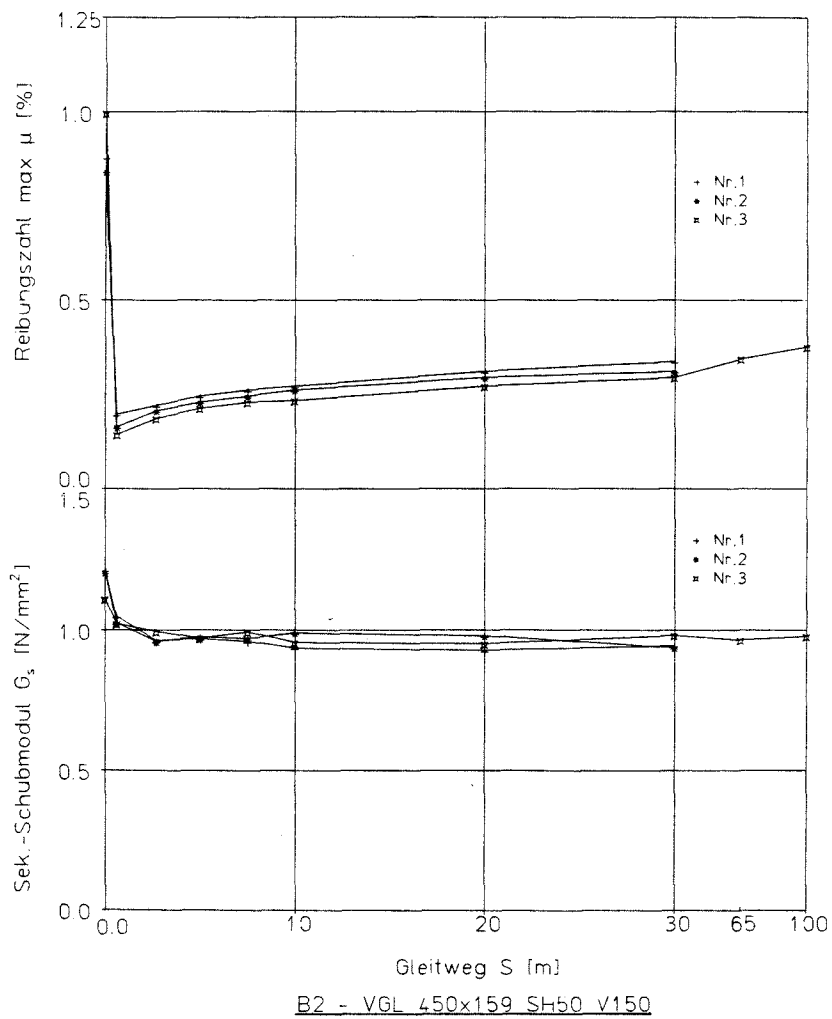
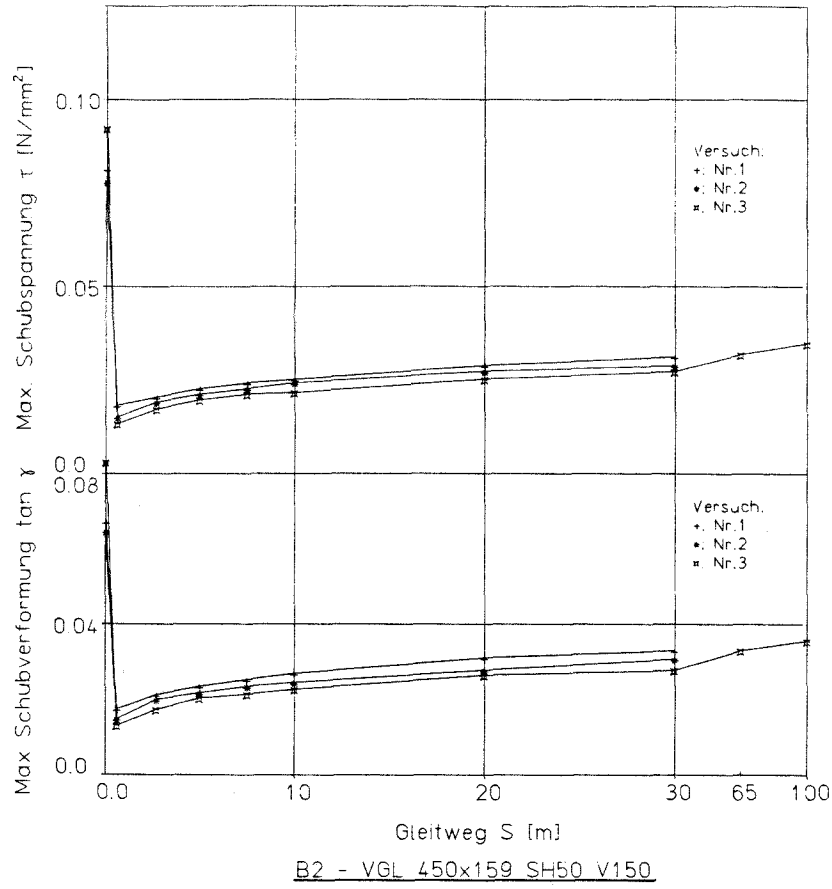


Versuche B2 - YG1_450x99 SH50_V2000

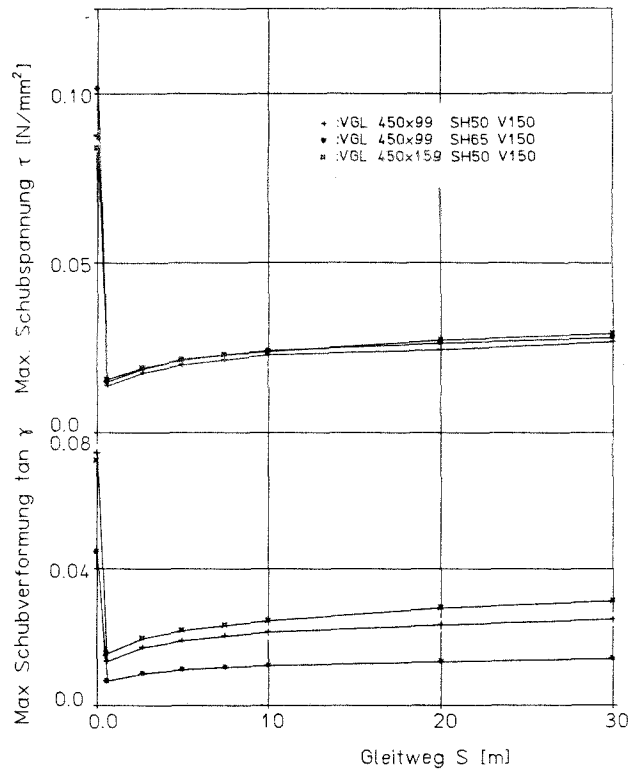
Versuch		B2 - VGL 450x99 SH65 V150					
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G _s [N/mm ²]	v _{EL} [mm/s]	T [°C]
1	0	0.95	0.088	0.037	2.40	-100	23,7
	3s ₀	0.15	0.014	0.006	2.11		
	2.7	0.20	0.018	0.009	2.06		
	5	0.23	0.021	0.010	2.07	-26	
	7.5	0.25	0.023	0.011	2.08		
	10	0.26	0.024	0.012	2.08	-28	
	20	0.29	0.027	0.013	2.09		
	30	0.31	0.029	0.014	2.07	-33	
2	0	1.11	0.103	0.046	2.24	-95	24,0
	3s ₀	0.16	0.015	0.007	2.16		
	2.7	0.20	0.018	0.009	1.99		
	5	0.23	0.021	0.011	2.01	-25	
	7.5	0.25	0.023	0.011	2.05		
	10	0.26	0.024	0.012	2.05	-27	
	20	0.28	0.026	0.013	2.04		
	30	0.30	0.027	0.013	2.04	-30	
3	0	1.23	0.114	0.052	2.18	-95	24,0
	3s ₀	0.18	0.016	0.008	2.07		
	2.7	0.21	0.020	0.010	2.03		
	5	0.24	0.022	0.011	2.07	-25	
	7.5	0.25	0.023	0.011	2.02		
	10	0.26	0.024	0.012	2.06	-27	
	20	0.28	0.026	0.013	2.03		
	30	0.30	0.027	0.013	2.04	-32	
	65	0.33	0.030	0.015	2.02		
	100	0.35	0.033	0.016	2.02	-36	
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager, Φ 450x 99. mm; Shore - A = 65.; T _N = 71. mm; ρ = 9.26 N/mm ² PTFE : Φ 250x 4.5 mm; ρ = 30 N/mm ² Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber . Geschwindigkeit v = 150.0 mm/s Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm; Frequenz = 0.5 1/s							
S = Gleitweg des Gleitschiebers max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers				G _s = max τ /max(tan γ) = Se - kantenschubmodul v _{EL} = max. Verschiebe-geschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr T = Temperatur der Gleitplatte			



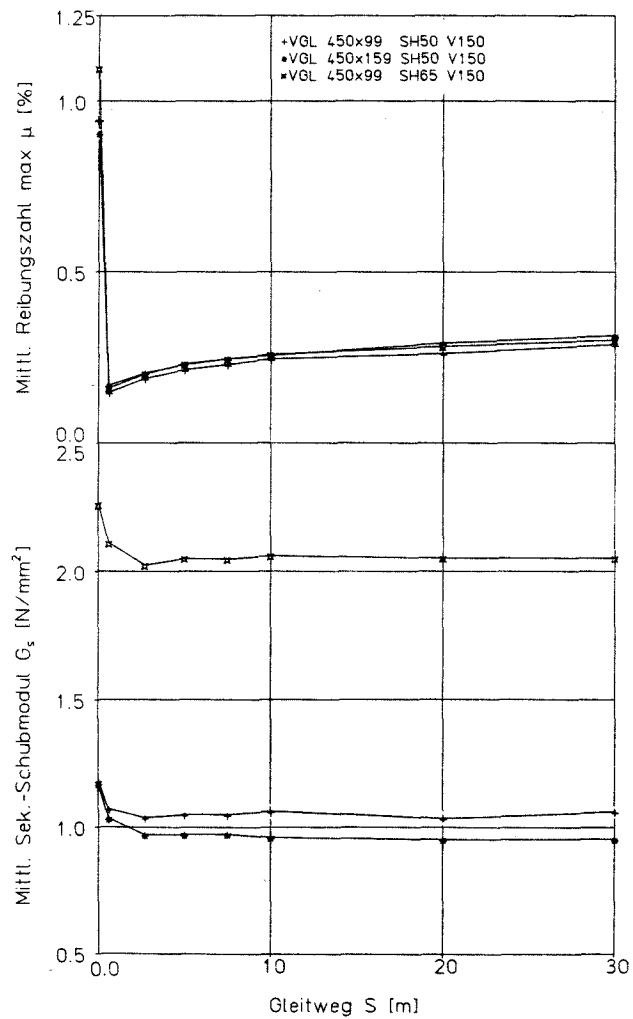
Versuch	B2 - VGL 450x159 SH50 V150						
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G_s [N/mm ²]	v_{EL} [mm/s]	T [°C]
1	0	0.88	0.081	0.067	1.21	~140	23,9
	$3s_0$	0.20	0.018	0.017	1.05		
	2.7	0.22	0.021	0.021	0.96	~62	
	5	0.25	0.023	0.023	0.97	~70	
	7.5	0.26	0.024	0.025	0.96		
	10	0.27	0.025	0.027	0.94	~78	
	20	0.31	0.029	0.031	0.93		
	30	0.34	0.031	0.033	0.95	~81	
2	0	0.84	0.078	0.065	1.21	~135	25,0
	$3s_0$	0.16	0.015	0.015	1.03		
	2.7	0.21	0.019	0.020	0.96	~59	
	5	0.23	0.021	0.022	0.98		
	7.5	0.25	0.023	0.023	0.97	~70	
	10	0.26	0.024	0.025	0.99		
	20	0.30	0.027	0.028	0.98		
	30	0.31	0.029	0.031	0.94	~79	
3	0	1.00	0.092	0.083	1.11	~140	25,6
	$3s_0$	0.14	0.013	0.013	1.02		
	2.7	0.19	0.017	0.017	0.99		
	5	0.21	0.020	0.020	0.97	~62	
	7.5	0.23	0.021	0.021	0.99		
	10	0.23	0.022	0.023	0.96	~70	
	20	0.27	0.025	0.027	0.95		
	30	0.30	0.027	0.028	0.98	~75	
	65	0.34	0.032	0.033	0.96		
	100	0.38	0.035	0.036	0.98	~90	
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager, Φ 450x 159. mm; Shore - A = 50.; T_N = 115. mm; p = 9.26 N/mm ² PTFE, Φ 250x 4.5 mm; p = 30 N/mm ² Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber : Geschwindigkeit v = 150.0 mm/s Verschiebeweg s_0 = \pm 75 mm; Frequenz = 0.5 1/s							
S = Gleitweg des Gleitschiebers max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers				G_s = max τ /max(tan γ) = G_e - kantenschubmodul v_{EL} = max. Verschiebegeschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr T = Temperatur der Gleitplatte			



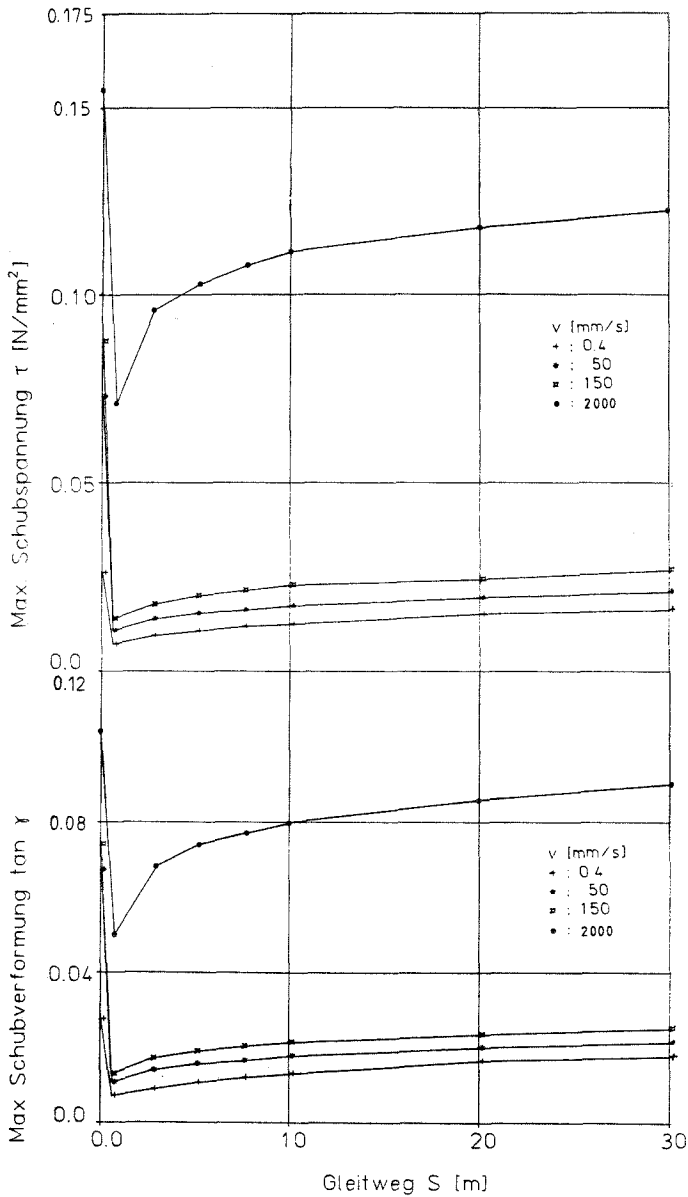
S (mm)	max μ [%]	max τ (N/mm ²)	max tan γ	G _s (N/mm ²)	v _{EL} (mm/s)	T [°C]
Versuche B2 - VGL 450x99 SH50 V0.4; Nr. 1,2,3 (Mittelwerte)						
0	0.28	0.026	0.027	0.94	0,4	24,0
3s ₀	0.08	0.007	0.007	0.99		
2.7	0.10	0.009	0.009	1.05		
5	0.11	0.010	0.011	0.99	0,4	
7.5	0.13	0.012	0.012	0.99		
10	0.13	0.012	0.013	0.95		
20	0.16	0.015	0.016	0.92		
30	0.17	0.016	0.018	0.91	0,4	23,3
Versuche B2 - VGL 450x99 SH50 V50; Nr. 1,2,3 (Mittelwerte)						
0	0.79	0.073	0.067	1.08	-45	27,3
3s ₀	0.11	0.011	0.011	1.00		
2.7	0.15	0.014	0.014	0.99		
5	0.16	0.015	0.016	0.98	-22	
7.5	0.17	0.016	0.016	0.98		
10	0.19	0.017	0.018	0.97		
20	0.21	0.019	0.020	0.97		
30	0.23	0.021	0.022	0.98	-26	28,6
Versuche B2 - VGL 450x99 SH50 V150; Nr. 1,2,3 (Mittelwerte)						
0	0.94	0.087	0.074	1.18	-118	27,1
3s ₀	0.15	0.014	0.013	1.07		
2.7	0.19	0.018	0.017	1.04		
5	0.21	0.020	0.019	1.05	-45	
7.5	0.23	0.021	0.020	1.05		
10	0.25	0.023	0.021	1.06		
20	0.26	0.024	0.023	1.03		
30	0.29	0.027	0.025	1.06	-56	30,3
Versuche B2 - VGL 450x99 SH50 V2000; Nr. 1,2,3 (Mittelwerte)						
0	1,67	0,155	0,104	1,49	-525	19,3
3s ₀	0,77	0,071	0,050	1,43		
2.7	1,04	0,096	0,068	1,42		
5	1,11	0,103	0,074	1,38	-250	
7.5	1,17	0,108	0,077	1,39		
10	1,20	0,111	0,080	1,39		
20	1,27	0,118	0,086	1,37		
30	1,32	0,122	0,090	1,36	-318	24,1
Versuche B2 - VGL 450x99 SH65 V150; Nr. 1,2,3 (Mittelwerte)						
0	1.10	0.101	0.045	2.26	-97	23,9
3s ₀	0.16	0.015	0.007	2.11		
2.7	0.20	0.019	0.009	2.02		
5	0.23	0.021	0.010	2.05	-25	
7.5	0.25	0.023	0.011	2.05		
10	0.26	0.024	0.012	2.06		
20	0.28	0.026	0.013	2.05		
30	0.30	0.028	0.014	2.05	-32	27,5
Versuche B2 - VGL 450x159 SH50 V150; Nr. 1,2,3 (Mittelwerte)						
0	0.91	0.084	0.072	1.17	-138	24,5
3s ₀	0.17	0.016	0.015	1.03		
2.7	0.21	0.019	0.020	0.97		
5	0.23	0.021	0.022	0.97	-63	
7.5	0.25	0.023	0.023	0.97		
10	0.26	0.024	0.025	0.96		
20	0.29	0.027	0.029	0.95		
30	0.31	0.029	0.031	0.95	-78	27,9
B2 = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager						
Elastomerlager: Φ 450x..... mm; Shore - A = SH ; T _M = $\frac{71}{115}$ mm; p = 9.26 N/mm ²						
PTFE : Φ 250x 4.5 mm; p = 30 N/mm ²						
Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm						
Gleitschieber : Geschwindigkeit v						
Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm;						
S = Gleitweg des Gleitschiebers			G _s = max τ /max(tan γ) = Se - kantenschubmodul			
max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl			v _{EL} = max. Verschiebegeschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr			
max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers			T = Temperatur der Gleitplatte			
max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers						



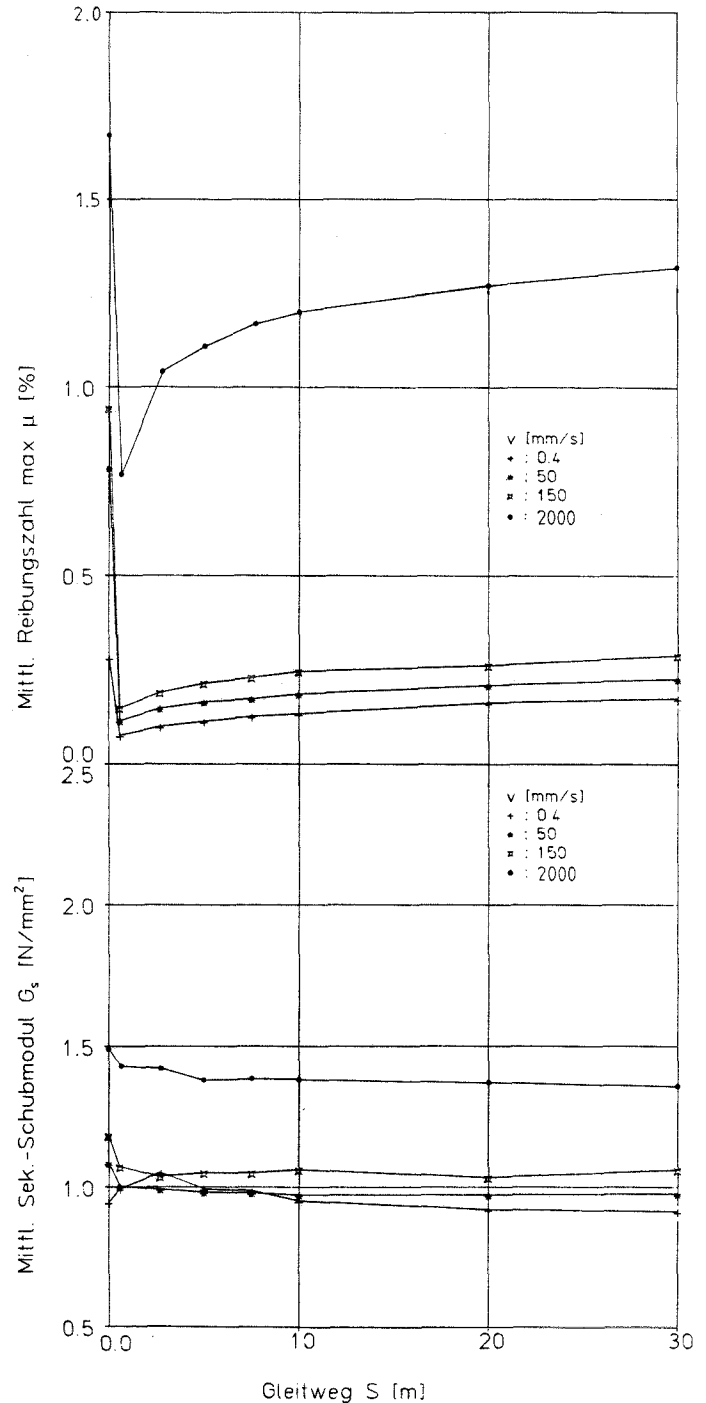
Versuche B2 - VGL bei V = 150 mm/s



Versuche B2 - VGL bei V = 150 mm/s
(Mittelwerte)



