

Langzeit-Reibungs- und Verschleiss-  
versuche mit PTFE-Gleitlager,  
Gleitpartner austenitischer Stahl  
in Ausführungsart III d

**T 1360**

T 1360

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Staatl. Materialprüfungsanstalt · Pfaffenwaldring 32 · 7000 Stuttgart 80 (Vaihingen)

Forschungsbericht aus dem Bauforschungsbereich  
des Instituts für Bautechnik in Berlin

LANGZEIT-REIBUNGS- UND VERSCHLEISSVERSUCHE MIT PTFE-GLEITLAGERN,  
GLEITPARTNER AUSTENITISCHER STAHL IN AUSFÜHRUNGSART IIID

Dr.-Ing. Volker Hakenjos  
Dipl.-Ing. Armin Gerber

Staatliche Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart

Forschungsauftrag IV/1-5-347/82  
Forschungsvertrag von 1982-06-29  
Forschungsbericht von 1984-09-06

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	2
2. Entwicklung der Prüftechnik	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Tribologisches System Brückenlager	5
2.3 Prüftechnik	7
3. Versuchseinrichtung	8
4. Stoffe und Probekörperabmessungen	9
5. Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung	11
6. Versuchsergebnisse	14
6.1 Untersuchungsphase I bis IV Dauergleitreibungsversuch bei $p = 30 \text{ N/mm}^2$	15
6.2 Untersuchungsphase V Einfluß der Flächenpressung ( $p = 10/20/30/45 \text{ N/mm}^2$ )	19
6.3 Untersuchungsphase VI Einfluß von Bewegungsunterbrechung	20
6.4 Aussehen und Beurteilung des Modellagers nach dem Versuch	21
7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	23
8. Literatur	25
9. Tafeln und Bilder	27

## 1. Einleitung

Infolge Wärmedehnung des Überbaus sowie Durchbiegung aufgrund Verkehrsbelastung entstehen in Auflagern von Brückenbauwerken Relativbewegungen, die sich im Laufe der Lebensdauer eines Lagers zu mehr oder weniger großen Gesamtwegen aufaddieren. Neben Werkstoff und Konstruktion des Überbaus bestimmen Position des Lagers in Bezug auf den Festpunkt, Verkehrsbelastung des Bauwerks, wie auch standortbedingte Witterungseinflüsse die Größe der Lagerbelastung. Dabei sind vor allem in PTFE-Gleitlagern Veränderungen des Reibungsverhaltens in Abhängigkeit vom aufaddierten Gleitweg für die Lebensdauer des tribologischen Systems Brückengleitlager von ausschlaggebender Bedeutung. Nach Angabe von bauenden Verwaltungen, Statikern und Lagerherstellern ist in stark befahrenen Brückenbauwerken mit großen aufaddierten Gesamtwegen (bis zu mehreren Kilometern nach relativ kurzer Zeit bei stählernen Eisenbahnbrücken) zu rechnen.

Im Gegensatz zur Reibungszahl bei Rollenlagern ist die Reibungszahl bei Gleitlagern u. a. eine wegabhängige Größe. Dies gilt auch für allgemein bauaufsichtlich zugelassene Lager mit der Gleitpaarung PTFE / Austenitischer Stahl geschmiert mit Siliconfett und Schmierstoffspeicherung.

Kaltbreitbänderzeugnisse aus nichtrostendem Stahl werden u. a. in Ausführungsart IIIc ( $R_{\max}$  2 bis 5  $\mu\text{m}$ ) und IIIId ( $R_{\max} \leq 1 \mu\text{m}$ ) hergestellt. Die in den Zulassungen geforderte Rauhtiefe von 1  $\mu\text{m}$  ist also bei IIIId-Blechen bereits vorhanden und muß bei IIIc-Blechen durch eine mechanische Nachbehandlung (Schleifen und eventuell anschließendes Polieren) erzielt werden.

Es wurden in der Vergangenheit sowohl nicht mechanisch nachbehandelte IIIId-Bleche als auch nach dem sogenannten Laue-Verfahren geschliffene und polierte IIIc-Bleche mit  $R_{\max}$  rd. 0,5  $\mu\text{m}$  sowie geschliffene Avesta-Bleche mit  $R_{\max}$  rd. 1  $\mu\text{m}$  für Brückengleitlager verwendet.