Versuche B2 - VGL 450x99 SH50 V0,4,50,150,2000
(Mittelwerte)

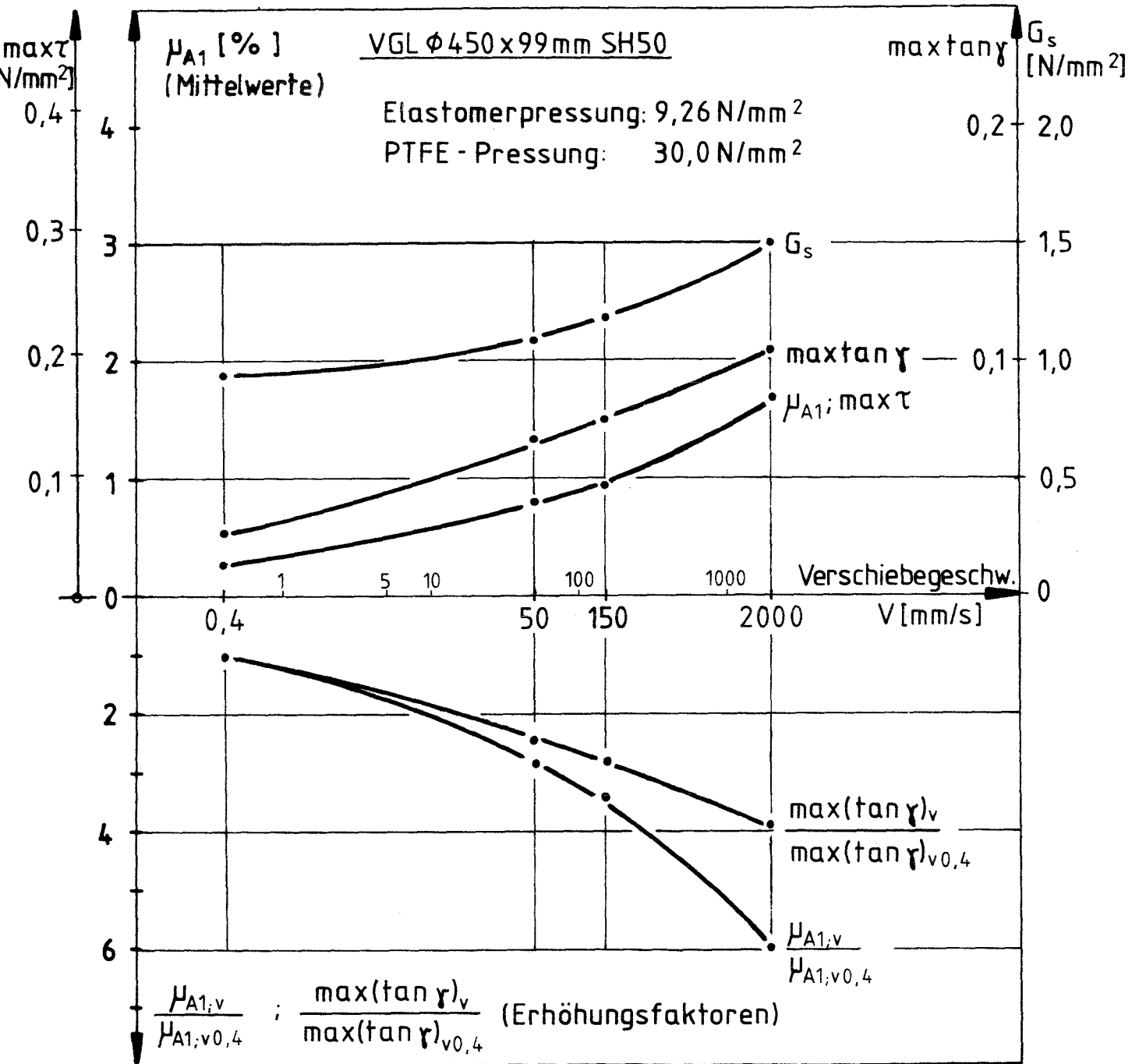


Versuche B2 - VGL 450x99 SH50 V0,4; 50; 150; 2000
(Mittelwerte)

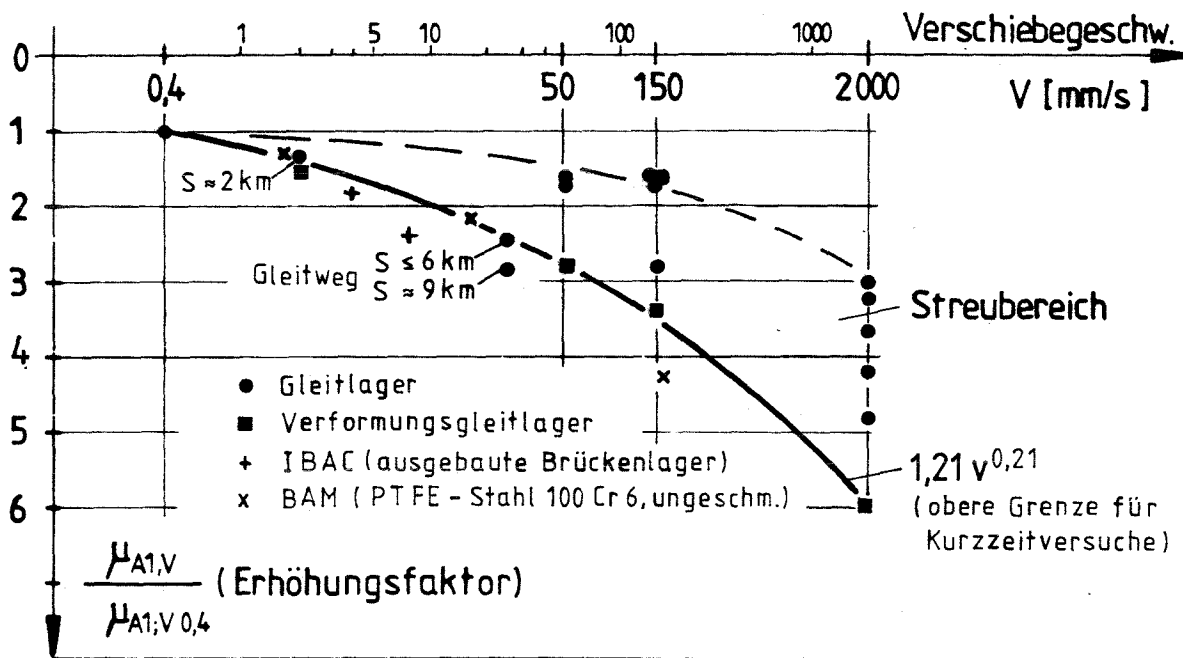
Versuchsreihe B2:

Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Verformungsgleitlagern

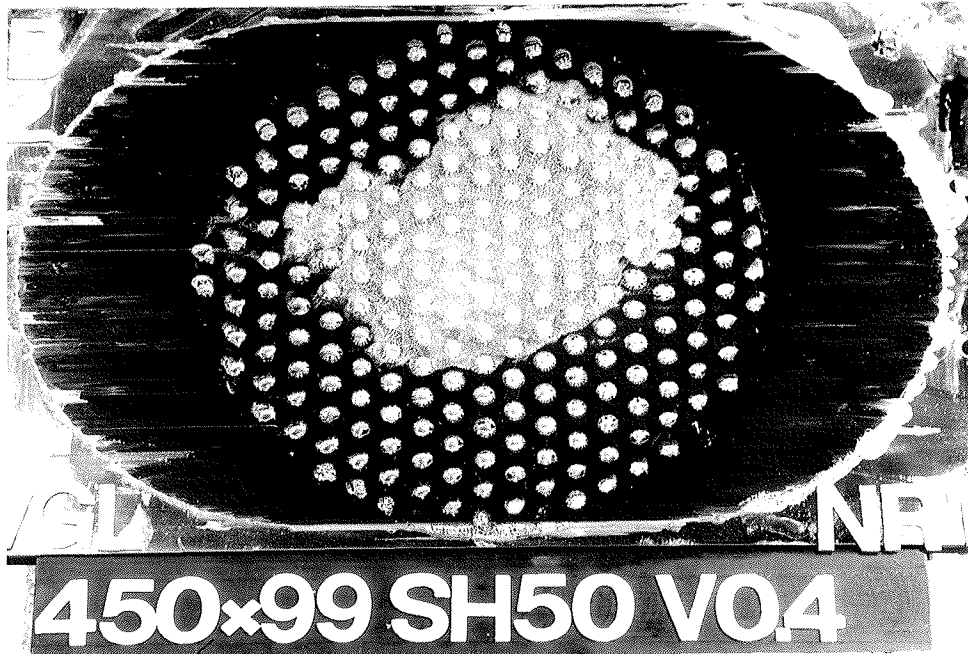
Lager	VGL 450x99 SH50				VGL 450x99 SH65	VGL 450x159 SH50
V [mm/s]	0,4	50	150	2000	150	150
Versuchswerte beim Anfahren (Mittelwerte aus je 3 Versuchen)						
μ_{A1} [%]	0,28	0,79	0,94	1,67	1,10	0,91
max τ [N/mm ²]	0,026	0,073	0,087	0,155	0,101	0,084
max $\tan \gamma$	0,027	0,067	0,074	0,104	0,045	0,072
G_s [N/mm ²]	0,94	1,08	1,18	1,49	2,26	1,17
Verhältniswerte (Erhöhungsfaktoren) bei unterschiedlichen Verschiebegeschwindigkeiten						
$\frac{\mu_{A1,v}}{\mu_{A1,v0,4}}$	1	2,82	3,36	5,96	-	-
$\frac{\max(\tan \gamma)_v}{\max(\tan \gamma)_{v0,4}}$	1	2,48	2,74	3,85	-	-
$\frac{G_{s,v}}{G_{s,v0,4}}$	1	1,15	1,26	1,59	-	-



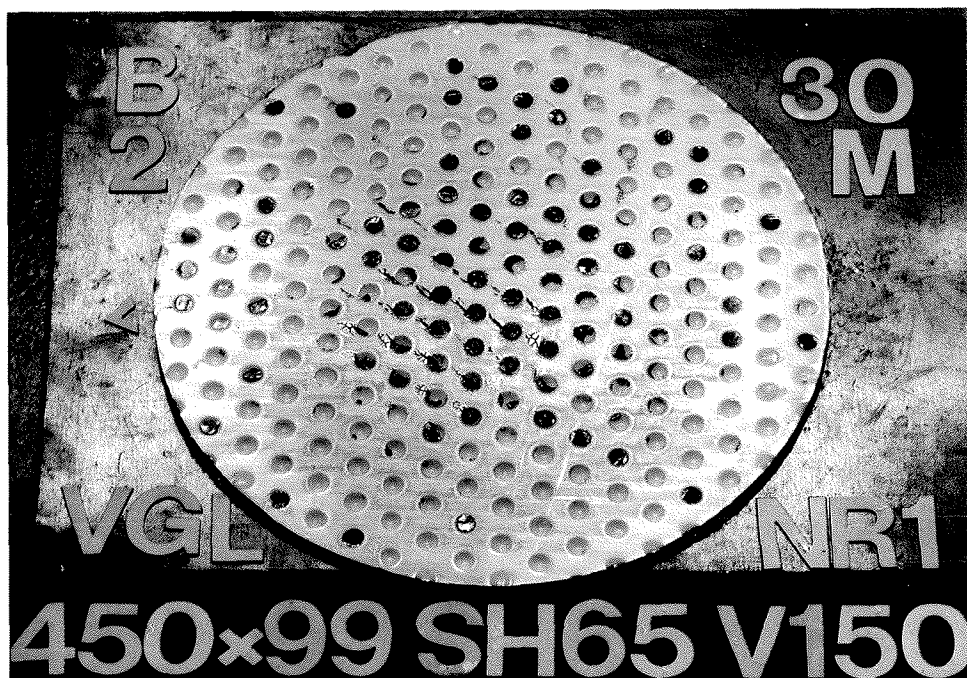
Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur am geschmier-
 ten Verformungsgleitlager VGL 450x99 SH 50 (Versuchsreihe B2) :
 Geschwindigkeitsabhängigkeit der Anfahrreibungszahl μ_{A1} , des max.
 Gleitwinkels $\tan \gamma$ und des Sekantenschubmoduls G_s sowie Erhö-
 hungsfaktoren



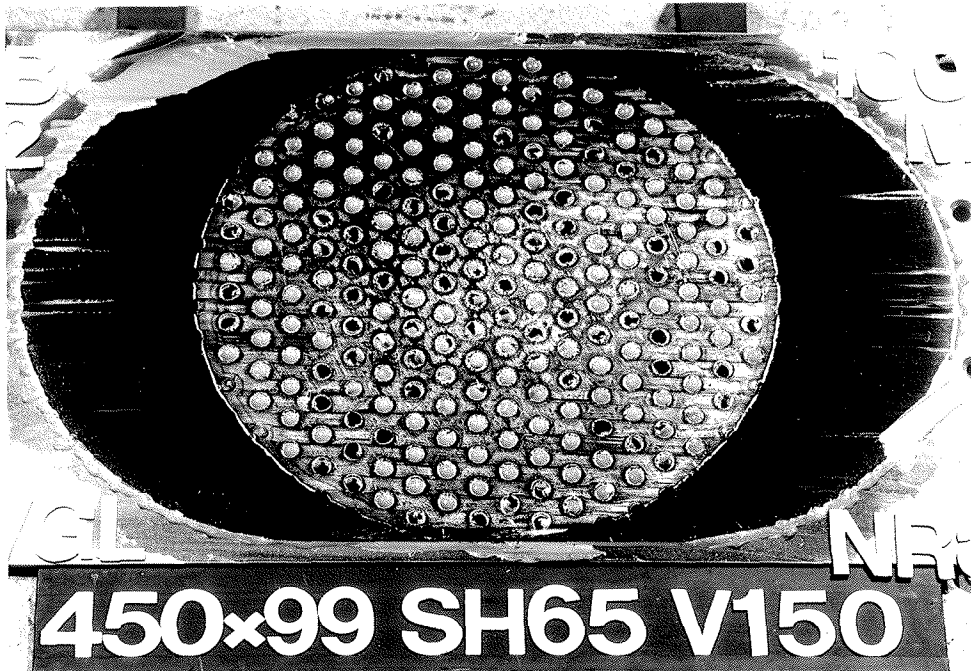
Geschwindigkeitsabhängigkeit von mittleren Erhöhungsfaktoren für die Anfahrreibungszahlen der bei Raumtemperatur untersuchten Gleit- und Verformungsgleitlager



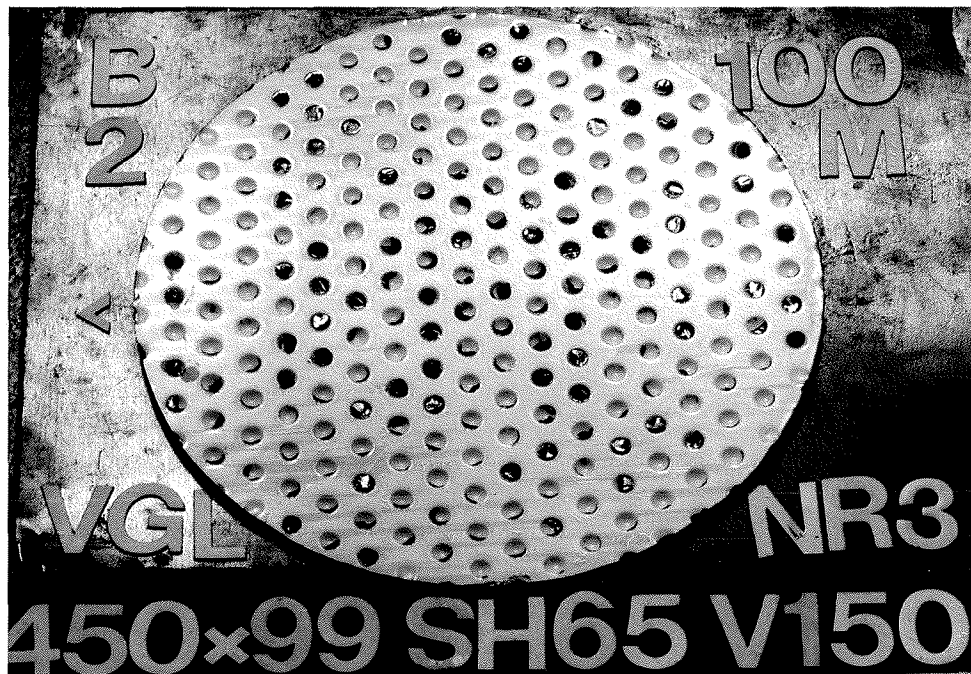
Bilder 63 und 64: Verformungsgleitlager B2-VGL 450x99 SH50 V0,4 Nr. 1
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
mit ausgeprägtem Fetthof im Scheibeninnern
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm²,
Verschiebegeschwindigkeit 0,4 mm/s, Verschiebeweg \pm 75 mm)



Bilder 65 und 66: Verformungsgleitlager B2-VGL 450x99 SH65 V150 Nr. 1
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)

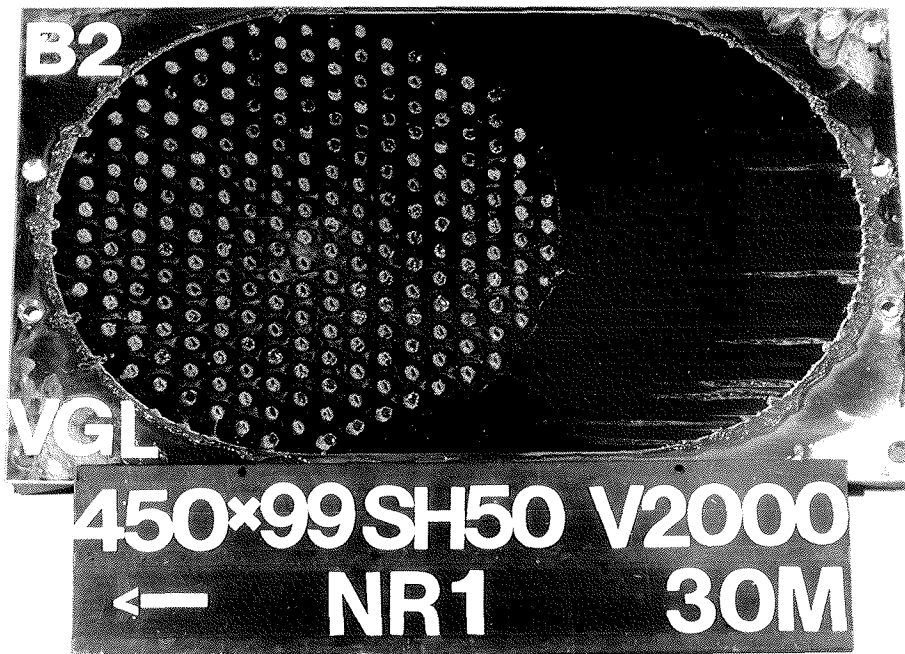


Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag am Rand der Gleitfläche

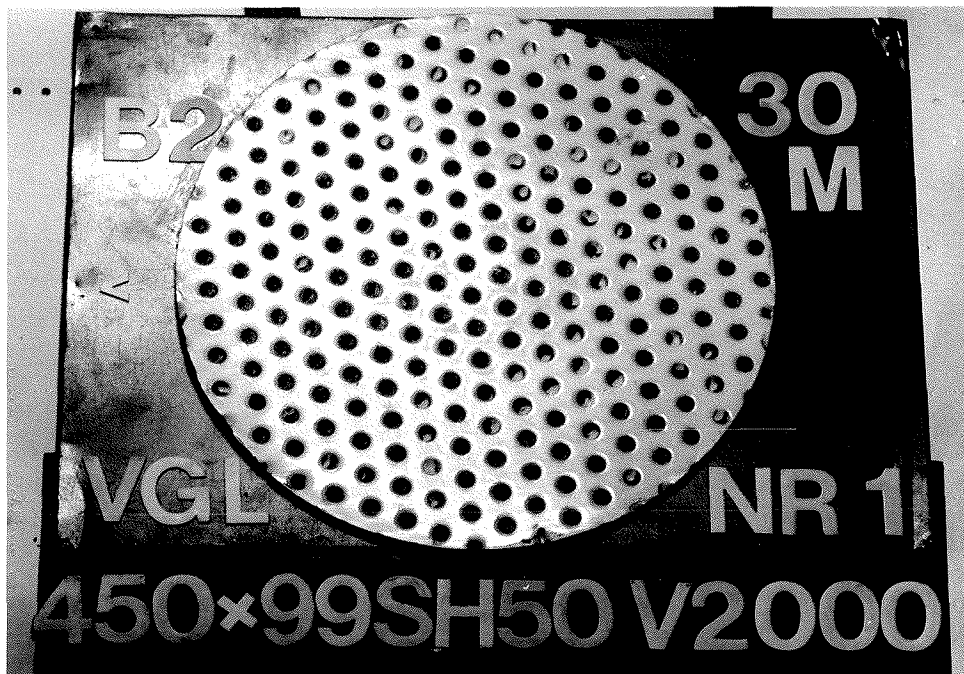


in Gleitrichtung verlaufende streifenartige Verschleißspuren im Randbereich

Bilder 67 und 68: Verformungsgleitlager B2-VGL 450x99 SH65 V150 Nr. 3
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 ,
Verschiebegeschwindigkeit 150 mm/s, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)