Ergebnisse von Versuchen über rd. 1000 m mit Gleitblechen in Ausführungart IIIId aus verschiedenen Chargen von drei Herstellern sind bekannt. Dabei wurde eine mehr oder weniger starke Verfärbung des in den Schmiertaschen der PTFE-Gleitfläche befindlichen Siliconfettes festgestellt.

Nach Aussage der Stahlhersteller entstehen beim Walzvorgang von Charge zu Charge unterschiedlich viele lose, mikroskopisch kleine Partikel, die in die auf dem Grundmaterial lagernde amorphe Schicht eingewalzt werden. Man geht davon aus, daß insbesondere diese Partikel infolge Schubbeanspruchung der stählernen Gleitfläche bei der Relativbewegung aus der Grenzschicht herausgelöst und sowohl in der tragenden PTFE-Gleitfläche eingebettet als auch in dem in den Schmiertaschen befindlichen Siliconfett abgelagert werden. Beim Gleitvorgang wird der Schmierstoff in den Schmiertaschen mehr oder weniger gewalzt und durch die aus der amorphen Grenzschicht herausgelösten Partikel verfärbt, wobei der Grad der Verfärbung von der Menge der herausgelösten Partikel abhängig ist.

Die Überprüfung des Gleitreibungsverhaltens in Zulassungsversuchen erfolgte bis 1973/74 über einen aufaddierten Gleitweg von rd. 1000 m. Ab 1974 wurde die Gesamtwegstrecke auf rd. 5000 m festgesetzt und - auch im Hinblick auf extreme Bauwerke - als genügend aussagefähig bezüglich des Nachweises der Brauchbarkeit für PTFE-Gleitlager angesehen. Seit etwa 1980 wird von verschiedenen Seiten die Ansicht vertreten, daß aufgrund eines 5 km-Versuchs das Langzeitverhalten des tribologischen Systems Brückenlager bei gleitender Beanspruchung nicht ausreichend beurteilt werden kann.

Aus diesem Grund wurde 1982-01-21 von der MPA Stuttgart beim IfBt ein Forschungsantrag zur gegenüberstellenden Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens mit mechanisch behandeltem IIIc-Blech (Laue-Blech) und mechanisch nicht nachbehandeltem IIIId-Blech über aufaddierte Gleitwege bis 20 km bei einer spezifischen Belastung von  $30 \text{ N/mm}^2$  gestellt. Das Forschungsvorhaben wurde lt. Vertrag auf die Untersuchung des IIIId-Blech beschränkt.

Obwohl im Zulassungsbescheid die Rede von einer wirksamen Dauerschmierung ist, steht inzwischen fest, das es sich bei der angewandten Konzeption nicht um eine hydrostatische oder hydrodynamische Schmierung handelt, die bei Verwendung des vorgeschriebenen Schmierstoffs und bei ordnungsgemäßer Schmierung einzig und allein eine für alle denkbaren Anwendungsfälle ausreichende Lebensdauer der Teile eines Gleitlagersystems erwarten lassen.

Bei der vorliegenden Schmierung mit Schmierstoffspeicherung handelt es sich im Grunde genommen um eine einmalige Schmierung, die auch bei einem idealen (stählernen) Gleitpartner nicht in der Lage ist, den Reibungswiderstand über unbegrenzte Wegstrecken auf einem niedrigen Niveau zu halten und den Verschleiß von PTFE zu verhindern. Auch in diesem Fall wird von dem in den Schmiertaschen unter Druck stehenden Siliconfett - im wesentlichen bestehend aus Siliconöl und Lithiumseife - bei statischer Belastung sowohl ohne als auch mit zusätzlichen Relativbewegungen in der Gleitfuge ein Nachspeisen insbesondere von Siliconöl stattfinden. Einhergehend mit dem Verbrauch an Siliconöl muß also zwangsläufig ein Anstieg der Reibungszahlen erfolgen. Dieser Anstieg setzt um so stärker ein, je mehr die Schmierstoffwirkung durch die in der Grenzschicht des stählernen Gleitpartners möglichen Ereignisse - wie vorstehend ausführlich beschrieben - beeinträchtigt wird.

## 2. Entwicklung der Prüftechnik

### 2.1 Allgemeines

Bei der Lagerung moderner insbesondere gekrümmter Brückenbauwerke hat vor allem die Forderung nach allseitiger Beweglichkeit zur Entwicklung des Gleitlagers geführt. Für diesen Anwendungsbereich mit relativ kleinen Bewegungsgeschwindigkeiten hat sich die Gleitpaarung Kunststoff/Metall als besonders geeignet erwiesen. Dabei werden über einen verformungsfähigen Kunststoff mit günstigen Gleiteigenschaften vertikale Lasten nahezu zwängungsfrei und großflächig in den Unterbau übertragen.

Aus dem Bereich der in Betracht kommenden Lagerwerkstoffe wurde nach umfangreichen Versuchsreihen der teilkristalline Thermoplast PTFE (Polytetrafluorethylen) zur Anwendung in allgemein bauaufsichtlich zugelassenen Gleitlagern ausgewählt. Neben der bekanntermaßen guten Witterungs- und Alterungsbeständigkeit nimmt PTFE vor allem wegen seines günstigen Reibungsverhaltens und des für ein gleichmäßiges Tragverhalten notwendigen Verformungsvermögens unter den für Lagerzwecke verwendeten Kunststoffen eine Sonderstellung ein.

Durch Schmierung der Gleitflächen mit bestimmten Siliconfetten läßt sich das Reibungs- und Verschleißverhalten deutlich verbessern und die Reibungszahl über relativ lange Wege auf dem anfänglich niedrigen Niveau halten, das nahezu der Größenordnung entspricht, wie sie seither nur von stählernen Kugel- und Rollenlagern bzw. hydrostatisch oder hydrodynamisch geschmierten metallischen Gleitlagern bekannt war /1, 2/.

### 2.2 Tribologisches System Brückenlager

Die wissenschaftlichen Methoden der Systemanalyse werden in vielen Bereichen der Technik bei der Beschreibung komplexer Vorgänge angewandt. Da Reibung und Verschleiß sich nicht durch Einzeleigenschaften, sondern nur durch die Wechselwirkung der am Prozeß beteiligten Elemente beschreiben lassen, ist das Systemdenken bei der Erfassung tribologischer Vorgänge in den Vordergrund gerückt /3, 4/.



Die bei einem Brückengleitlager unmittelbar an den Abläufen beteiligten Stoffe (PTFE, austenitischer Stahl, Siliconfett und Umgebungsmedium) bilden die Struktur des Tribosystems, auf das das Beanspruchungskollektiv (Belastung, Bewegung und Temperatur) einwirkt, wodurch infolge Wechselwirkung der Elemente Reibung, Oberflächenveränderungen und Verschleiß erzeugt werden.

Das auf ein Brückenlager wirkende Beanspruchungskollektiv hängt wesentlich von der Größe und Ausführung des Bauwerks, von der Position des Lagers (d. h. dessen Entfernung vom Festpunkt sowie Abstand von der neutralen Faser des Brückenüberbaus), der Verkehrsbelastung, den Baugrundverhältnissen, den angrenzenden Bereichen ober- und unterhalb des Lagers sowie den standortbedingten Wetter- und Klimaeinflüssen ab.

Charakteristisches Merkmal bei Brückenlagern ist (hauptsächlich in Bauwerkslängsachse) die hin- und hergehende Bewegung, wobei vor allem in den Umkehrpunkten mit unterschiedlich langen Stillstandszeiten gerechnet werden muß. Dabei überlagern sich die verhältnismäßig langsam ablaufenden Bewegungen infolge Wärmedehnung des Überbaues sowohl zwischen Tag und Nacht als auch zwischen Sommer und Winter den wesentlich schnelleren, aus Verkehrsbelastung resultierenden Bewegungen. Die Belastung ergibt sich als Kollektiv aus ständig wirkenden Lasten (vorwiegend Eigengewicht der Brücke) und überlagerten nicht ständig wirkenden Lasten (z. B. Verkehrslast und Wind). Eine Abschätzung der Verkehrslasten ist selbst für den konkreten Fall nicht ohne weiteres möglich, da sie von der Art und Anzahl der zu erwartenden Einzelfahrzeuge bestimmt wird /5/. Außerdem können sich die Verkehrsverhältnisse im Laufe der Lebenszeit einer Brücke durch Änderung der Verkehrswege oder der Besiedlungsdichte grundlegend verändern. Deshalb wurde in DIN 1072 die maximal mögliche Lastannahme festgelegt.