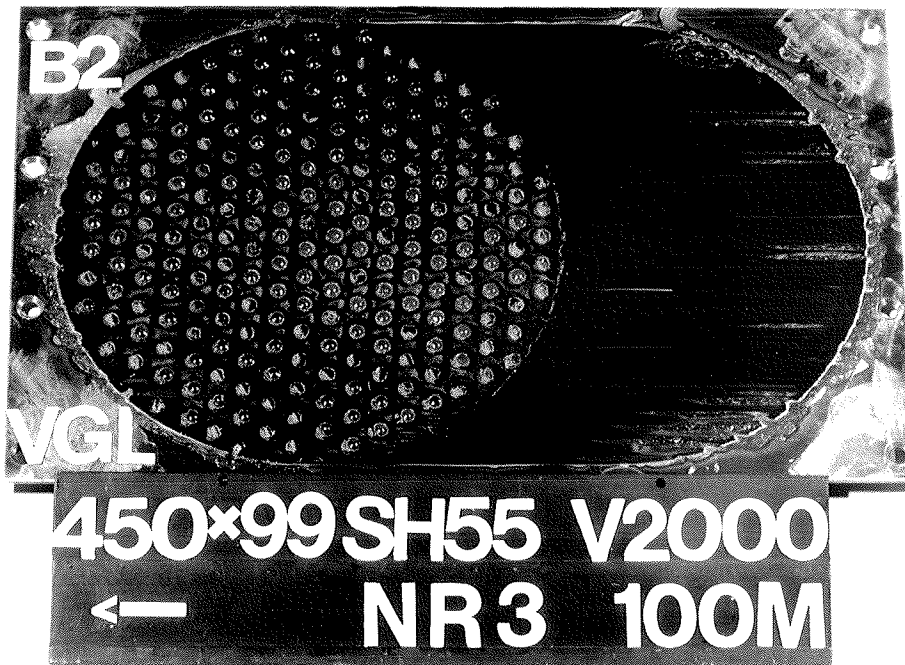


Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag am Rand der Gleitfläche

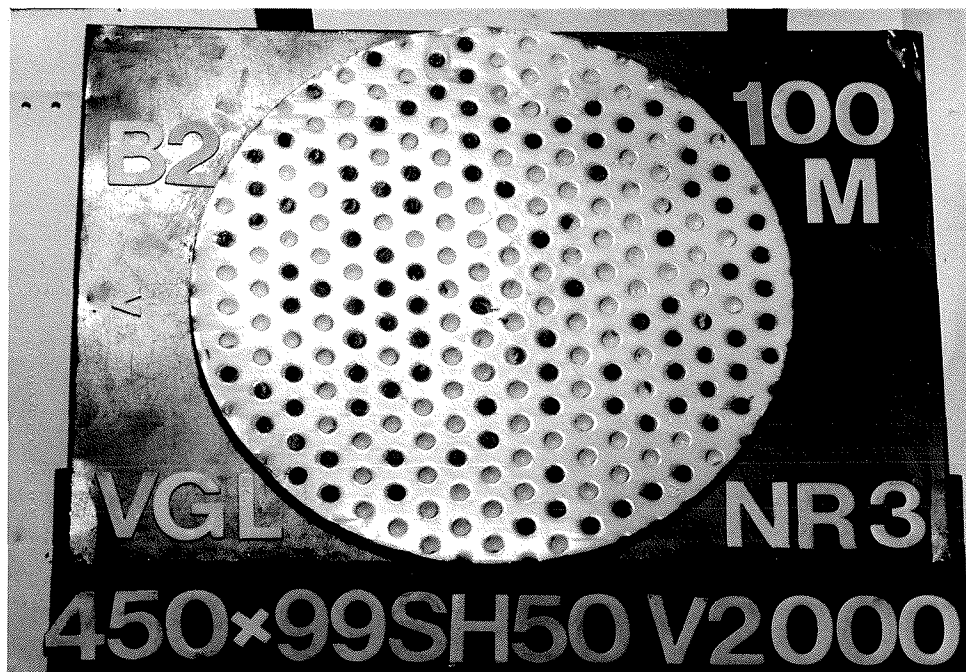


in Gleitrichtung verlaufende streifenartige Verschleißspuren im Randbereich

Bilder 69 und 70: Verformungsgleitlager B2-VGL 450x99 SH50 V2000 Nr. 1
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm²,
Verschiebegeschwindigkeit 2000 mm/s, Verschiebeweg 150 mm)

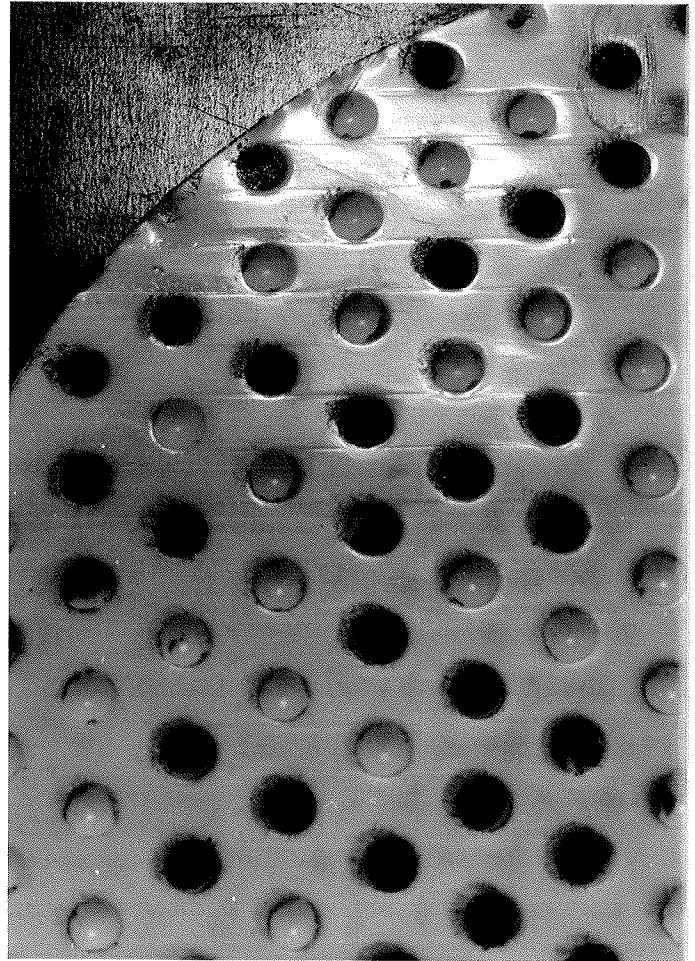
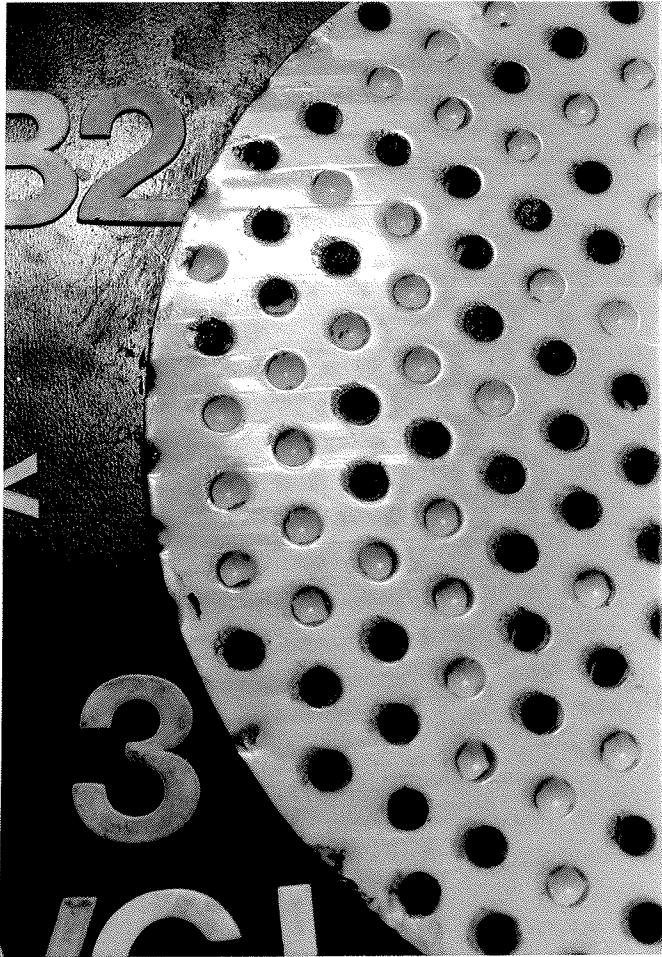


Trockenlauf-
stellen mit
PTFE-Auftrag
am Rand der
Gleitfläche



in Gleitrichtung
verlaufende
streifenartige
Verschleißspuren im
Randbereich

Bilder 71 und 72: Verformungsgleitlager B2-VGL 450x99 SH50 V2000 Nr. 3
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 100 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm²,
Verschiebegeschwindigkeit 2000 mm/s, Verschiebeweg 150 mm)



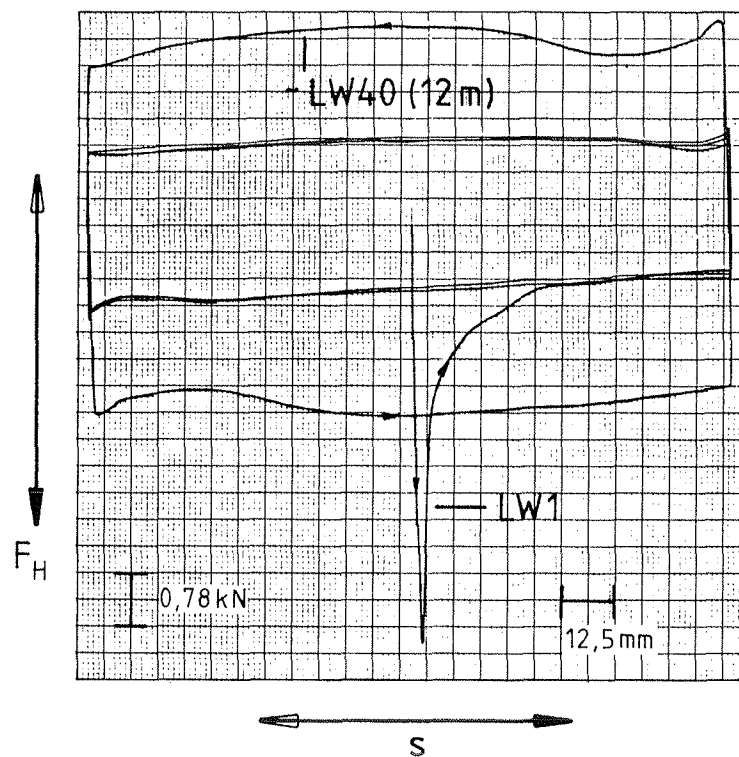
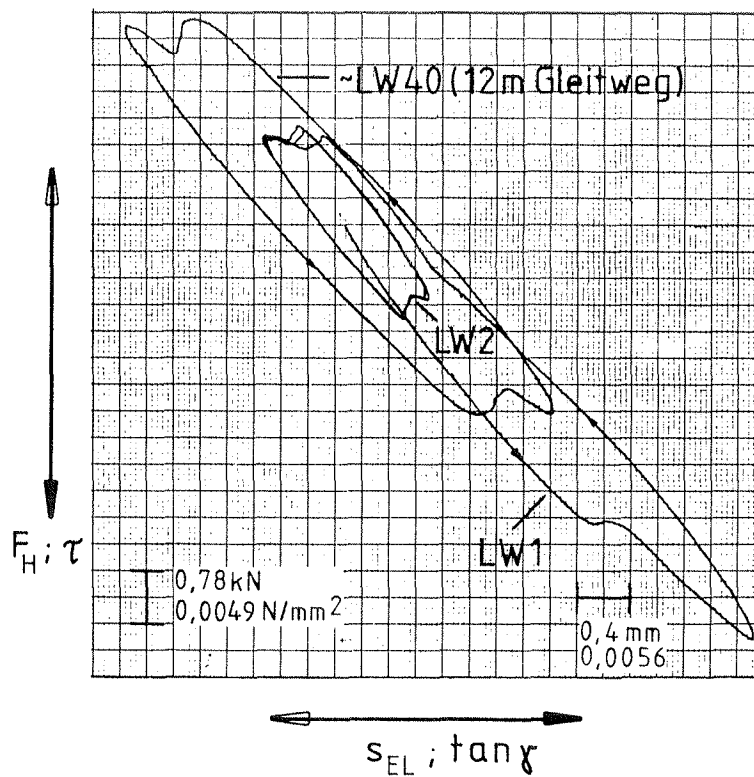
Bilder 73 und 74: Detailaufnahmen zu Anlage 136;
PTFE-Ronden-Ausschnitt mit streifenartigen,
an bevorzugten Stellen in Gleitrichtung
verlaufenden Verschleißspuren

**Versuchsreihe C: Kurzzeitversuche an geschmierten,
exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern**

Versuchsreihe C

Kurzzeitversuche an geschmierten Verformungsgleitlagern (mit Keil)
bei Raumtemperatur

Versuchsbezeichnung	C-VGL 450x99 SH50 V0,4 Nr. 1 Nr. 2* Nr. 3
Gleitpartner	PTFE Ø 250x4,5 mm / aust. Stahl 2,5 mm Schmierung mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung
Elastomerlager (bewehrt)	Ø 450 mm; Einbauhöhe 99 mm; Shore-A-Härte ~50 Elastomerdicke = 71 mm; (Aufbau vgl. Anlage 91)
Keilneigung	$\tan \alpha = 0,005$
Mittlere Pressung	PTFE : $p = 30 \text{ N/mm}^2$ Elastomerlager : $p = 9,26 \text{ N/mm}^2$
Vorbelastungszeit	$t_v = 1 \text{ Stunde}$
Gleitschieber	Verschiebungsgeschw.: $v = 0,4 \text{ mm/s}$ Verschiebeweg : $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$ Frequenz : $f = 0,00133 \text{ /s}$ Gesamtgleitweg : $S = 30 \text{ m (Nr. 1, Nr. 2)}$ $S = 100 \text{ m (Nr. 3)}$ Weg-Zeit-Funktion : linear ohne Leerlaufspiel
Messungen	<ul style="list-style-type: none"> - Verschiebewiderstand $F_H(t)$ - Gleitschieberweg $s(t)$ - Elastomerverformung $\tan \gamma(t)$ - Relativbewegung zwischen Gleitschieber und Elastomerlager - Dicken- und Gewichtsänderung der PTFE-Ronden soweit mit vorh. Geräten meßbar - Temperatur T der Gleitplatte
*Der Versuch C-VGL 450x99 SH50 V0,4 Nr. 2 wird als Dauergleitprogramm- versuch bis ca. 2200 m Gesamtgleitweg weitergeführt (vgl. Anlage 146)	



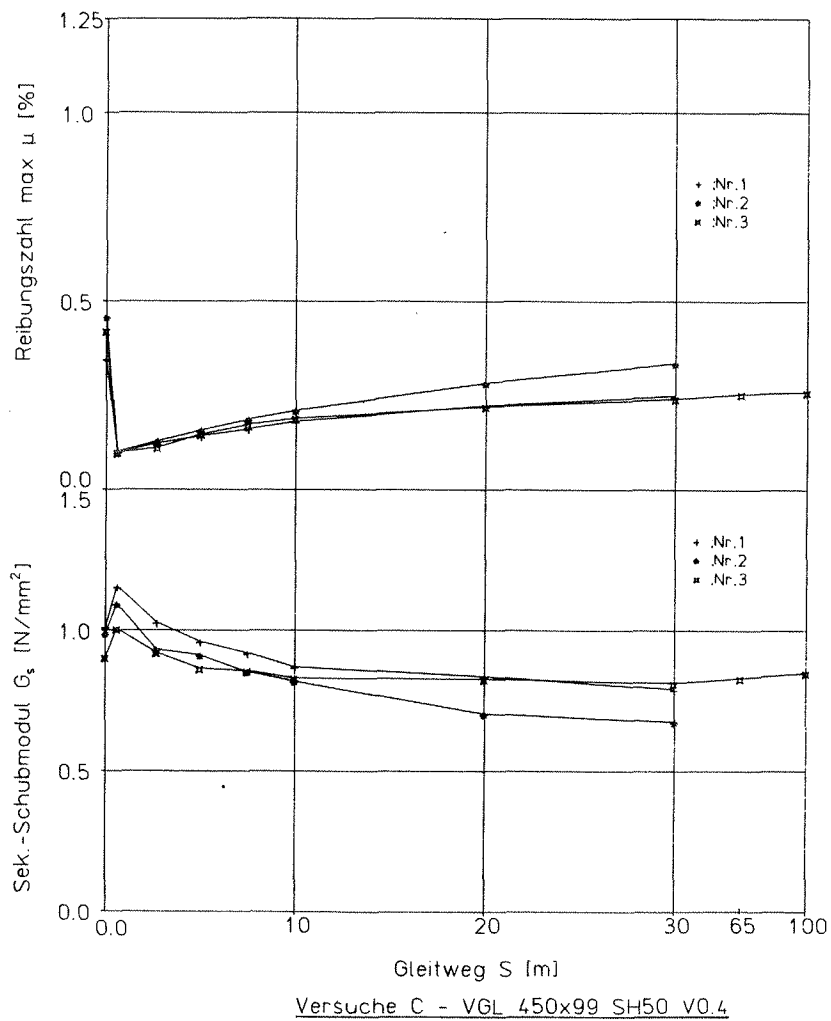
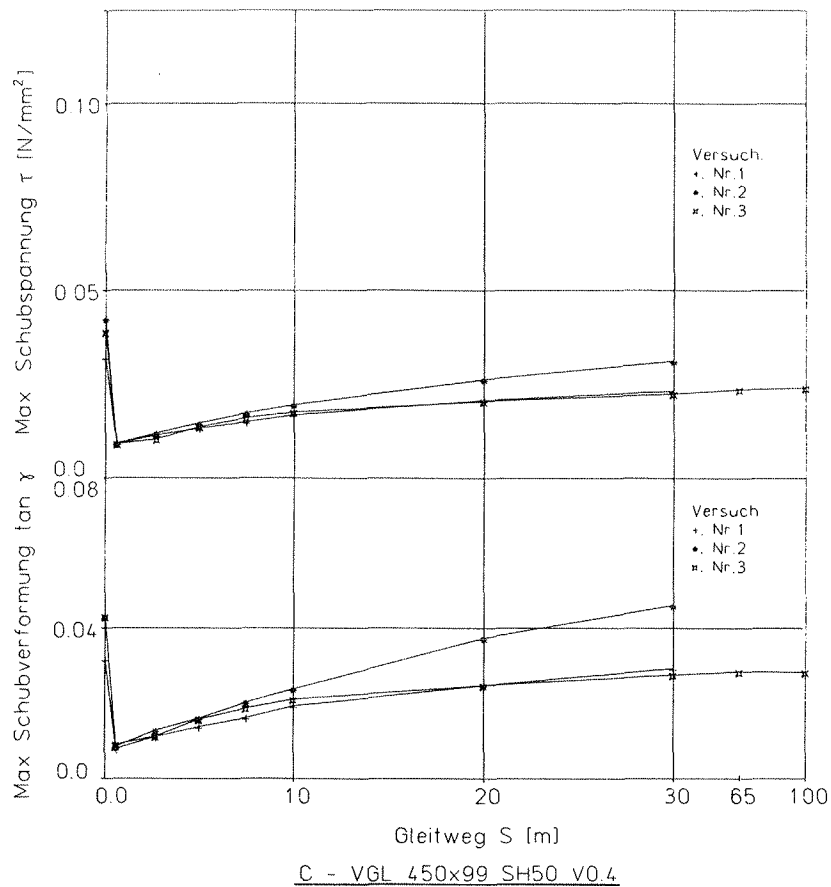
Versuch: C - VGL450x99SH50 V0,4 Nr.3

Versuchsreihe C: Versuche an Verformungsgleitlagern (mit Keil)

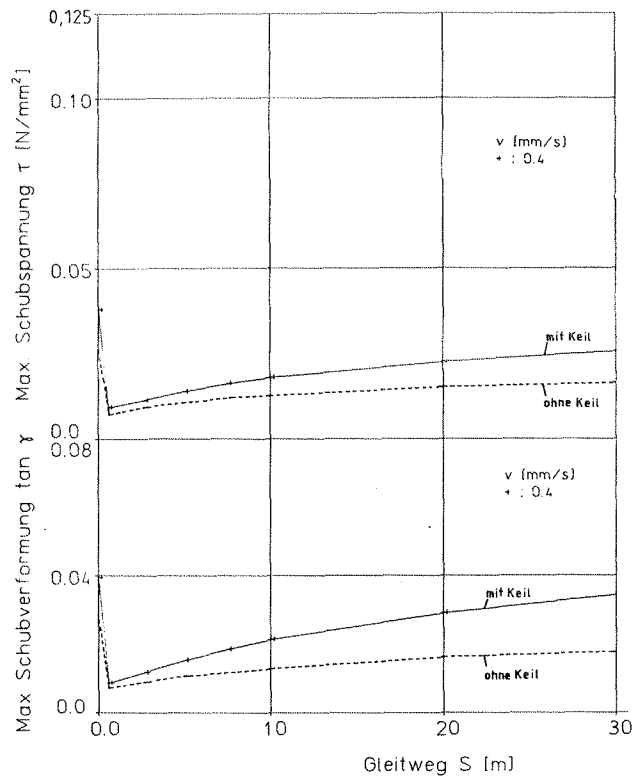
Gleitschiebergeschwindigkeit $v=0,4 \text{ mm/s}$

- Schubspannungs- Gleitwinkel- Diagramme nach verschiedenen Lastwechseln LW
- Verschiebewiderstand F_H bzw. Reibungskraft in der Gleitfuge in Abhängigkeit von der Verschiebung s des Gleitschiebers