Für die Lagerbemessung gilt nach den Besonderen Bestimmungen der Zulassungsbescheide für Gleit- und Kalottenlager als zulässige mittlere Pressung in runden PTFE-Flächen für ständige Lasten (Lastfall I)

$p = 30 \text{ N/mm}^2$  und für die Maximalbelastung (Lastfall II)  $p = 45 \text{ N/mm}^2$ . Die zulässigen Kantenpressungen sind bei runden PTFE-Flächen für den Lastfall I auf  $p = 40 \text{ N/mm}^2$  und für den Lastfall II auf  $p = 60 \text{ N/mm}^2$  begrenzt.

### 2.3 Prüftechnik

Bei der Prüfung des Reibungs- und Verschleißverhaltens ist die Wahl des tribologischen Prüfsystems von besonderer Bedeutung, da mit zunehmender Ausschaltung von Einflußparametern auch die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf das Betriebssystem sinkt. Je nach Grad der Übereinstimmung zwischen Prüf- und Betriebssystem lassen sich aufgrund eines Ordnungsvorschlags /6/ schrittweise vereinfachte Prüfsysteme in sechs Kategorien einteilen, wobei die jeweilige Auswahl u. a. auch durch wirtschaftliche Gesichtspunkte mitbestimmt wird.

Tribologische Untersuchungen von Gleitwerkstoffen zur Ermittlung von Reibungszahlen werden nach unterschiedlichen Prüfkategorien durchgeführt. Ausgehend von Versuchen mit einfachen (ringförmigen) Probekörpern und einsinniger umlaufender Bewegung /7, 8/, ist die Prüftechnik schrittweise den in einem Brückenlager ablaufenden tribologischen Vorgängen angepaßt worden. Wesentliche Schritte in Richtung praxisnäherer Prüfung bestanden darin, die Bewegungsart von umlaufender in hin- und hergehende Bewegung zu ändern, die Probenfläche zu vergrößern, eine originalgetreue Schmierung (Schmierstoffspeicherung) anzuwenden /9, 10/. Die Auswirkung von Temperaturänderungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten /11, 12/ läßt sich praxisorientiert durch Anwendung von Temperaturprogrammen im Bereich von Raumtemperatur bis  $\vartheta = -35 \text{ }^\circ\text{C}$  erreichen. Als Arbeitshypothese wird im Vergleich zum Betrieb mit dieser Modellagertechnik durch die weitgehende Funktionstreue eine gute Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse erreicht.

### 3. Versuchseinrichtung

Für den Nachweis der Brauchbarkeit von Gleitwerkstoffen und Schmierfetten für zulassungspflichtige Lager wurde im Rahmen der unter 2.3 dargestellten Prüftechnik eine Versuchseinrichtung /4/ entwickelt, in der im Modellagerversuch das Reibungs- und Verschleißverhalten praxisnah, d. h. unter möglichst gleichen Belastungs-, Bewegungs- und Temperaturverhältnissen wie im betrieblichen Einsatz geprüft werden kann. Dabei werden die (verhältnismäßig) langsamen Bewegungen eines Bauwerks infolge Temperatur mit einem Spindeltrieb und die schnelleren Bewegungen infolge Verkehrsbelastung mit einem Kurbeltrieb nachgeahmt. Das Schema der Versuchseinrichtung sowie Ausführung und Anordnung des Modellagers ist in Bild 1 wiedergegeben. Zwischen den parallelen Anschlußflächen einer 1000 kN-Druckpresse ist oberhalb der Zwischenplatte das Modellager(-Paar) angeordnet. Unterhalb der Zwischenplatte befinden sich zwei feinstgeschliffene Rollenlager aus gehärtetem Stahl X 40 Cr 13, deren Rollwiderstand bei den angewandten vertikalen Belastungen vernachlässigbar klein ist /5/. Bei dieser Anordnung besteht eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Antrieb, Meßglied und Gleitfläche. Das Versuchslager(-Paar) wird von einem Sole-Umlaufkühler über zwei Kühlplatten auf die eingestellte Versuchstemperatur abgekühlt und ist durch eine Elastomerschürze gegen die Umgebung geschützt. Die Messung der in der Gleitfuge herrschenden Temperatur erfolgt über ein Thermoelement unterhalb des Gleitbleches aus austenitischem Stahl.

Wegen der langen Laufzeit von rd. 140 Tagen - bei einem Dauerversuch über rd. 20 km Gesamtgleitweg - wurde eine Sondervorrichtung entwickelt, die es ermöglicht, Versuchsunterbrechungen ohne vollständige Entlastung der Gleitpaarung vornehmen zu können, so daß der Versuch in verschiedenen Etappen durchgeführt werden kann. Die schematische Darstellung der Sondervorrichtung ist aus Bild 2 zu ersehen. Die Vorrichtung bietet die Möglichkeit zwei identische Gleitpaarungen als Gesamtheit zu prüfen und zu einem späteren Zeitpunkt den Versuch mit nur einem der beiden Modellager fortzusetzen. Trotz der relativ grossen Masse der Vorrichtung liegt die Temperiergeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen (z. B. Abkühlungsphase von -20 auf -35 °C) noch bei Werten von rd. 15 °C/h. Diese Abkühlgeschwindigkeit ist nicht kleiner als der im Auflagerbereich eines Bauwerks zu erwartende Wert.

#### 4. Stoffe und Probekörperabmessungen

Die Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens über rd. 20 km Weg erstreckte sich auf Stoffe (Elemente) die für die Verwendung in zulassungspflichtigen Gleitlagern des Brücken- und Hochbaus freigegeben worden sind. Die Probenahme von PTFE und Siliconfett erfolgte jeweils aus Stoff-Chargen, die zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns auch in der laufenden Brückenlagerfertigung verwendet wurden. Das Gleitblech aus austenitischem Stahl in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung) stammt aus Rückstellmustern einer Blech-Charge, die im Güteüberwachungsversuch über einen aufaddierten Gleitweg von 1040 m geprüft und mit der Maßgabe einer mechanischen Nachbehandlung seinerzeit freigegeben worden ist.

Im einzelnen wurden folgende Elemente verwendet:

Grundkörper:

##### 2 Lagerscheiben aus PTFE weiß freigesintert

güteüberwachte Brückenlagerqualität

Hersteller: Pampus GmbH, Willich 3 (Schiefbahn)

Kennzahl: 004/82

Laborprüfbericht der Firma Pampus vgl. Tafel 1

Freigabegrafik der MPA Stuttgart vgl. Bild 3

Durchmesser 75 -0,2 mm, Dicke 4,8 mm

mit eingepprägten Schmiertaschen ( $\varnothing$  8 mm, 1,9 mm tief)  
versetzt auf jeden 2. Punkt eines rechtwinkligen  
Rasters mit 7,5 mm bzw. 13,5 mm Abstand

Rauhtiefe der Gleitfläche  $R_{\max}$  rd. 3  $\mu\text{m}$ , vgl. Bild 4

Gegenkörper:

##### 2 Gleitbleche aus austenitischem Stahl

Hersteller: Krupp Stahlwerke Südwestfalen AG

Werkstoff gemäß Abnahmeprüfzeugnis B nach 50 049

von 1979-06-26 X5 CrNiMo 18 10, Werkstoff.Nr. 1.4401, Tafel 2

Schmelze-Nr. 299 627, Bund-Nr. 73 421

Gleitreibungscharakteristik, ermittelt im Standardversuch  
der Güteüberwachung über 1040 m Gesamtgleitweg, vgl. Bild 5

Abmessungen 120 mm x 110 mm x 1 mm

Oberfläche in Ausführungsart III d

Rauhtiefe der Gleitfläche  $R_{\max} < 1 \mu\text{m}$ , vgl. Bild 6

Oberflächenhärte (Kleinlasthärte) 171 HV 1

Zwischenstoff:

Schmierstoff Siliconfett 300 mittel

güteüberwachte Brückenlagerqualität

konstanter Gleitpartner bei den z. Z. laufenden  
Güteüberwachungsversuchen mit PTFE weiß, austeni-  
tischer Stahl und DU-Verbundwerkstoff