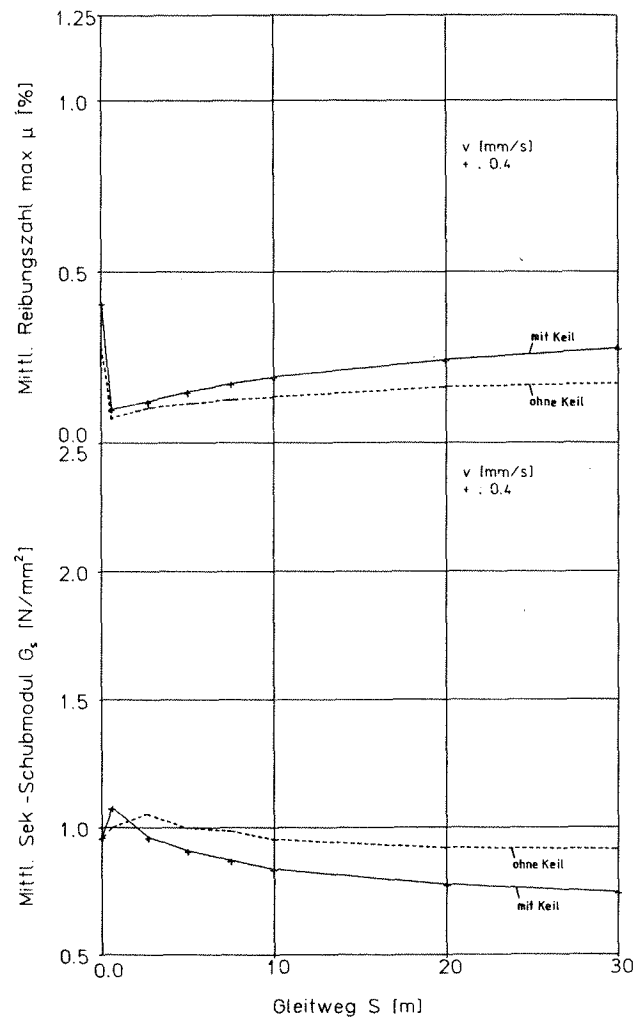
Versuch	C - VGL 450x99 SH50 V0.4						
Nr.	S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G _s [N/mm ²]	v _{EL} [mm/s]	T °C
1	0	0.35	0.032	0.032	1.01	0,4	22,1
	3s ₀	0.10	0.009	0.008	1.16		
	2.7	0.12	0.011	0.011	1.03		
	5	0.14	0.013	0.014	0.96		
	7.5	0.16	0.015	0.016	0.92		
	10	0.18	0.017	0.019	0.87		
	20	0.22	0.021	0.025	0.84		
	30	0.25	0.023	0.029	0.79		
2	0	0.46	0.042	0.043	0.99	0,4	20,6
	3s ₀	0.10	0.009	0.008	1.09		
	2.7	0.13	0.012	0.013	0.93		
	5	0.16	0.015	0.016	0.91		
	7.5	0.19	0.017	0.020	0.85		
	10	0.21	0.019	0.024	0.82		
	20	0.28	0.026	0.037	0.70		
	30	0.34	0.031	0.046	0.68		
3	0	0.42	0.039	0.043	0.90	0,4	21,0
	3s ₀	0.10	0.009	0.009	1.00		
	2.7	0.11	0.010	0.011	0.92		
	5	0.15	0.014	0.016	0.87		
	7.5	0.17	0.016	0.019	0.86		
	10	0.19	0.018	0.021	0.83		
	20	0.22	0.021	0.025	0.83		
	30	0.24	0.022	0.028	0.81		
	65	0.26	0.024	0.028	0.83		
100	0.26	0.024	0.028	0.85			
C = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager							
Elastomerlager: \varnothing 450x 99. mm; Shore - A = 50.; T _N = 71. mm; p = 9.26 N/mm ² PTFE : \varnothing 250x 4.5 mm; p = 30 N/mm ² Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm							
Gleitschieber : Geschwindigkeit v = 0.4 mm/s Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm; Frequenz = 0.00133 1/s							
S = Gleitweg des Gleitschiebers max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers				G _s = max τ /max(tan γ) = Se - kantenschubmodul v _{EL} = max. Verschiebegeschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr T = Temperatur der Gleitplatte			



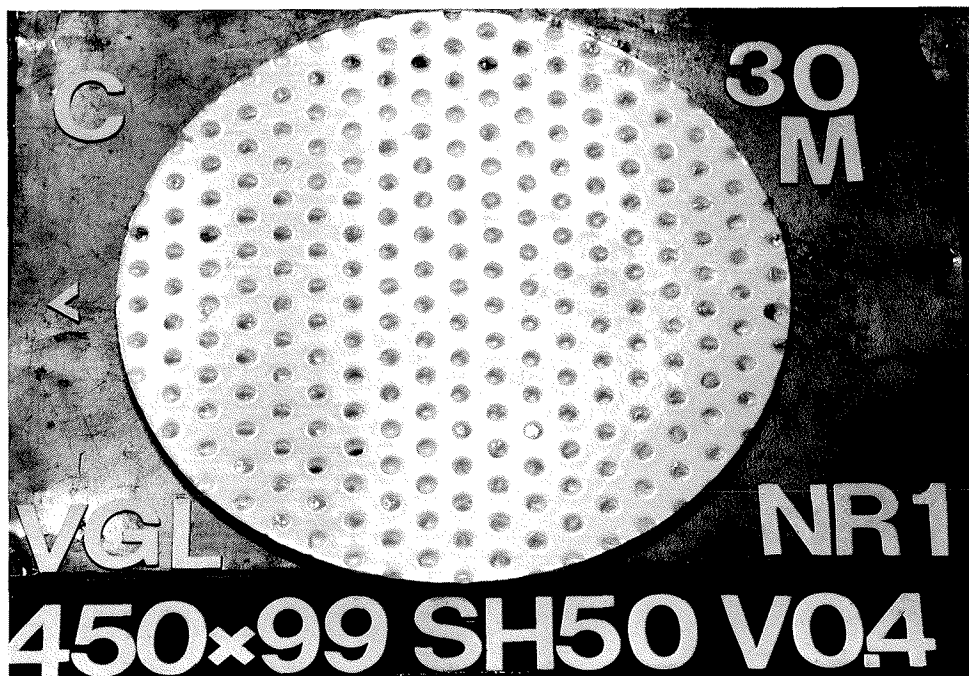
S [m]	max μ [%]	max τ [N/mm ²]	max tan γ	G_s [N/mm ²]	v_{EL} [mm/s]	T [°C]
Versuche C - VGL 450x99 SH50 V0.4; Nr. 1,2,3; (Mittelwerte)						
0	0.41	0.038	0.039	0.96	0,4	21,2
3s ₀	0.10	0.009	0.008	1.08		
2.7	0.12	0.011	0.012	0.96		
5	0.15	0.014	0.015	0.91		
7.5	0.17	0.016	0.018	0.87		
10	0.19	0.018	0.021	0.84		
20	0.24	0.023	0.029	0.78		
30	0.28	0.026	0.034	0.74	0,4	22,0
C = Versuchsreihe; VGL = Verformungsgleitlager						
Elastomerlager: Φ 450x 99 mm; Shore - A = 50.; T _N = 71. mm; p = 9,26 N/mm ²						
PTFE : Φ 250x 4.5 mm; p = 30 N/mm ²						
Gleitpartner : aust. Stahlblech 2.5 mm						
Gleitschieber : Geschwindigkeit v = 0.4 mm/s						
Verschiebeweg s ₀ = \pm 75 mm; Frequenz = 0.00133 1/s						
S = Gleitweg des Gleitschiebers max μ = max. Reibungszahl zwischen PTFE und aust. Stahl max τ = max. Schubspannung des Elastomerlagers max (tan γ) = max. Schubverformung des Elastomerlagers				G_s = max τ /max(tan γ) = Se - kantenschubmodul v_{EL} = max. Verschiebegeschw. des Elastomers bei Bewegungsumkehr T = Temperatur der Gleitplatte		



Versuche C - VGL 450x99 SH50 V0.4; Nr. 1,2,3;
(Mittelwerte)



Versuche C - VGL 450x99 SH50 V0.4; Nr. 1,2,3;
(Mittelwerte)



Bilder 75 und 76: Verformungsgleitlager C-VGL 450x99 SH50 V0,4 Nr. 1
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde nach 30 m Gleitweg
mit exzentrisch liegendem Fetthof (höhere Pressung
infolge eingelegtem Keil am linken Scheibenrand)

Versuchsreihe B2 und C: Dauergleitprogrammversuche an geschmierten, zentrisch und exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagern über 2205 m Gesamtgleitweg

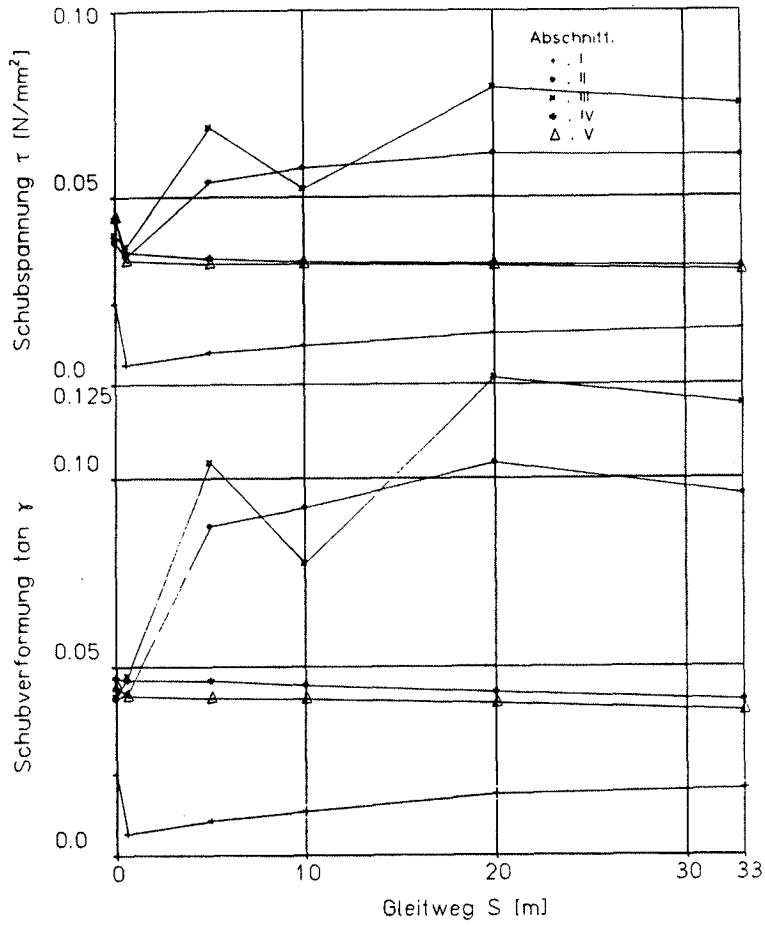
Versuchsreihe B2 und C

Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur an geschmierten
Verformungsgleitlagern (ohne und mit Keil)

Versuchsbezeichnung	B2-VGL 450x99 SH50 V0,4/2,0 (ohne Keil) C-VGL 450x99 SH50 V0,4/2,0 (mit Keil; Keil- neigung $\tan\alpha = 0,005$)
Versuchsabschnitt	<u>Versuchsbedingungen, Versuchsablauf</u>
-	Aufbringen der Vertikallast $F_v = 1473 \text{ kN}$ (konstant während der gesamten Versuchsdauer)
I/1	Standzeit: $t = 1$ Stunde ohne Bewegung Gleiten 1: Verschiebegeschw. $v = 0,4 \text{ mm/s}$ Verschiebeweg $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$ Frequenz $f = 0,00133 \text{ /s}$ Doppelhübe $n = 110$ Gleitweg $S_1 = 33 \text{ m}$
I/2	Standzeit $t = 1$ Stunde ohne Bewegung Gleiten 2: Verschiebegeschw. $v = 2 \text{ mm/s}$ Verschiebeweg $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$ Frequenz $f = 0,00667 \text{ /s}$ Doppelhübe $n = 1700$ Gleitweg $S_2 = 510 \text{ m}$
II bis IV	wie Versuchsabschnitte I/1 + I/2
V	wie Versuchsabschnitt I/1
Gleitpartner	PTFE $\varnothing 250 \times 4,5 \text{ mm}$ / aust. Stahl $2,5 \text{ mm}$ Schmierung mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung
Elastomerlager (bewehrt)	$\varnothing 450 \text{ mm}$; Einbauhöhe 99 mm ; Shore-A-Härte ~ 50 Elastomerdicke 71 mm ; (Aufbau vgl. Anlage)
Mittlere Pressung	PTFE : $p = 30 \text{ N/mm}^2$ Elastomerlager : $p = 9,26 \text{ N/mm}^2$
Gleitschieber	Verschiebungsgeschw.: $v = 0,4$ und $2,0 \text{ mm/s}$ Verschiebeweg : $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$ Frequenz : $f = 0,00133$ und $0,00667 \text{ /s}$ Gesamtgleitweg S : 5 Abschnitte $\rightarrow 33 \text{ m}$ ($v=0,4 \text{ mm/s}$) 4 Abschnitte $\rightarrow 510 \text{ m}$ ($v= 2 \text{ mm/s}$) total $S = 2205 \text{ m}$ Weg-Zeit-Funktion : linear ohne Leerlaufspiel
Messungen	- Verschiebewiderstand $F_H(t)$ - Gleitschieberweg $s(t)$ - Elastomerverformung $\tan\gamma(t)$ - Relativbewegung zwischen Gleitschieber und Elastomerlager - Dicken- und Gewichtsänderung der PTFE-Ronden soweit mit vorh. Geräten meßbar - Temperatur T der Gleitplatte

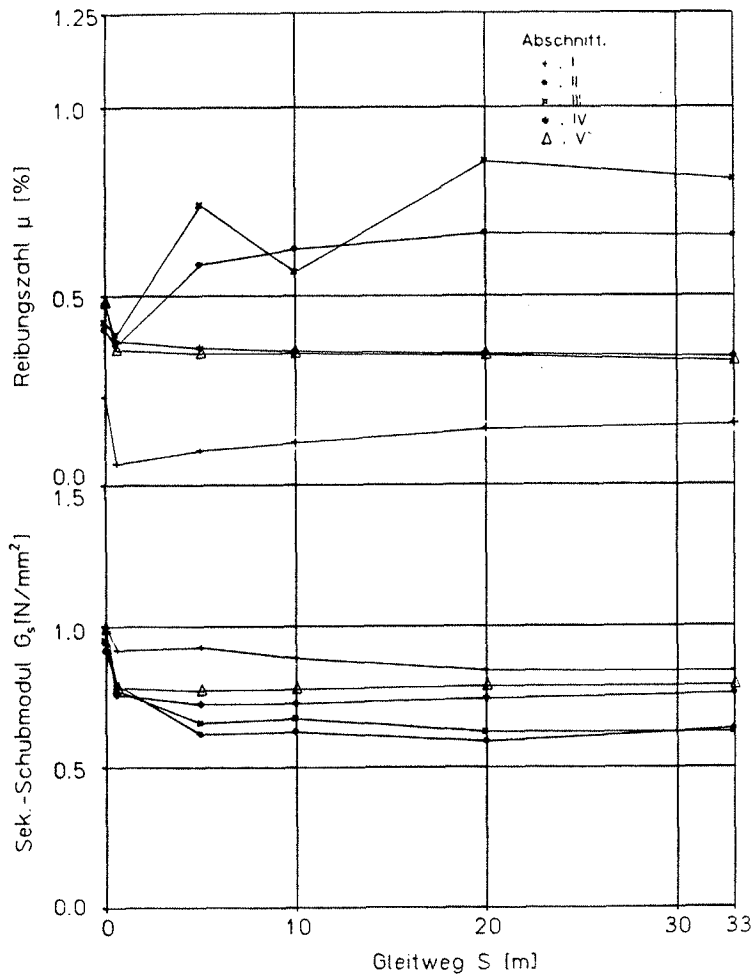
Versuch B2 - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0												
Abschnitt	Gleiten 1 v = 0.4 mm/s s ₀ = ± 75 mm						Gleiten 2 v = 2.0 mm/s s ₀ = ± 75 mm					
	S [m]	μ [%]	τ [N/mm ²]	tan γ	G _s [N/mm ²]	T [°C]	S [m]	μ [%]	τ [N/mm ²]	tan γ	G _s [N/mm ²]	T [°C]
I	0	0.23	0.021	0.021	1.00	24.0	0	0.27	0.025	0.026	0.96	24.8
	0.23	0.06	0.005	0.006	0.92		0.23	0.11	0.011	0.011	0.93	
	5	0.09	0.008	0.009	0.93	24.4	50	0.20	0.018	0.019	0.96	
	10	0.11	0.010	0.012	0.89	24.8	200	0.23	0.021	0.021	0.99	23.7
	20	0.15	0.014	0.016	0.84		373	0.26	0.024	0.024	1.00	22.0
	33	0.16	0.015	0.018	0.84	24.7	510	0.26	0.024	0.026	0.94	20.8
II	0	0.41	0.038	0.042	0.91	20.6	0	0.77	0.071	0.075	0.95	19.5
	0.23	0.37	0.034	0.043	0.79		0.23	0.34	0.032	0.035	0.90	
	5	0.58	0.054	0.087	0.62		50	0.33	0.031	0.039	0.80	
	10	0.62	0.058	0.092	0.63		200	0.33	0.031	0.039	0.80	19.7
	20	0.67	0.062	0.104	0.59		373	0.33	0.031	0.039	0.80	20.5
	33	0.66	0.061	0.096	0.64	19.5	510	0.32	0.029	0.037	0.79	21.2
III	0	0.43	0.040	0.042	0.95	21.1	0	0.86	0.080	0.081	0.98	21.2
	0.23	0.40	0.037	0.048	0.77		0.23	0.37	0.035	0.042	0.82	
	5	0.74	0.069	0.104	0.66		50	0.43	0.040	0.054	0.74	22.0
	10	0.56	0.052	0.077	0.67	21.3	200	0.38	0.035	0.047	0.75	22.6
	20	0.86	0.079	0.127	0.63		373	0.35	0.032	0.042	0.76	23.7
	33	0.81	0.075	0.120	0.63	21.2	510	0.33	0.030	0.039	0.77	23.4
IV	0	0.48	0.044	0.047	0.94	23.4	0	0.63	0.059	0.056	1.04	22.3
	0.23	0.38	0.035	0.046	0.76		0.23	0.31	0.028	0.034	0.84	
	5	0.36	0.034	0.046	0.72		50	0.33	0.031	0.039	0.79	
	10	0.35	0.033	0.045	0.73		200	0.33	0.031	0.039	0.77	22.7
	20	0.35	0.032	0.043	0.74		373	0.33	0.030	0.038	0.79	
	33	0.34	0.031	0.041	0.76	22.5	510	0.32	0.030	0.037	0.80	23.2
V	0	0.48	0.045	0.045	0.99	23.0						
	0.23	0.36	0.033	0.042	0.78							
	5	0.35	0.032	0.042	0.77	22.9						
	10	0.35	0.032	0.041	0.78	23.0						
	20	0.34	0.032	0.040	0.79							
	33	0.33	0.030	0.038	0.79	22.8						

Lager ohne Keil



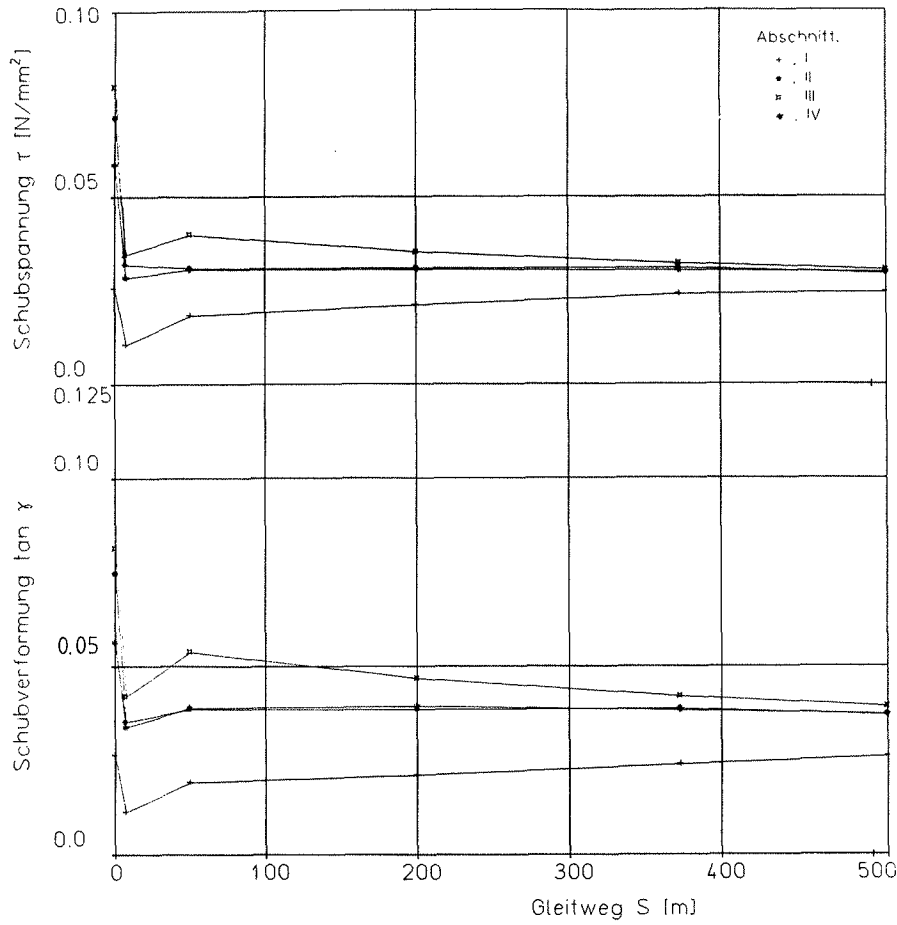
Versuch B2 - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 1: $v = 0.4 \text{ mm/s}$; $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$



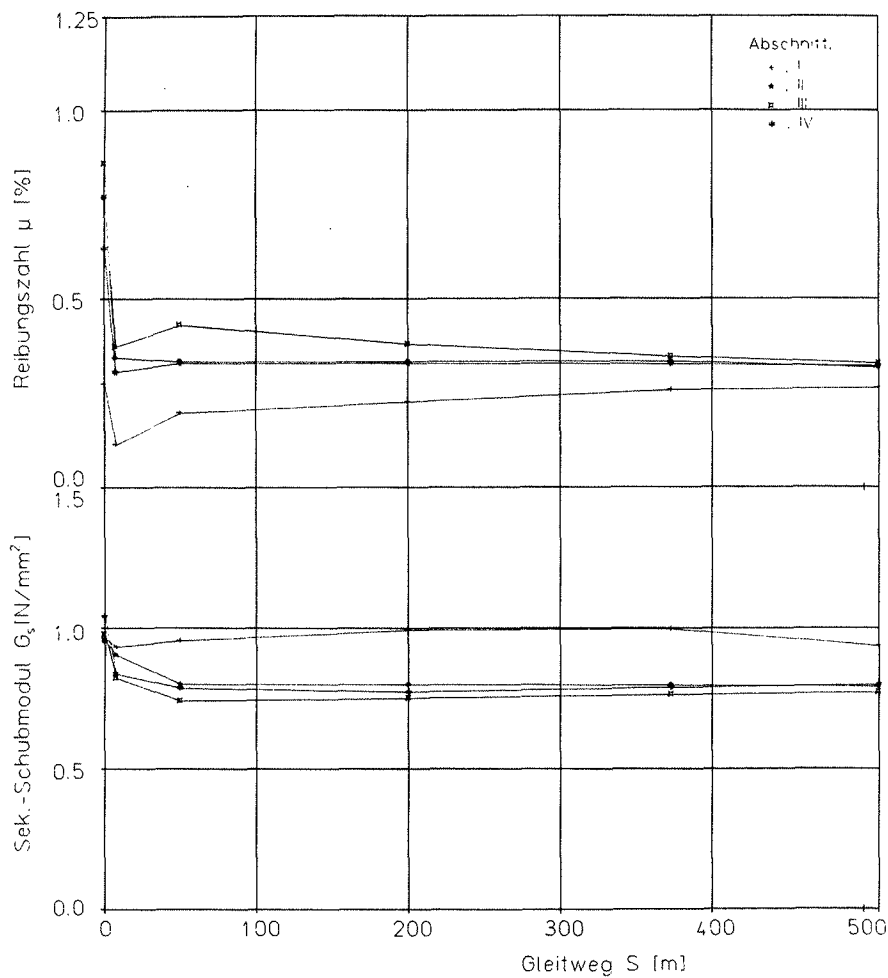
Versuch B2 - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 1: $v = 0.4 \text{ mm/s}$; $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$



Versuch B2 - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 2: $v = 2\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 75\text{mm}$

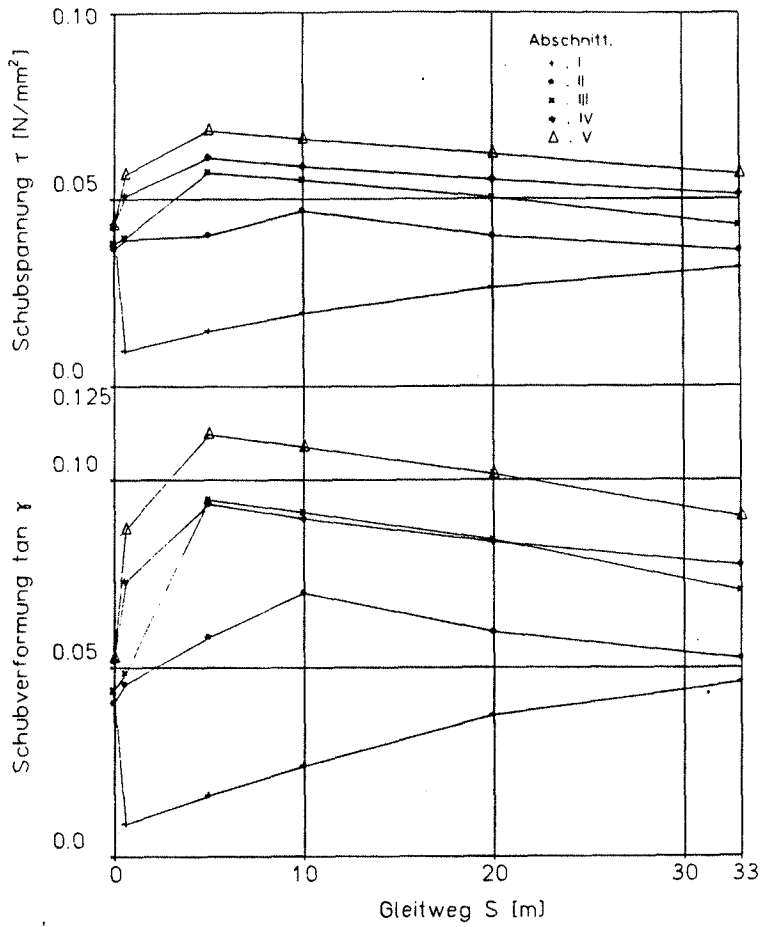


Versuch B2 - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 2: $v = 2\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 75\text{mm}$

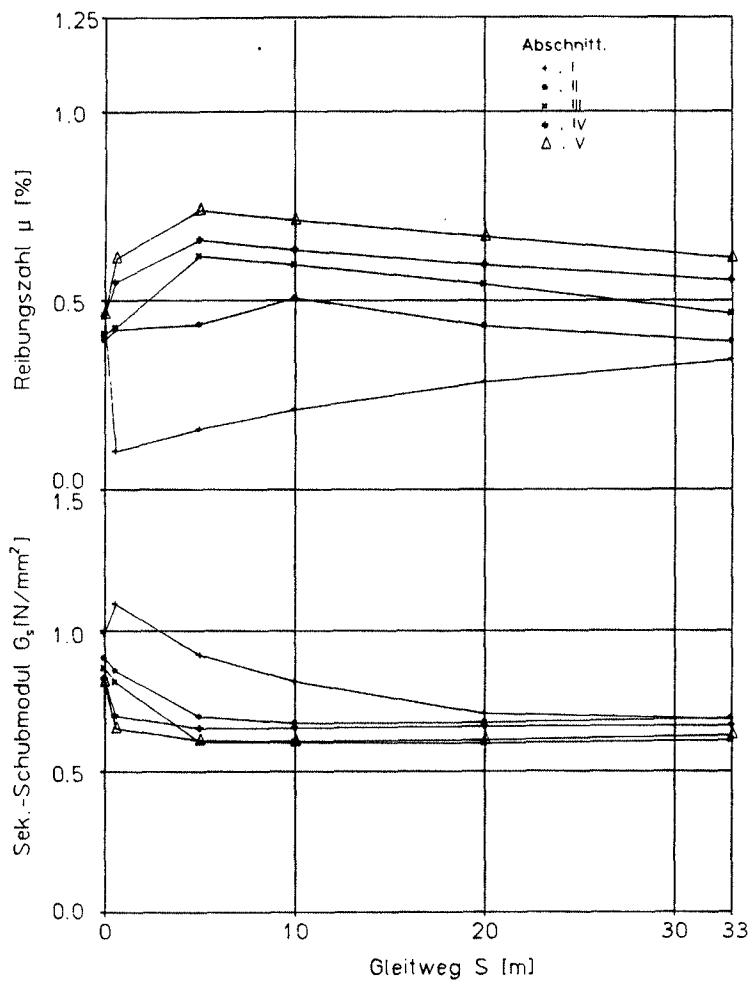
Versuch C - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0												
A b s c h n i t t	Gleiten 1 v = 0.4 mm/s s ₀ = ± 75 mm						Gleiten 2 v = 2.0 mm/s s ₀ = ± 75 mm					
	S [m]	μ [%]	τ [N/mm ²]	tan γ	G _s [N/mm ²]	T [°C]	S [m]	μ [%]	τ [N/mm ²]	tan γ	G _s [N/mm ²]	T [°C]
I	0	0.46	0.042	0.043	0.99	20.7	0	0.53	0.049	0.056	0.87	20.4
	0.23	0.10	0.009	0.008	1.09		0.23	0.24	0.022	0.026	0.83	
	5	0.16	0.015	0.016	0.91		50	0.26	0.024	0.024	0.99	20.8
	10	0.21	0.019	0.024	0.82		200	0.30	0.028	0.028	0.98	21.6
	20	0.28	0.026	0.037	0.70		373	0.30	0.028	0.030	0.93	22.4
	33	0.34	0.032	0.046	0.68	20.4	510	0.31	0.028	0.031	0.91	22.5
II	0	0.40	0.037	0.041	0.90	22.2	0	0.56	0.052	0.063	0.83	22.0
	0.23	0.42	0.039	0.046	0.86		0.23	0.30	0.028	0.037	0.75	
	5	0.43	0.040	0.058	0.69	22.1	50	0.35	0.032	0.044	0.73	22.6
	10	0.51	0.047	0.070	0.67	22.2	200	0.36	0.033	0.045	0.74	23.0
	20	0.43	0.040	0.059	0.67		373	0.35	0.032	0.043	0.75	
	33	0.39	0.036	0.052	0.69	22.0	510	0.33	0.031	0.039	0.80	22.4
III	0	0.41	0.038	0.044	0.87	22.1	0	0.64	0.060	0.077	0.78	21.9
	0.23	0.43	0.040	0.048	0.82		0.23	0.38	0.035	0.048	0.73	
	5	0.62	0.057	0.095	0.60	21.9	50	0.44	0.041	0.054	0.76	22.6
	10	0.59	0.055	0.091	0.60	22.0	200	0.44	0.041	0.054	0.76	22.5
	20	0.54	0.050	0.084	0.60		373	0.43	0.040	0.053	0.76	22.6
	33	0.46	0.043	0.070	0.61	21.9	510	0.41	0.038	0.050	0.76	23.0
IV	0	0.46	0.043	0.052	0.83	22.8	0	0.73	0.067	0.088	0.77	22.7
	0.23	0.55	0.051	0.073	0.70		0.23	0.40	0.037	0.053	0.70	
	5	0.66	0.061	0.094	0.65	22.9	50	0.45	0.042	0.057	0.73	22.9
	10	0.63	0.059	0.090	0.65	22.9	200	0.46	0.043	0.059	0.72	23.1
	20	0.59	0.055	0.083	0.66		373	0.46	0.043	0.060	0.72	22.6
	33	0.55	0.051	0.077	0.66	22.7	510	0.44	0.041	0.056	0.73	22.5
V	0	0.46	0.043	0.053	0.82	22.3						
	0.23	0.61	0.057	0.087	0.65							
	5	0.74	0.068	0.112	0.61	22.0						
	10	0.71	0.066	0.109	0.61	22.1						
	20	0.67	0.062	0.101	0.61							
	33	0.61	0.057	0.090	0.63	21.8						

Lager mit Keil



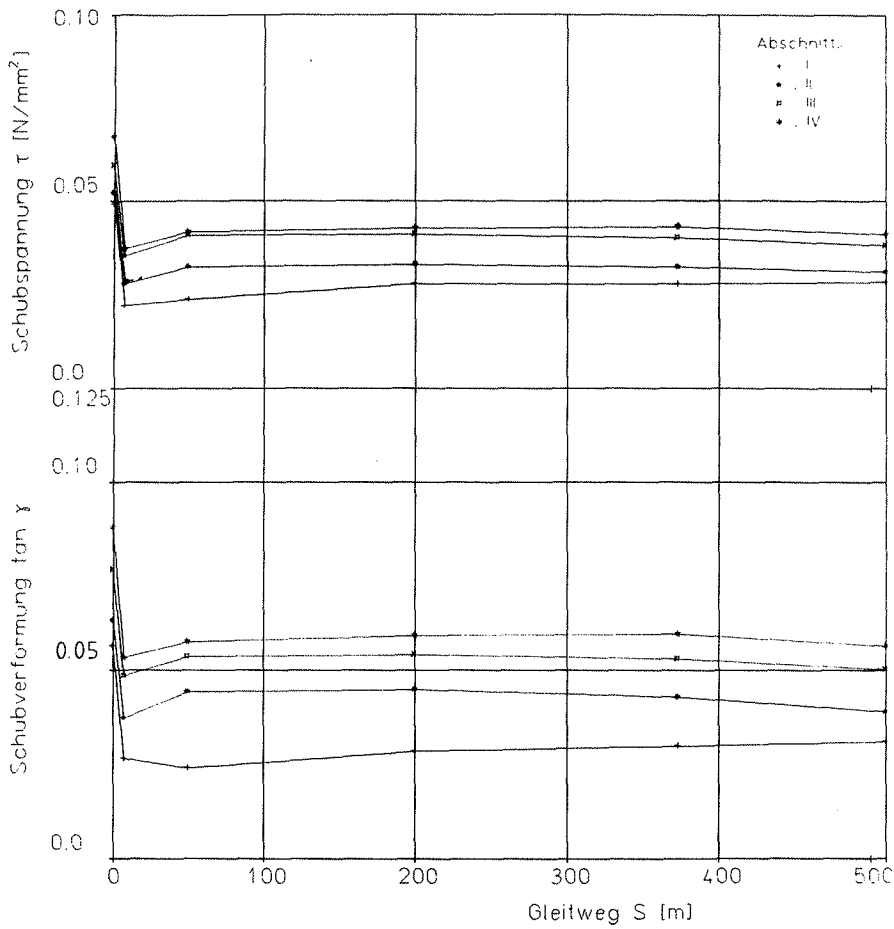
Versuch C - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 1: $v = 0.4 \text{ mm/s}$; $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$



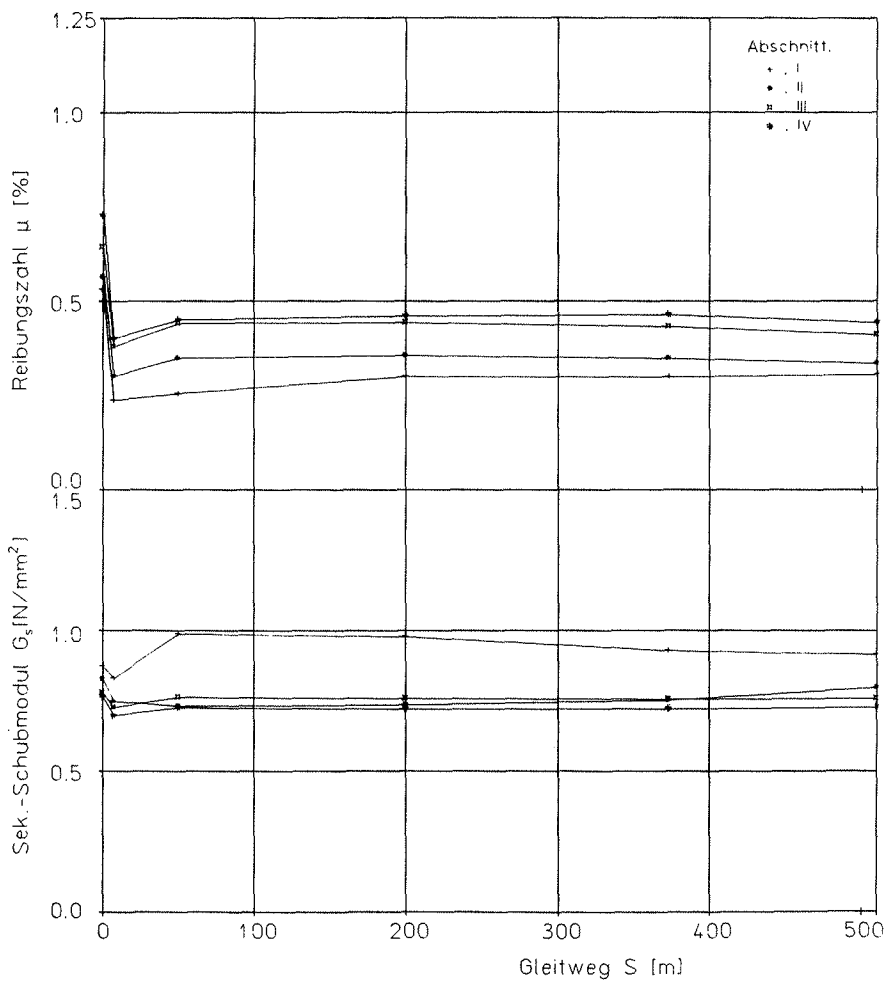
Versuch C - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 1: $v = 0.4 \text{ mm/s}$; $s_0 = \pm 75 \text{ mm}$



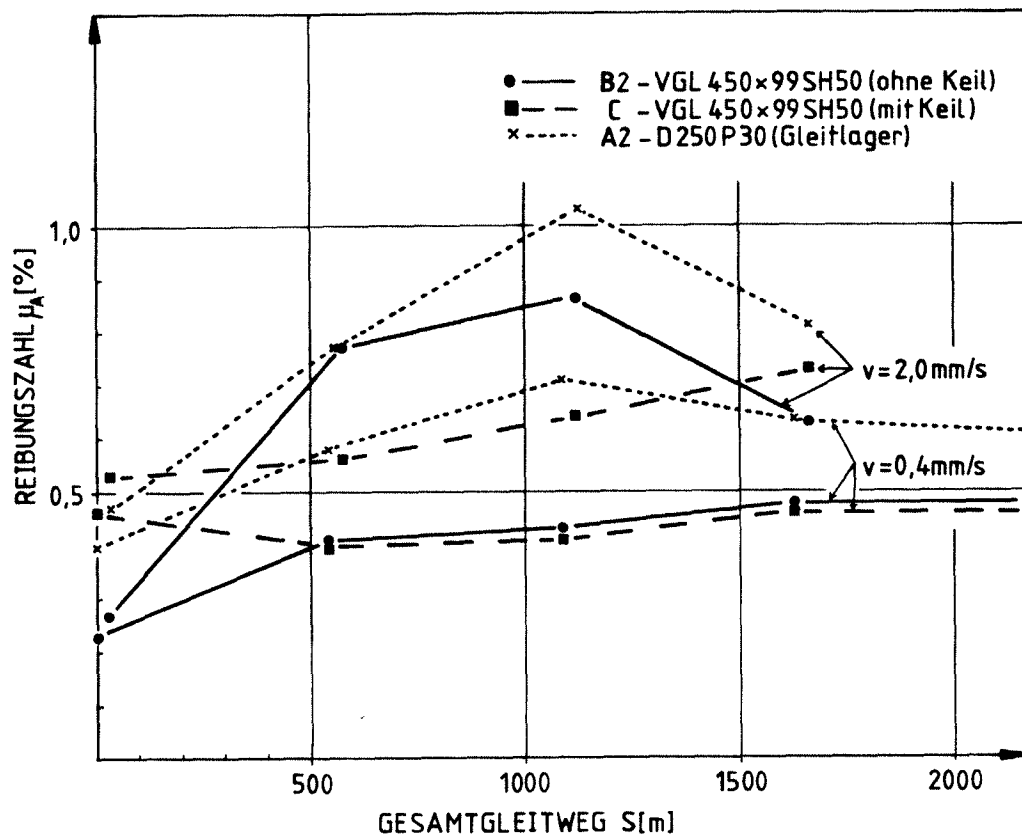
Versuch C - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 2: $v = 2\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 75\text{mm}$



Versuch C - VGL 450x99 SH50 v0.4/2.0

Gleiten 2: $v = 2\text{mm/s}$; $s_0 = \pm 75\text{mm}$

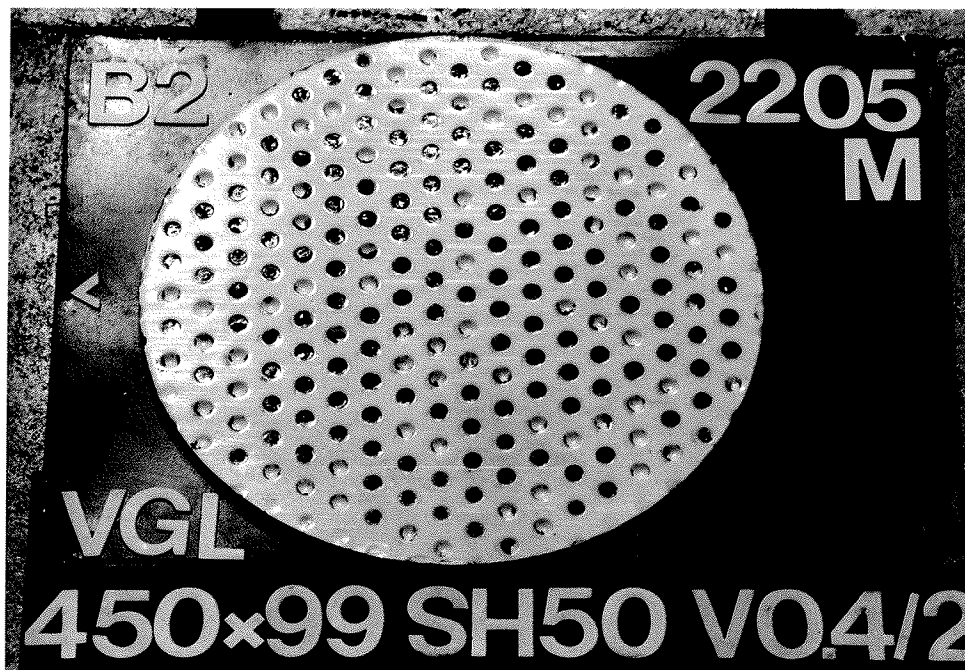
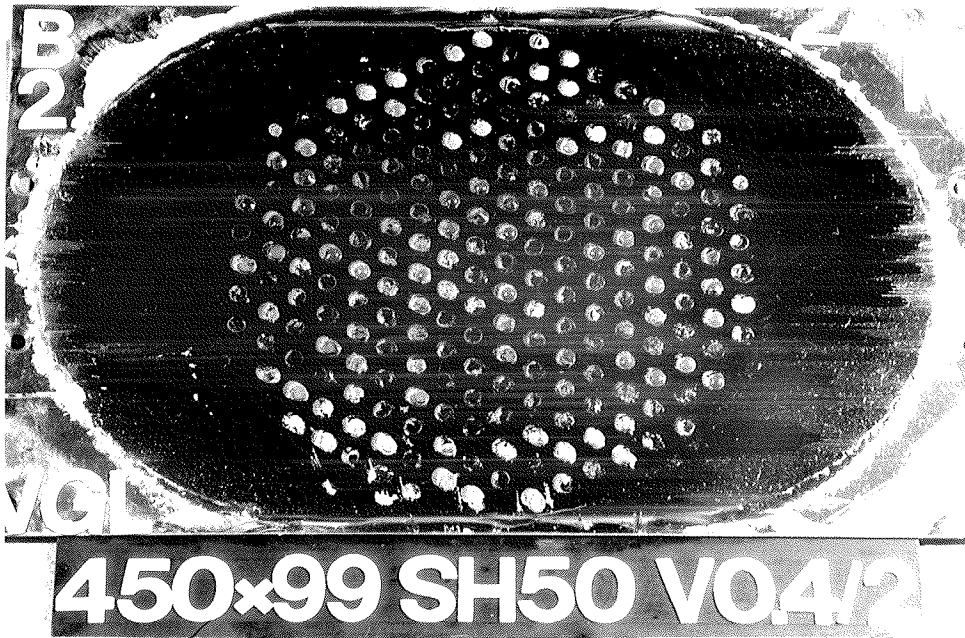