Lieferant: Fuchs Mineraloelwerke GmbH, Mannheim

Kennzahl: 0426/031

Laborprüfbericht der Firma Fuchs vgl. Tafel 3

Freigabegrafik der MPA Stuttgart vgl. Bild 7

## 5. Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Dem Beanspruchungskollektiv wurden die in Grundlagenuntersuchungen sowie in den Zulassungsbescheiden bzw. den "Bedingungen für Herstellung und Güteüberwachung von PTFE-Gleitlagern" festgelegten Daten und Versuchsbedingungen zugrunde gelegt, Tafel 4. Für den Dauerversuch über einen aufaddierten Weg von rd. 20 km wurde die spezifische Standardbelastung von  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  gemäß Lastfall I gewählt.

Nach Abschluß des Dauergleitreibungsversuchs unter  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  wurde zusätzlich der Einfluß der Flächenpressung ( $p = 10$  bis  $45 \text{ N/mm}^2$ ) und der Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  auf das Gleitreibungsverhalten untersucht.

Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurden die Oberflächen der PTFE-Proben und der austenitischen Stahlbleche gründlich mit einem Lösungsmittel gereinigt. Anschließend wurden die Schmiertaschen der PTFE-Scheiben mit Schmierstoff gefüllt und die Gleitflächen des austenitischen Stahls mit einem dünnen Schmierfilm versehen.

Der Versuchsablauf des Hauptversuchs geht aus Tafel 5 hervor. Bis zu einem aufaddierten Gleitweg von 5120 m wurde die aus 11 Versuchsabschnitten bestehende Versuchsphase I mit zwei parallel angeordneten Modellagern (Lager 1 und 2) durchgeführt. Der weitere Verlauf des Versuchs erfolgte mit einem Modellager (Lager 1) in Etappen von jeweils rd. 5000 m Gleitweg in Versuchsphase II bis IV mit weiteren 33 Versuchsabschnitten bis zu einem Gesamtgleitweg von 20480 m.

Der Dauergleitreibungsversuch (Untersuchungsphase I bis IV) wurde in Anlehnung an die praktischen Verhältnisse im Bauwerk (verhältnismäßig langsame Hin- und Herbewegungen aufgrund Wärmedehnung und schnellere Bewegungen aus Verkehrsschwingungen) so gegliedert, daß

zu Versuchsbeginn und dann nach den Versuchsabschnitten RTV (Raumtemperatur-Versuch bei  $\vartheta = +21 \text{ }^\circ\text{C}$ ) über jeweils 1000 m Gleitweg - durchgeführt mit einem Kurbeltrieb bei  $v_m = 2 \text{ mm/s}$  - jeweils ein TTPV (Tieftemperaturprogramm-Versuch bei  $\vartheta = 0/-10/-20/-35/+21 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mit einem Spindeltrieb bei  $v = 0,4 \text{ mm/s}$  über 20 m Gleitweg vorgenommen wurde. Der Temperaturverlauf des Tieftemperaturprogramm-Versuchs sowie der Beginn des Dauerversuchs bis 1040 m Gleitweg ist aus Bild 8 zu ersehen. Beim Wechsel der Antriebsart blieb das Modellager unter der Standardlast. Nach den drei Versuchsunterbrechungen wurde beim Wiedereinbau der Prüfeinrichtung in die Anlage jeweils zuerst mit einem Tieftemperaturprogramm-Versuch als Anschluß der Dauerversuch fortgesetzt. Die vertikale Belastung wurde in mittiger Stellung des Modellagers aufgebracht und mit Hilfe der selbstregelnden Konstanthaltung über die Versuchsdauer gleichbleibend gehalten.

Während der Versuchsunterbrechungen nach dem Ausbau der Sondervorrichtung aus der Prüfmaschine blieben die Lager durch die speziell dafür entwickelte Festhaltekonstruktion mit rd.  $10 \text{ N/mm}^2$  weiterhin verspannt. Die Lager waren damit während des ganzen Versuchszeitraums unter Last stehend.

Ausgehend von der Spalthöhe  $h$  im unbelasteten Zustand wurde die Abnahme der Spalthöhe  $\Delta h$  bzw. das Spaltmaß  $h - \Delta h$  zu Beginn und am Ende jeder Untersuchungsphase (I - IV) ermittelt.