Versuchsreihen A2, B2 und C:

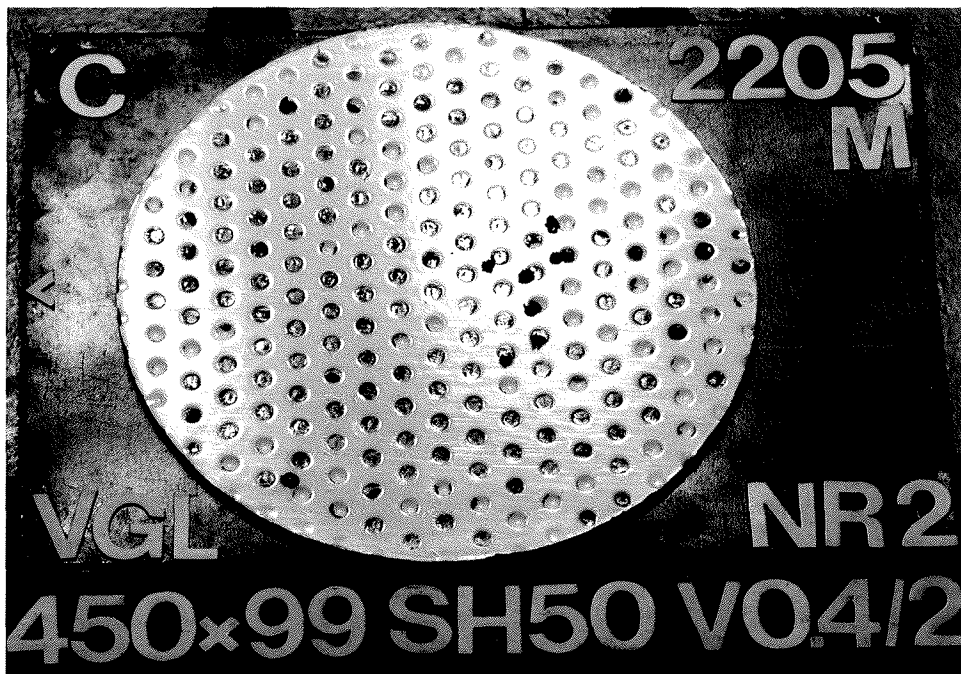
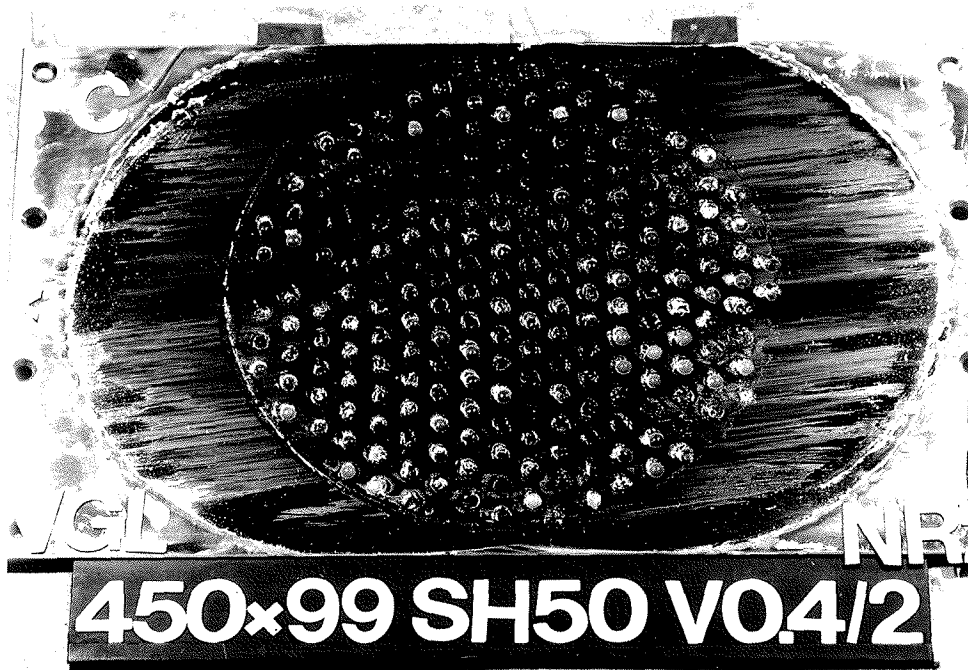
Dauergleitprogrammversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern (A2) sowie Verformungsgleitlagern ohne (B2) und mit Keil (C)

Abhängigkeit der Anfahrreibungszahlen vom Gleitweg für die Versuchsabschnitte mit $v = 0,4$ bzw. $2,0$ mm/s

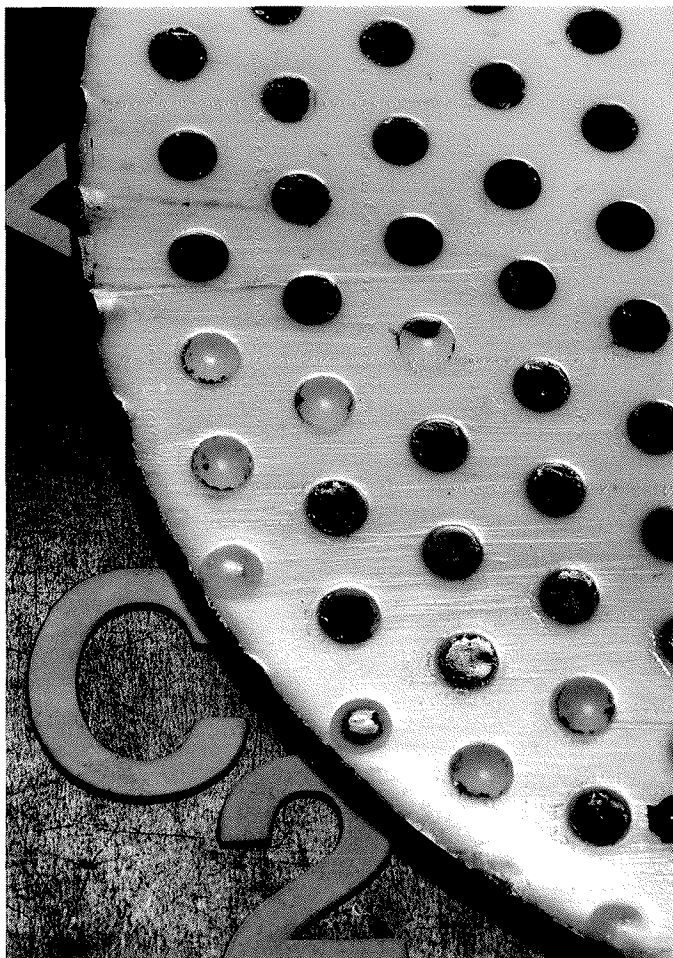
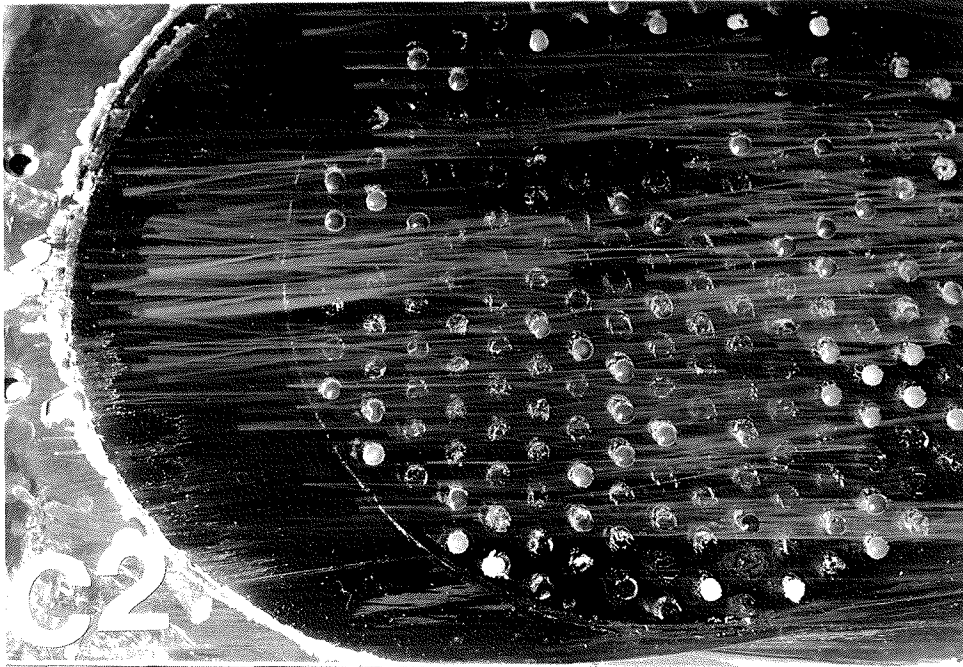
(PTFE- \emptyset 250 mm, mittl. Pressung 30 N/mm², Standzeit ohne Bewegung jeweils 1 Stunde, Keilneigung $0,005$)



Bilder 77 und 78: Verformungsgleitlager B2-VGL 450x99 SH50 V0,4/2,0 (ohne Keil)
Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde mit Verschleißspuren
in Gleitrichtung nach 2205 m Gleitweg
(PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 , Ver-
schiebegeschwindigkeit 0,4 und 2 mm/s, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$)



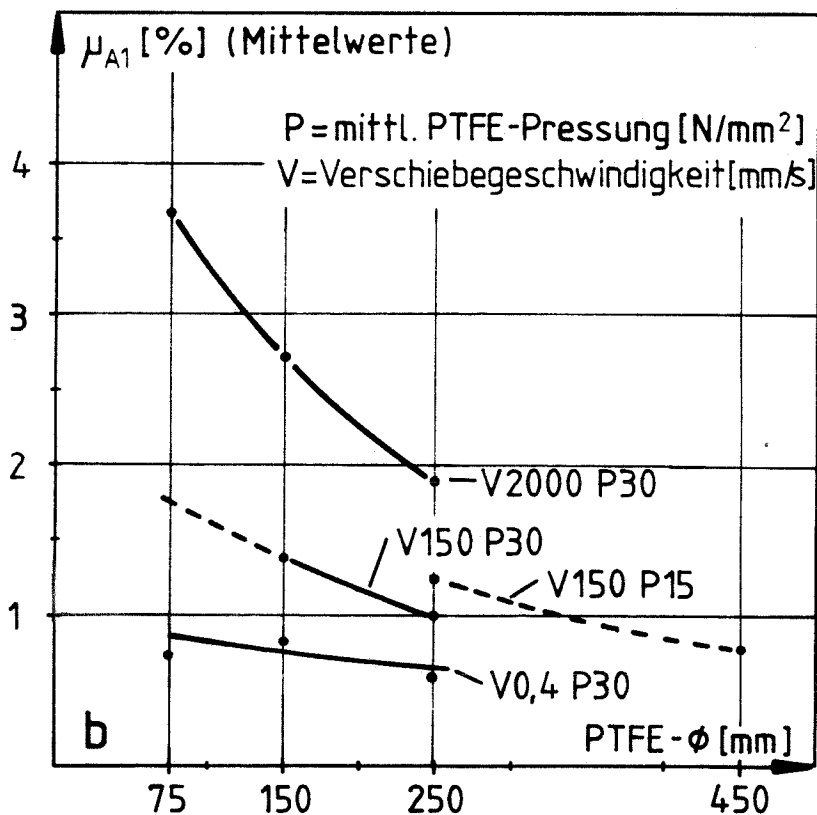
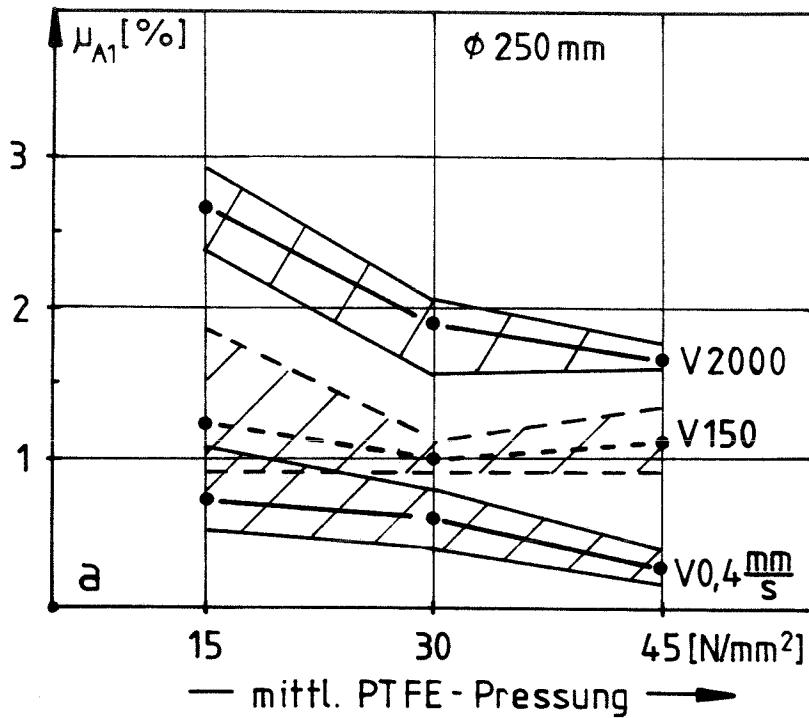
Bilder 79 und 80: Verformungsleitlager C-VGL 450x99 SH50 V0,4/2,0 (mit Keil)
 Aust. Gleitblech und PTFE-Ronde mit Verschleißspuren
 in Gleitrichtung nach 2205 m Gleitweg
 (PTFE-Durchmesser 250 mm, Flächenpressung 30 N/mm^2 , Ver-
 schiebegeschwindigkeit 0,4 und 2 mm/s, Verschiebeweg $\pm 75 \text{ mm}$,
 höhere Pressung infolge Keil am linken Scheibenrand)



unterschiedlich
gerichtete Gleitbahnen
bzw. Verschleiß-
Kratzspuren infolge zu-
sätzlicher Schubaussen-
kungen des Verformungs-
teils quer zur Gleitrich-
tung

Bilder 81 und 82: Detailfoto des Gleitblechs und der PTFE-Ronde des exzentrisch belasteten Verformungsgleitlagers C nach 2205 m Gleitweg (vgl. Anlage 154)

Weitere Versuchsergebnisse und Untersuchungen

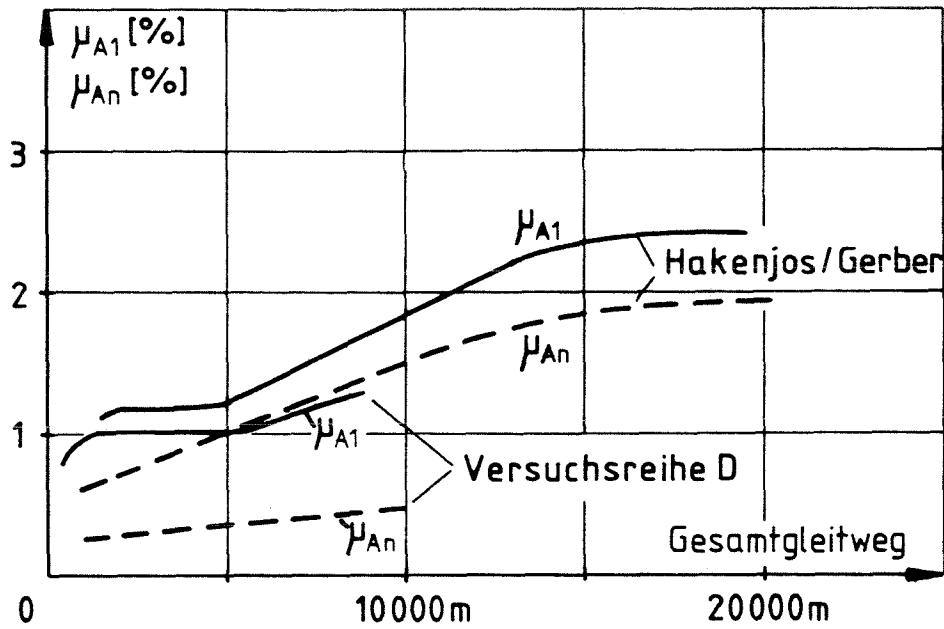


Ergebnisse der Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur an geschmierten Gleitlagern (Versuchsreihe A1):

Abhängigkeit der Anfahrreibung μ_{A1}

a) von der mittleren PTFE-Pressung und von der Verschiebegeschwindigkeit v

b) vom PTFE-Durchmesser und der Verschiebegeschwindigkeit v
(Vorbelastungszeit ohne Bewegung = 1 Stunde)



Abhängigkeit der Reibungszahlen μ_{A1} und μ_{An} vom Gleitweg bei geschmierten Gleitlagern

Vergleich der Versuchsreihe D mit Versuchen von Hakenjos/Gerber [11]

Versuchsparameter		
Versuche	Versuchsreihe D	Hakenjos/Gerber [11]
Versuchsart	Dauergleitprogrammversuche mit abschnittsweiser Variation von:	
	- $v = 0,1$ und 25mm/s - $s_0 = \pm 75$ und $\pm 2,5\text{mm}$	- $v = 0,4$ und 2mm/s - $s_0 = \pm 5$ und $\pm 4\text{mm}$ - Temperatur
Gleitpartner	PTFE aust. Stahl IIIc, mech. nachbehandelt	PTFE aust. Stahl IIIId, ohne Nachbehandlung
Dargestellte Reibungszahlen μ_A für Versuchsabschnitte mit:		
PTFE-Pressung	30 N/mm ²	
Temperatur	Raumtemperatur	
Standzeit ohne Bewegung	bei μ_{A1} (Anfahrreibung): 1 Stunde bei μ_{An} (Bewegungsumkehr): ≈ 0	
PTFE-Durchmesser	250mm	75mm
Verschiebegeschwindigkeit v	25mm/s	2mm/s
Verschiebeweg s_0	$\pm 2,5\text{mm}$	$\pm 4\text{mm}$

Beschreibung von Reibungs- und Verschleißvorgängen an Modellgleitlagern mit Hilfe der Systemanalyse (vgl. DIN 50320)

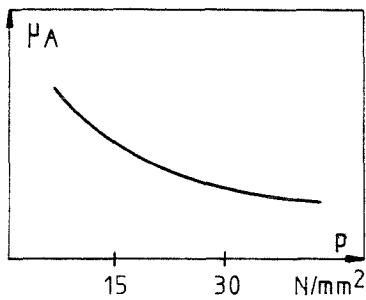
I Struktur des tribologischen Systems Gleitlager			
beteiligte Stoffe bzw. Elemente			
Grundkörper	Gegenkörper	Zwischenstoff	Umgebungsmedium
PTFE mit Schmieraschen	aust. Stahl	Siliconfett	Luft
Stoffeigenschaften: chemisch, physikalisch, mechanisch (Zusammensetzung, Festigkeit, Härte, Viskosität, Feuchte; Alterungs-, Korossions-, Temperaturbeständigkeit, Verträglichkeit)			
Formeigenschaften:			
Oberflächenrauigkeit Oberflächenbehandlung Größe der Kontaktfläche Größe der Schmieraschen Schmieraschenraster Anordnung der Schmieraschen zur Gleitrichtung PTFE-Kammerung		Fettmenge	

II	Einwirkungen: tribol. Beanspruchung
Beanspruchungskollektiv	
Bewegungsform: oszillierendes Gleiten	
Beanspruchungsparameter: - Belastung (Pressung, Pressungsverteilung, Lastexzentrizität) - Temperatur, Geschwindigkeit - Beanspruchungsdauer bzw. Gesamtweg	
Bewegungsablauf: - Verschiebungsamplitude bzw. Eingriffsverhältnis (Kontaktfläche zu überstrichener Lauffläche) - Weg- Zeit- Funktion - Standzeiten ohne Gleitbewegung (Bewegungsunterbrechung, Vorbelastungszeit)	
Vorgeschichte: vorhergehende Beanspruchung	
Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs vom Verwendungszweck bzw. Einsatzort des Lagers (z.B. Brückengleitlager etc.)	

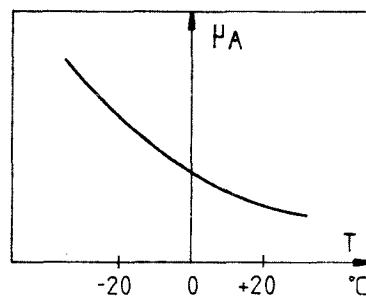
III	Gleitvorgang
Wechselwirkung der Elemente (gegenseitige Beeinflussung) Ablauf von physikalischen und chemischen Prozessen (Verschleißmechanismen)	

IV	Auswirkungen
Verschleißkenngrößen	
Verschleißerscheinungsformen	Tribologische Meßgrößen
Anderung der Oberflächen von Grund- und Gegenkörper - Rauheitsänderungen - örtliche Verschleißspuren in Gleitrichtung - Kratzer - Trockenlaufstellen mit PTFE-Auftrag	Verschleißbetrag: Dicken-, Gewichtsabnahme
	Gleitspaltänderungen PTFE-Oberstand
Verkleinerung der Schmieraschen Wulstbildung am PTFE-Rondenrand	Schmierstoffverbrauch Anderung der Schmierstoffzusammensetzung
Schmierzustand der Gleitflächen (Fettverteilung)	Temperaturänderung
Schmierstoff: - Anreicherung mit Verschleißpartikeln - Verschmutzungsgrad - Verfärbung - Änderung der Viskosität bzw. Konsistenz	Reibungszahl
	a) Anfahrreibung nach gewissen Standzeiten
	b) Reibung bei Änderung der Bewegungsrichtung (mit und ohne Leerlaufspiel) c) Gleitreibung bei Bewegung (a) = max. Größe
Beachte: Auswirkungen abhängig von I, II und III	

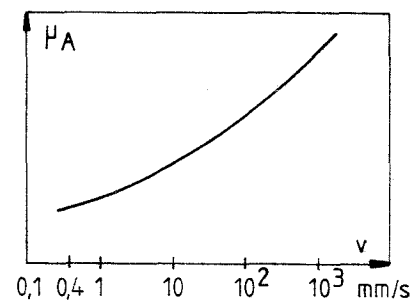
Zusammenstellung und schematischer Verlauf wichtiger Einflußgrößen auf die Anfahrreibrichszahlen von geschmierten Gleitlagern



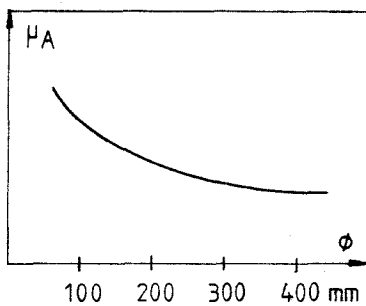
Pressung



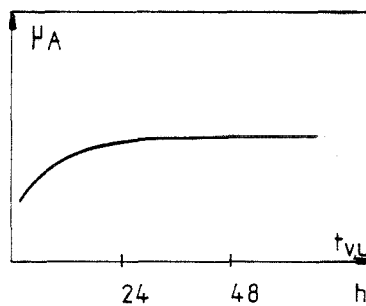
Temperatur



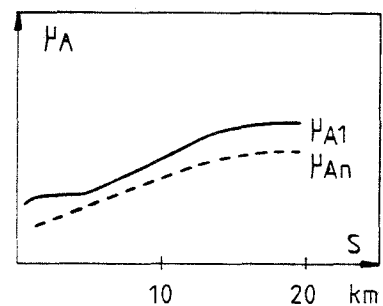
Geschwindigkeit



PTFE-Ø



Standzeit
(ohne Bewegung)



Gleitweg

weitere Einflüsse:

- Oberflächenrauigkeit des Gleitblechs
(Ausgangs- und Zwischenzustand nach Beanspruchung)
- Anordnung des Schmieraschenrasters zur Gleitrichtung
(Nachschmierbereichsfläche der einzelnen Schmieraschen)
- Verschiebungsamplitude beim oszillierenden Gleiten
(Größe des durch Schmieraschen erfaßten Nachschmierbereichs, Fettverbrauch)
- Pressungsverteilung in der Gleitfuge
- Pressungsänderung während Standzeiten ohne Bewegung
- Änderung der Gleitrichtung (z.B. bei allseits beweglichen Lagern)
- Fett: Menge, Verteilung, Zusammensetzung, Anreicherung mit Verschleißpartikeln, Verschmutzungsgrad, Viskosität

Rechnerische Abschätzung einiger Einflußgrößen auf die Anfahrreibungszahlen μ_A von geschmierten Gleitlagern aufgrund von Versuchsauswertungen

Einzeleinflußgröße	Rechenansatz für μ_A	Bezugsfaktor	Vorläufige Größe von b			Gültigkeitsbereich		
			Vorschlag	- von	- bis	von	bis	Dim
Pressung p	$k_p \cdot p^{b_p}$	$f_p = \frac{\mu_{A,p}}{\mu_{A,p_0}} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{b_p}$	-0,7	-0,5	-1,0	10	45	N/mm ²
Temperatur T	$k_T \cdot e^{(b_T \cdot T)}$	$f_T = \frac{\mu_{A,T}}{\mu_{A,T_0}} = e^{b_T(T-T_0)}$	-0,02	-0,015	-0,025	-20	+25	°C
Geschwindigkeit v	$k_v \cdot v^{b_v}$	$f_v = \frac{\mu_{A,v}}{\mu_{A,v_0}} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{b_v}$	-0,10 0,17	—	— ≥ 0,21	-0,01 0,4	0,4 25 (2000)	mm/s
PTFE-Ø	$k_\varnothing \cdot \varnothing^{b_\varnothing}$	$f_\varnothing = \frac{\mu_{A,\varnothing}}{\mu_{A,\varnothing_0}} = \left(\frac{\varnothing}{\varnothing_0}\right)^{b_\varnothing}$	-0,5	—	—	75	-450	mm
Standzeit t_u	$k_s \cdot k_t \cdot e^{-b_s \cdot t_u}$	—	—			—		

Verknüpfung der Einzeleinflüsse:

Voraussetzung: - gleicher aufaddierter Gleitweg S_0
 - gleich lange Vorbelastungs- bzw. Standzeit t_u ohne Gleitbewegung
 - gleiche Vorbeanspruchung der Gleitfläche (Vorgeschichte)

These: $b_p, b_T, b_v, b_\varnothing$ sind voneinander unabhängige Größen (nur für Anfahrreibung)

Rechenansatz: $\mu_{A1} = k_p \cdot p^{b_p} \cdot e^{b_T \cdot T} \cdot v^{b_v} \cdot \varnothing^{b_\varnothing}$

Bezugswert: μ_{A0} bei $p_0, T_0, v_0, \varnothing_0, S_0, t_u$

Berechnungsgröße: μ_A bei $p, T, v, \varnothing, S_0, t_u$; $\mu_A = \mu_{A0} \cdot f_p \cdot f_T \cdot f_v \cdot f_\varnothing$

Bemerkungen und weitere Feststellungen aufgrund von Versuchsergebnissen

Die obigen Ansätze können wegen der Vielzahl der insgesamt möglichen Einflüsse und naturgemäß vorhandenen Streuungen nur zur Trendvorhersage dienen.

Die angeführten b-Werte der Einzeleinflußgrößen wurden aus vorliegenden Versuchen und aus Versuchen aus der Literatur ([1], [11], [13]) bei jeweils konstantgehaltenen anderen Einflußgrößen bestimmt.

Es wird vermutet, daß b_p und b_T relativ wenig vom zurückgelegten Gleitweg abhängen.

b_v ist jedoch stark gleitwegabhängig; der angegebene b_v -Wert von 0,17 wurde aus Kurzzeitversuchen mit $v=0,4, 50, 150, 2000$ mm/s aus den ersten Anfahrwerten nach einstündiger Vorbelastungszeit abgeleitet. Für längere Gleitwege sollte, aufgrund bisheriger Versuche, bis zu etwa $v=25$ mm/s mindestens $b_v=0,21$ verwendet werden.

Wie sich der Faktor b_\varnothing (Einfluß vom PTFE-Ø) über längere Gleitwege verhält, konnte im Rahmen vorliegender Untersuchungen nicht geklärt werden.

Einfluß der Standzeit (Belastungszeit vor Beginn der ersten Bewegung oder bei Bewegungsunterbrechungen):

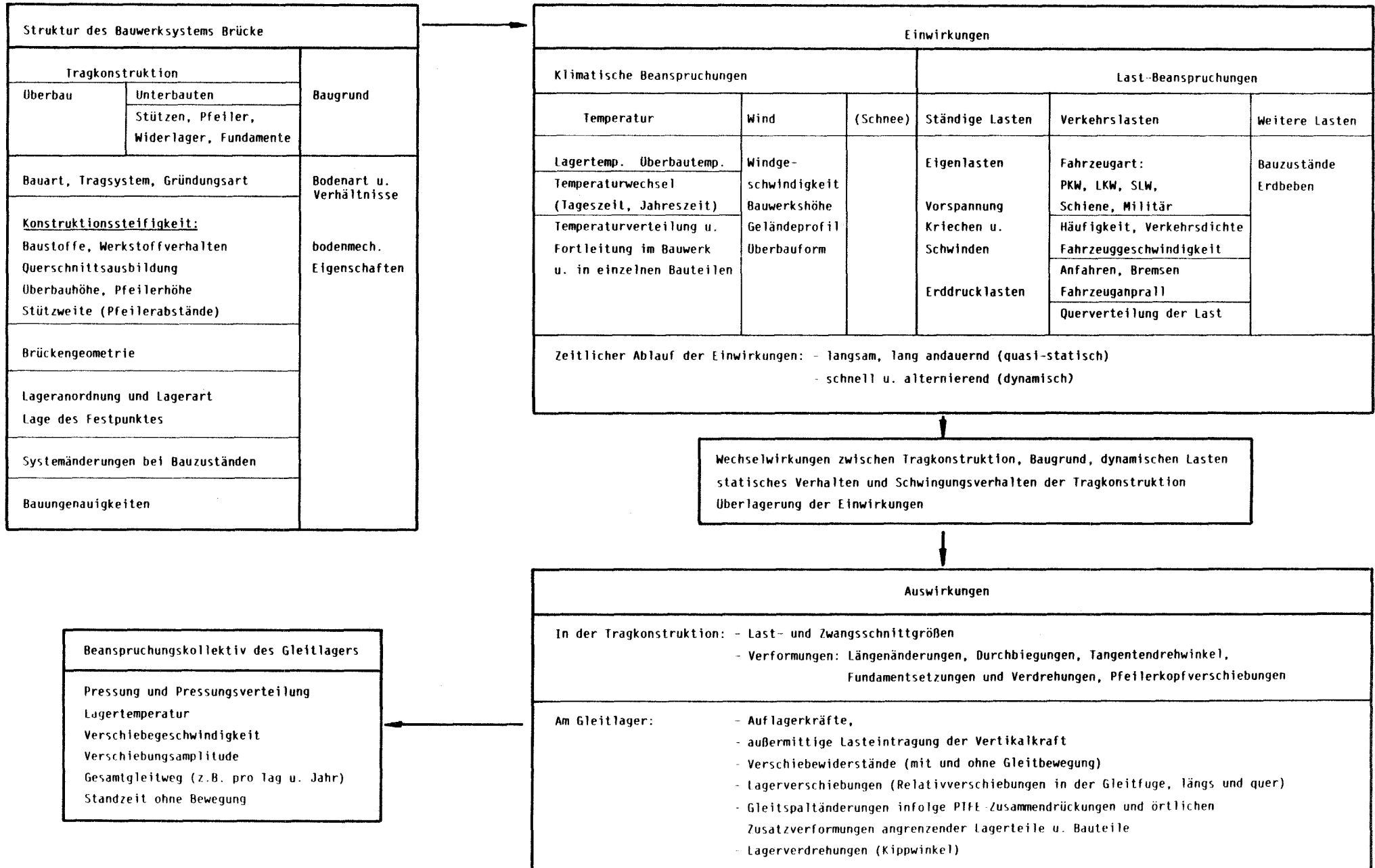
- Bei 24-stündiger Vorbelastungszeit unter konstanter Auflast kann die Anfahrreibung bis zum 2-fachen größer sein als nach einstündiger Vorbelastungsdauer.
- Längere Vorbelastungszeiten als 24 Stunden ergeben nur noch geringe Zunahmen der Reibungszahlen
- Mit wachsendem Gleitweg scheint der Einfluß der Standzeit abzunehmen.
- Pressungsänderungen während der Standzeit führen zur Änderung des Reibungsniveaus:
 Zwischenzeitliche Lagerentlastungen bzw. Pressungsverminderungen ergeben nach Wiederbelastung vorübergehend höhere Reibungszahlen, Pressungserhöhungen mit nachfolgender Teilentlastung wegen Nachschmiereffekten jedoch keine wesentliche Reibungsänderung.

Die Gleitreibungszahlen bei Bewegungsumkehr und während der Gleitbewegung sind i.a. immer kleiner als die Anfahrreibungszahlen nach bestimmten Standzeiten. Die maßgebliche Größe ist daher die Anfahrreibung.

Hinsichtlich der Pressungs- und Temperaturabhängigkeit verhalten sich Gleit- und Anfahrreibung ähnlich, bezüglich der Geschwindigkeits-, Durchmesser- und Gleitwegabhängigkeit wegen gegenseitiger Überlagerung dieser Einflüsse jedoch anders:

So nimmt die Gleitreibung bis zu etwa 10 km aufaddiertem Gleitweg im Temperaturbereich von +20 bis -20°C fast linear mit dem Gleitweg zu und beginnt sich danach zu stabilisieren ([1]). Die Anfahrreibung erreicht bei Raumtemperatur bereits nach etwa 1 bis 2 km Gleitweg ein erstes, nahezu konstantes Reibungsniveau, nimmt nach 5 bis 6 km Gleitweg weiter zu und zeigt nach etwa 15 km Weg stabilisierende Tendenz (vgl. Anlage 157).

Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs eines Brückengleitlagers



ANHANG

- Laborprüfberichte der Lieferfirma und Freigabegrafik der MPA Stuttgart für PTFE weiß, freigesintert (Brückenlagerqualität)
- Überwachungsbescheinigung der MPA Stuttgart und Abnahmeprüfzeugnis B nach DIN 50049 für das Gleitblech aus austenititischem Stahl X5 CrNiMo 1810, Werkstoff-Nr. 1.4401, Gleitfläche mechanisch nachbehandelt
- Laborprüfbericht der Lieferfirma und Freigabegrafik der MPA Stuttgart für das Siliconfett Syntheso 8002 (Brückenlagerqualität)



Prüfbericht für PTFE-Platten
in Brückenlagerqualität
-Güteüberwachung durch die MPA-Stuttgart-

003/82
Kennzahl

Kunde: Inst.f.Massivbau u.Baustofftechnolog., Pf.6380, 7500 Karlsruhe-1
Bestell-Nr.: 06992/Dr.He. vom 7.12.1982
Pampus-Nr.: 2318052 vom 15.12.1982
Bezeichnung: PTFE-Platte mit /~~XXXX~~Xeingepögte (n) Schmieraschen

Stückzahl	Abmessungen in mm	Masseneinheit (Gewicht) in kg
13	∅ 75 x 4,5	0,570
4	∅ 450 x 4,5	6,170

Werkstoffeigenschaften, Anordnung, Form und Abmessungen der Schmieraschen sowie die Plattenabmessungen entsprechen der PN 200/011 - 5

Für die obengenannte Lieferung bestätigen wir, daß die im Rahmen der Eigenüberwachung ermittelten Werte (vgl.Anlage) den in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Gleitlager festgelegten Sollwerten entsprechen.

P A M P U S GmbH

Datum: 23.12.1982

Prüfer: H.Kreuter

Anlage: Prüfbericht der MPA-Stuttgart (1-fach) mit obengenannter Kennzahl.

Laborprüfbericht



Prüfbericht für PTFE-Platten
in Brückenlagerqualität
-Güteüberwachung durch die MPA-Stuttgart-

003/82
Kennzahl

Kunde: Inst.f.Massivbau u.Baustofftechnolog. Pf.6380, 7500 Karlsruhe-1
Bestell-Nr.: 06992/Dr.He. vom 7.12.1982
Pampus-Nr.: 2318052 vom 15.12.1982
Bezeichnung: PTFE-Platte mit /~~XXXX~~Xeingepögte (n) Schmieraschen

Stückzahl	Abmessungen in mm	Masseneinheit (Gewicht) in kg
20	∅ 250 x 4,5	9,600

Werkstoffeigenschaften, Anordnung, Form und Abmessungen der Schmieraschen sowie die Plattenabmessungen entsprechen der PN 200/011 - 5

Für die obengenannte Lieferung bestätigen wir, daß die im Rahmen der Eigenüberwachung ermittelten Werte (vgl.Anlage) den in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Gleitlager festgelegten Sollwerten entsprechen.

P A M P U S GmbH

Datum: 28.12.1982

Prüfer: H.Kreuter

Anlage: Prüfbericht der MPA-Stuttgart (1-fach) mit obengenannter Kennzahl.

Laborprüfbericht

Kennwort: Güteüberwachung von PTFE weiß freigesintert in Brückenlagerqualität

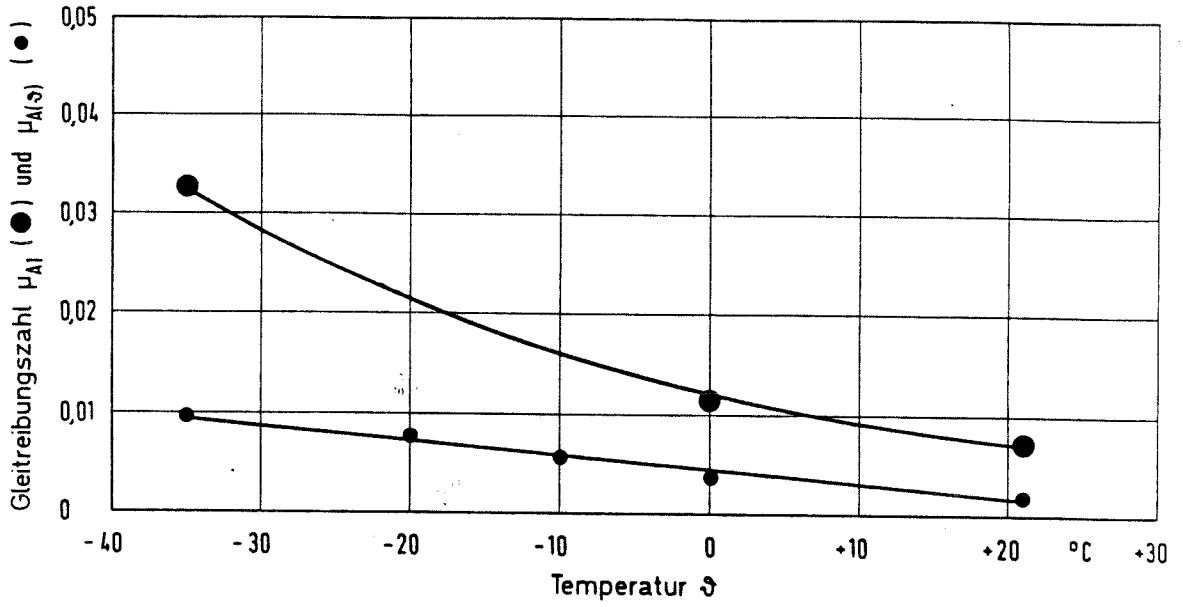


Bild 2: PTFE weiß freigesintert (Brückenlagerqualität) / Hartchrom poliert, $R_{max} = 4 \mu m$ geschmiert mit Schmierstoffspeicherung



Hersteller: Pampus GmbH
Kennzahl: 003/82

freigegeben 1982-08-05

Schmierstoff: Siliconfett (güteüberwachte Brückenlagerqualität)
Vorbelastungszeit $t_v = 1 h$
Flächenpressung $p = 30 N/mm^2$
Gleitweg $s = 10 mm$
Gleitgeschwindigkeit $v = 0,4 mm/s$


PAMPUS FLUORPLAST	Labor-Prüfbericht für PTFE-Platten in Brückenlagerqualität	82/003	Kennzahl
<p>1. Rohmaterial Chargen-Nr. 997013</p> <p>2. Verarbeitetes Material Plattenabmessungen ca. 1200 x 1200 mm</p> <p>3. Prüfbedingungen</p> <p>3.1. Probekörper für die Bestimmung der Rohdichte: Ronden 27 mm \varnothing</p> <p>3.2. Probekörper für die Kugeldruckhärteprüfung: Ronden 27 mm \varnothing</p> <p>3.3. Prüfung bei Normalklima 23/50 DIN 50014</p> <p>3.4. Auswertung nach DIN 53804</p> <p>4. Prüfergebnisse t_s / s^2</p> <p>4.1. Rohdichte dR in g/cm^3 nach DIN 53478, Prüfgerät 6.6.</p> <p>4.2. Reißfestigkeit σ_R in N/mm^2 nach DIN 53455 mit Prüfgeschwindigkeit C Probekörper SPX-Standard PD 105 Dicke mm 2,1</p> <p>4.3. Reißdehnung δ_R in % nach DIN 53455 mit Prüfgeschwindigkeit C</p> <p>4.4. Kugeldruckhärte in N/mm^2 nach DIN 53458 H 132/60</p>		Bezeichnung 1353	Kennzahl
		Kennzahl 003/82	Platte 3
		Einzelwerte	Mittelwert
		2169	2169
		2169	2169
		2169	2169
		38,3	38,7
		37,6	38,7
		41,5	38,7
		39,6	38,7
		36,6	38,7
		380	386
		370	386
		410	386
		400	386
		370	386
		30,2	29,4
		30,2	29,4
		29,2	29,4
		29,2	29,4
		29,2	29,4
		29,7	29,4
		30,2	29,4
		28,7	29,4
		28,3	29,4
		28,7	29,4


5. Prüfdurchführung **25.02.82**
Datum

Prüfer: *F. Juch*

Freigabe:

[Signature]

	Prüfbericht für PTFE-Platten in Brückenlagerqualität	006/82
	-Güteüberwachung durch die MPA-Stuttgart-	Kennzahl
Kunde: Inst.f.Massivbau u.Baustofftechnolog., Pf.6380, 7500 Karlsruhe-1 Bestell-Nr.: 06992/Dr.He. vom 7.12.1982 Pampus-Nr.: 2318052 vom 15.12.1982 Bezeichnung: PTFE-Platte mit /XXXXXeingepögte (n) Schmieraschen		
Stückzahl	Abmessungen in mm	Masseneinheit (Gewicht) in kg
10	∅ 150 x 4,5	1,690
Werkstoffeigenschaften, Anordnung, Form und Abmessungen der Schmier- taschen sowie die Plattenabmessungen entsprechen der PN 200/011 - 5		
Für die obengenannte Lieferung bestätigen wir, daß die im Rahmen der Eigenüberwachung ermittelten Werte (vgl.Anlage) den in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Gleitlager festgelegten Soll- werten entsprechen.		
PAMPUS GmbH	Datum: 23.12.1982	
<i>H.V. Kreuter</i>	Prüfer: H.Kreuter	
Anlage: Prüfbericht der MPA-Stuttgart (1-fach) mit obengenannter Kennzahl.		
Laborprüfbericht		
Pampus GmbH · 4156 Willich-Schiefbahn · W. Germany · Tel. 02154-601 · Telex 8531924 tfe		

	Prüfbericht für PTFE-Platten in Brückenlagerqualität	006/82
	-Güteüberwachung durch die MPA-Stuttgart-	Kennzahl
Kunde: Inst.f.Massivbau u.Baustofftechnolog., Pf.6380, 7500 Karlsruhe-1 Bestell-Nr.: 06992/Dr.He. vom 7.12.1982 Pampus-Nr.: 2318052 vom 15.12.1982 Bezeichnung: PTFE-Platte mit /XXXXXeingepögte (n) Schmieraschen		
Stückzahl	Abmessungen in mm	Masseneinheit (Gewicht) in kg
20	∅ 250 x 4,5	9,600
Werkstoffeigenschaften, Anordnung, Form und Abmessungen der Schmier- taschen sowie die Plattenabmessungen entsprechen der PN 200/011 - 5		
Für die obengenannte Lieferung bestätigen wir, daß die im Rahmen der Eigenüberwachung ermittelten Werte (vgl.Anlage) den in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Gleitlager festgelegten Soll- werten entsprechen.		
PAMPUS GmbH	Datum: 28.12.1982	
<i>H.V. Kreuter</i>	Prüfer: H.Kreuter	
Anlage: Prüfbericht der MPA-Stuttgart (1-fach) mit obengenannter Kennzahl.		
Laborprüfbericht		
Pampus GmbH · 4156 Willich-Schiefbahn · W. Germany · Tel. 02154-601 · Telex 8531924 tfe		

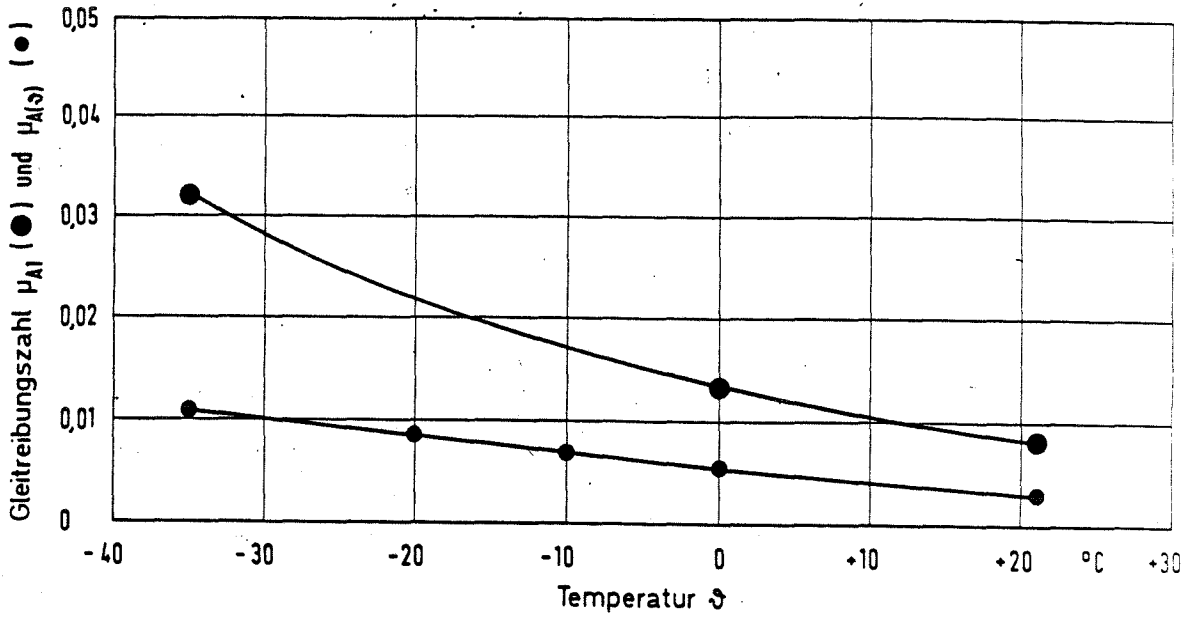


Bild 2: PTFE weiß freigesintert (Brückenlagerqualität) / Hartchrom poliert, $R_{max} = 4 \mu m$ geschmiert mit Schmierstoffspeicherung

Hersteller: Pampus GmbH
Kennzahl: 006/82

freigegeben 1982-10-28

Schmierstoff: Siliconfett (güteüberwachte Brückenlagerqualität)
Vorbelastungszeit $t_v = 1 h$ Gleitweg $s = 10 mm$
Flächenpressung $p = 30 N/mm^2$ Gleitgeschwindigkeit $v = 0,4 mm/s$



Dr. Brendel/Heller/Gutzeit 2/1/82

PAMPUS FLUORPLAST	Labor-Prüfbericht für PTFE-Platten in Brückenlagerqualität	006/82	Kennzahl																																																																								
1. Rohmaterial Chargen-Nr. 167023 Bezeichnung 1353																																																																											
2. Verarbeitetes Material Plattenabmessungen ca. 1200 x 1200 mm		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Kennzahl</td> <td>4</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>006/82</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Kennzahl	4	3	006/82																																																																				
Kennzahl	4	3																																																																									
006/82																																																																											
3. Prüfbedingungen 3.1. Probekörper für die Bestimmung der Rohdichte: Ronden 27 mm \varnothing 3.2. Probekörper für die Kugeldruckhärteprüfung: Ronden 27 mm \varnothing 3.3. Prüfung bei Normalklima 23/50 DIN 50014 3.4. Auswertung nach DIN 53804																																																																											
4. Prüfergebnisse 4.1. Rohdichte ρ_R in g/cm^3 kg/m^3 nach DIN 53478; Prüfgerät ρ_R <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"></td> <td style="width: 30%; text-align: center;">Einzelwerte</td> <td style="width: 30%; text-align: center;">Mittelwert</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">2164</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">2164</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">2169</td> <td style="text-align: center;">2166</td> </tr> </table> 4.2. Reißfestigkeit σ_R in N/mm^2 nach DIN 53485 mit Prüfgeschwindigkeit C Probeab SP-Standard, FB 105 Dicke mm 1,9 <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"></td> <td style="width: 30%; text-align: center;">37,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">36,3</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">35,0</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">37,4</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">38,2</td> <td style="text-align: center;">36,8</td> </tr> </table> 4.3. Reißdehnung ϵ_R in % nach DIN 53485 mit Prüfgeschwindigkeit C <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"></td> <td style="width: 30%; text-align: center;">360</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">360</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">340</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">360</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">370</td> <td style="text-align: center;">358</td> </tr> </table> 4.4. Kugeldruckhärte in N/mm^2 nach DIN 53496 H 132/60 <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"></td> <td style="width: 30%; text-align: center;">29,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">29,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">30,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">29,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">30,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">29,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">30,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">29,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">28,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">29,2</td> <td style="text-align: center;">29,6</td> </tr> </table>					Einzelwerte	Mittelwert		2164			2164			2169	2166		37,2			36,3			35,0			37,4			38,2	36,8		360			360			340			360			370	358		29,2			29,2			30,2			29,7			30,2			29,7			30,2			29,7			28,7			29,2	29,6
	Einzelwerte	Mittelwert																																																																									
	2164																																																																										
	2164																																																																										
	2169	2166																																																																									
	37,2																																																																										
	36,3																																																																										
	35,0																																																																										
	37,4																																																																										
	38,2	36,8																																																																									
	360																																																																										
	360																																																																										
	340																																																																										
	360																																																																										
	370	358																																																																									
	29,2																																																																										
	29,2																																																																										
	30,2																																																																										
	29,7																																																																										
	30,2																																																																										
	29,7																																																																										
	30,2																																																																										
	29,7																																																																										
	28,7																																																																										
	29,2	29,6																																																																									
5. Prüfdurchführung Datum: 4.8.1982 Prüfer: <i>Frank</i> Freigabe: <i>SL</i>																																																																											



Prüfbericht für PTFE-Platten
in Brückenlagerqualität
-Güteüberwachung durch die MPA-Stuttgart-

005/82
Kennzahl

Kunde: Inst.f.Massivbau u.Baustofftechnolog., Pf. 6380, 7500 Karlsruhe-1
Bestell-Nr.: 06992/Dr.He. vom 7.12.1982
Pampus-Nr.: 2318052 vom 15.12.1982
Bezeichnung: PTFE-Platte mit /~~XXXXX~~eingepreßte (n) Schmieraschen
~~XXXXX~~

Stückzahl	Abmessungen in mm	Masseneinheit (Gewicht) in kg
20	∅ 250 x 4,5	9,600

Werkstoffeigenschaften, Anordnung, Form und Abmessungen der Schmier-
taschen sowie die Plattenabmessungen entsprechen der PN 200/011 - 5

Für die obengenannte Lieferung bestätigen wir, daß die im Rahmen der
Eigenüberwachung ermittelten Werte (vgl.Anlage) den in allgemeinen
bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Gleitlager festgelegten Soll-
werten entsprechen.

P A M P U S GmbH

Datum: 28.12.1982

i.v. Reich

Prüfer: H.Kreuter

Anlage: Prüfbericht der MPA-Stuttgart (1-fach) mit obengenannter
Kennzahl.

Laborprüfbericht

Kennwert: Güteüberwachung von PTFE weiß freigesintert in Brückenlagerqualität

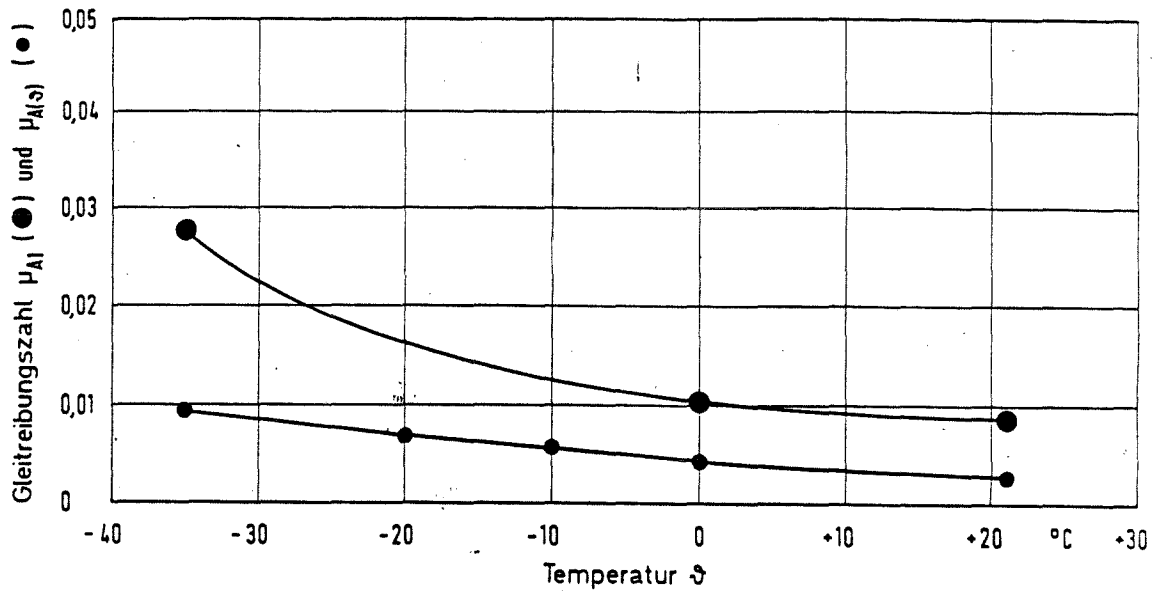


Bild 2: PTFE weiß freigesintert (Brückenlagerqualität) / Hartchrom poliert, $R_{max} = 4 \mu m$ geschmiert mit Schmierstoffspeicherung



Hersteller: **Pampus GmbH**
 Kennzahl: **005/82** freigegeben 1982-10-28
 Schmierstoff: **Siliconfett (güteüberwachte Brückenlagerqualität)**
 Vorbelastungszeit $t_v = 1 h$ Gleitweg $s = 10 mm$
 Flächenpressung $p = 30 N/mm^2$ Gleitgeschwindigkeit $v = 0,4 mm/s$

φ 70. BRENDL/HELLED/GUTZEIT 24.10.

Universität Stuttgart

 Labor-Prüfbericht für PTFE-Platten in Brückenlagerqualität	Bezeichnung 1353 Kennzahl 005/82	Kennzahl 005/82	Kennzahl 005/82	Kennzahl 005/82
1. Rohmaterial Chargen-Nr. 147037		2. Verarbeitetes Material Plattenabmessungen ca. 1200 x 1200 mm		
3. Prüfbedingungen 3.1. Probekörper für die Bestimmung der Rohdichte: Ronden 27 mm Ø 3.2. Probekörper für die Kugeldruckhärteprüfung: Ronden 27 mm Ø 3.3. Prüfung bei Normalklima 23/50 DIN 50014 3.4. Auswertung nach DIN 53804				
4. Prüfergebnisse		Einzelwerte 2,16 4 2,16 9 2,16 9	Mittelwert 2,16 8	
4.1. Rohdichte ρ_R in g/cm^3 nach DIN 53479, Prüfgerät 6.6		32,9 39,0 36,0 36,8 39,2	36,9	
4.2. Reißfestigkeit σ_R in N/mm^2 nach DIN 53455 mit Prüfgeschwindigkeit C Probekörper SP-Standard FD 105 Dicke mm ca. 2,2		300 340 330 320 320	322	
4.3. Reißdehnung ϵ_R in % nach DIN 53455 mit Prüfgeschwindigkeit C		29,2 28,7 28,7 28,3 28,7 28,3 28,7 28,3 28,3	28,6	
4.4. Kugeldruckhärte in N/mm^2 nach DIN 53455 H 132/60				
5. Prüfdurchführung Datum: 9.6.82		Prüfer: <i>Klaus</i>	Freigabe: <i>[Signature]</i>	

**Staatliche
Materialprüfungsanstalt
Universität Stuttgart**

**MPA
STUTT GART**

Staatl. Materialprüfungsanstalt 7 Stuttgart 80 (Vaihingen) Pfaffenwaldring 32

Durchwahl 784- 2562

Glacier GmbH - Deva Werke
Postfach 1160

Zweckbestimmung

3570 Stadttallendorf 1

Mit $R_{max} < 0,5 \mu m$ (vgl. Beilage 2) und 205 HV 1 sind die Forderungen an Gleitbleche für allgemein bauaufsichtlich zugelassene Brückenlager bezüglich der mechanisch-technologischen Kennwerte gemäß Punkt 1,2 der "Bedingungen für Herstellung und Güteüberwachung von PTFE-Gleitlagern - Stand Februar 1978 -" erfüllt-

Der Direktor

Ihre Zeichen	Ihre Nachricht vom	Unsere Zeichen	7 Stuttgart 80 (Vaihingen)
WG/SH	1982-11-19	991 051-27 Ge/Hks	25. November 1982
Betreff			

(gez.) I. A. Hakenjos

Oberflächen- und Härteprüfung an mechanisch
behandeltem Gleitblech
Überwachungsvertrag von 1977-07-01



An dem in der 47. Woche 1982 bei uns eingegangenen Abschnitt
150 mm x 150 mm x 2,5 mm aus der Gleitblechlieferung der
Firma Eduard Hueck, Lüdenscheid

X 5 CrNiMo 18 10, Werkstoff-Nr. 1.4401
gemäß Abnahmeprüfzeugnis B nach DIN 50 049
vom September 1982, vgl. Beilage 1
ursprüngliche Oberfläche in Ausführungsart III c
(kaltgewalzt)
einseitig, d. h. Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert,
mit Papierschutzfolie beklebt
Lieferumfang 20 Tafeln 1250 mm x 2500 mm x 2,5 mm

wurde von uns Oberflächenfeingestalt sowie Oberflächenhärte
(Kleinlasthärte) überprüft.

Beilagen: 2
ausgefertigt: 1 x Glacier GmbH - Deva Werke

GLACIER GMBH-DEVA WERKE
Eing. 11. SEP. 1982

HUECK

EDUARD HUECK LÜDENSCHIED
Metallwerk- und Presswerk
Gegründet 1814

14/1982

Standort: Postfach 458 D-7040 Ludwigsort

GLACIER GmbH
Deva Werke
Schulstraße 20

3570 Stadallendorf 1

*ju 11.6.
10.10.82 - 11.11.82
2.31-20*

Unser Zeichen

ju/av vk.

Verwaltung im Werk Lohr Straße
Farnfeld 102350-10-1
Famachreiber 828948
Drehwerk Hueck Ludenschied
Deutsche Bank Ludenschied
(BLZ 458 700 08) 2237038
S.W.I.F.T. Code DEUT DE 001 450
Landeserbsparbank Ludenschied
(BLZ 458 000 00) 458 080 48
Postcheck Köln (BLZ 370 100 50) 32 84-508

Durchwahl Nr. 191- 236

Lüdenschied

Sept. 82

MPA STUTTGART
DATUM : 82-11-24
PRÜFER : GERBER
WERKST. : AUST. 2.5
NR. : 351-27
TASTER : TKE 100

UT = 3.5 MM/S
LT = 04.8 MM

RT = 0.460MYN
RM = 0.422MYN
RZ-D = 0.292MYN
RA = 0.030MYN

UU 20000 MO SHVM
UH 20 11 500MYN
LC = 0.8 MM

Abnahmeprüfzeugnis B nach
DIN 50049 -- 3,1 B

gemäß Originalzertifikat unseres
Rohblechvorlieferanten

Ihre Bestellung : vom: 25.08.1982
Unsere Auftr.-Best. : 26262/W vom: 26.08.1982
Unsere Rechnung-Nr. : 26262/W vom:
20 Stck. 2500 x 1250 x 2,5 mm

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti
0,024	1,35	0,42	0,02	0,003	10,54	16,64		

D ₂ Grenze Rp 0,2 N/mm ²	1%-Grenze Rp 1% N/mm ²	Zugfestigk. Rm N/mm ²	Bruchdehn. A ₁ - 80 mm %	A ₅ %
335	365	590		57,2

Härte	Rauhtiefe Rt y	Interkristalline Korrosion
>130HB	max. < 1,0 µm	beständig

EDUARD HUECK

Kennzeichnende Oberflächen-
profilaufnahme des Gleit-
bleches aus austenitischem
Stahl X5CrNiMo 18 10, Ober-
fläche mechanisch behandelt

Abnahmeprüfzeugnis B nach
DIN 50 049 vom September 1982

Glacier-Deva Bescheinigung
Nr. 14/82

Rauhtiefe der Gleitfläche
R_{max} < 0,5 µm





Chargen-Nr./Kennzahl

68901/20

Deventer GmbH & Co.
Postf. 40 04 60 · Monatsplatzstr. 14
8000 München 40
Telefon (089) 363001

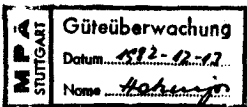
LABOR-PRÜFBERICHT

für Schmierstoffe in Brückenlagerqualität

Betreff: Prüfung von Schmierstoffen für die Verwendung in Gleitlagern im Brücken- und Hochbau, vgl. allgemein bauaufsichtliche Zulassungen des Instituts für Bautechnik, Berlin

Produkt-Bezeichnung: Siliconfett SYNTHESO 8002
Spezial-Siliconfett mit Li-Konsistenzgeber
Lieferant: DEVENTER KG München
Chargenumfang: 500 kg

Prüfergebnisse:	Einheit	Sollwerte	Istwerte
1. Ruhenpenetration bei 25°C DIN 51 804	0,1 mm	240 - 280	<u>240</u>
2. Walkpenetration bei 25°C DIN 51 804	0,1 mm	265 - 295	<u>275</u>
3. Tropfpunkt DIN 51 801/Blatt 1	°C	≧ 180	<u>213</u>
4. Ölabscheidung nach 24 h bei 100°C FTMS 791 B-321	Gew.-%	≧ 3	<u>0,6</u>
5. Oxydationsbeständigkeit nach 100 h bei 160°C DIN 51 808, Druckabfall	N/mm ²	≧ 0,1	<u>0,09</u>
6. Pour-Point des Grundöles DIN 51 597	°C	unter - 60	<u>< - 60</u>
7. IR-Spektrum	Nr.	entsprechend Nr. 241/73	<u>entspricht</u>



Datum

9.12.82

Sachbearbeiter

[Signature]

Laborleiter

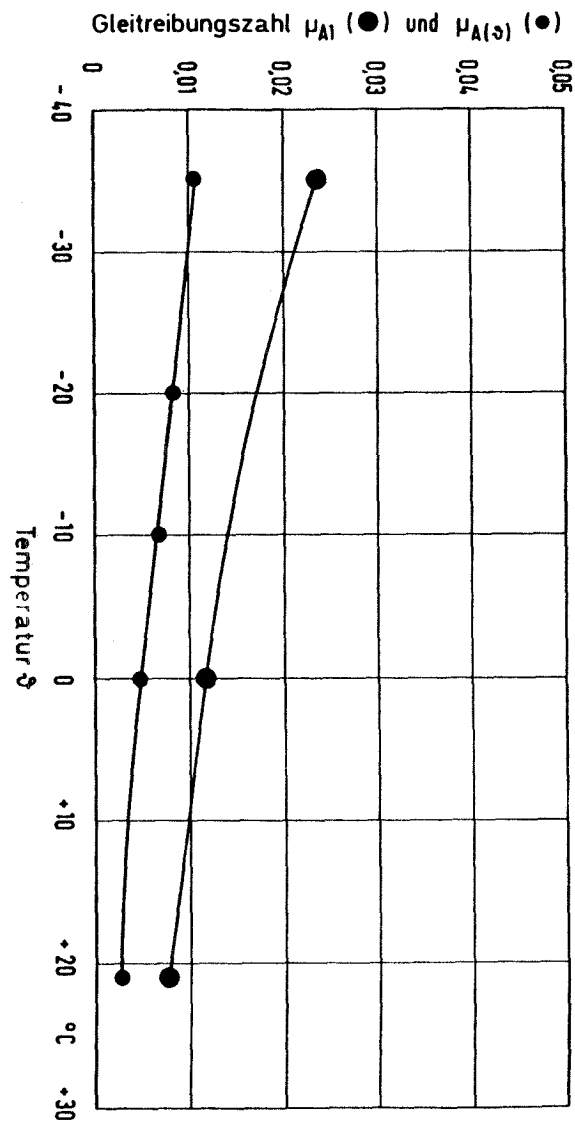
[Signature]



Bild 21: PTFE weiß freigesintert (Brückenlagerqualität) / Hartchrom poliert, R_{max} = 4 µm
geschmiert mit Schmierstoffspäicherung
Schmierstoff: Siliconfett Syntheso 8002 (Brückenlagerqualität)
Lieferant: Deventer GmbH & Co
Kennzahl: 68901/20
Vorbelastungszeit t_v = 1 h
Flächenpressung p = 30 N/mm²
freigegeben 1983-01-26
Gleitweg s = 10 mm
Gleitgeschwindigkeit v = 0,4 mm/s

Deventer GmbH & Co.
Postf. 40 04 60 · Monatsplatzstr. 14
8000 München 40
Telefon (089) 363001

Kennwert: Güteüberwachung von Schmierstoff in Brückenlagerqualität



Universität Stuttgart