Der Einfluß der Flächenpressung zwischen  $p = 10 \text{ N/mm}^2$  und  $p = 45 \text{ N/mm}^2$  wurde in Untersuchungsphase V im Raumtemperatur- und Tieftemperaturprogramm-Versuch mit dem Spindeltrieb bei  $v = 0,4 \text{ mm/s}$  über jeweils 20 m Gleitweg ermittelt. Mit den Anschlußversuchen ergeben sich bei den 4 verschiedenen spezifischen Belastungen ( $p = 10/20/30/45 \text{ N/mm}^2$ ) 10 weitere Einzelversuchsabschnitte bis zu einem aufaddierten Gesamtgleitweg von 20680 m, vgl. Tafel 6.

Als Abschluß der Gleitreibungsuntersuchung wurde der Einfluß der Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast bei der spezifischen Standardbelastung von  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  und Raumtemperatur nach  $t_u = 24, 64$  und  $120 \text{ h}$  ermittelt.

Das lediglich bis zu einem aufaddierten Gleitweg von rd.  $5000 \text{ m}$  in Untersuchungsphase I gefahrene Lager 2 wurde nicht weiter in die Untersuchung miteinbezogen und steht seither verspannt ( $p = 10 \text{ N/mm}^2$ ) für weitere Untersuchungen zur Verfügung und zwar so lange bis die Sondervorrichtung für andere Versuche benötigt wird.



## 6. Versuchsergebnisse

Entsprechend der Bewegungsart - hin- und hergehende Bewegung - im tribologischen System wurde die statische Gleitreibungszahl

$$\mu_{An} = F_{HAn}/F_V \quad \text{mit } n \text{ als Anzahl der Doppelhübe}$$

d. h. die Haftreibungszahl bei Beginn der Relativbewegung bzw. bei Bewegungsumkehr nach Durchlaufen eines Leerlaufspiels (Spindeltrieb) und nach Überwinden des Totpunktes (Kurbeltrieb) sowie der jeweils niedriger liegende Verlauf der dynamischen Gleitreibungszahl

$$\mu_n = F_{Hn}/F_V \quad \text{mit } n \text{ als Anzahl der Doppelhübe}$$

kontinuierlich aufgezeichnet, vgl. Bild 9. Während des gesamten Versuchs wurde dabei Gleiten ohne jegliche Stick-Slip-Erscheinungen (Ruckgleiten) beobachtet.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden ausschließlich die maßgeblichen statischen Gleitreibungszahlen  $\mu_{An}$  verwendet. Jeweils bestimmten Temperaturen zugeordnete, für diese Temperatur kennzeichnende Reibungszahlen werden unter Angabe des Gleitweges als  $\mu_{A(\vartheta)}$ -Werte<sup>6)</sup> angegeben. Es handelt sich dabei ebenfalls um statische Gleitreibungszahlen und zwar jeweils um den Maximalwert innerhalb einer Temperaturstufe, jedoch ohne Angabe der Doppelhubzahl  $n$ .

---

<sup>6)</sup> Mit dem in Klammern stehenden Buchstaben  $\vartheta$  sind die verschiedenen Temperaturstufen (0/-10/-20/-35/+21 °C) des Tieftemperaturprogramm-Versuchs angesprochen.

6.1 Untersuchungsphase I bis IV  
Dauergleitreibungsversuch bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$

Nach dem in Tafel 5 angegebenen Versuchsplan wurde mit Lager 1 und 2 bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  Flächenpressung im Tieftemperaturprogramm-Versuch (TTPV 1) mit dem Spindeltrieb bei  $v = 0,4 \text{ mm/s}$  im Verlauf von 20 m aufaddiertem Gleitweg zunächst das temperaturabhängige Gleitreibungsverhalten des neuen (jungfräulichen) Modell- bzw. Tribosystems für Temperaturen von  $+21$  bis  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgenommen. Nach einer Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast von  $t_u = 1 \text{ h}$  wurde im Raumtemperatur-Versuch (RTV 1) mit dem Kurbeltrieb bei  $v_m = 2 \text{ mm/s}$  ein Gleitweg von 1000 m aufsummiert und anschließend - wiederum nach  $t_u = 1 \text{ h}$  - die Veränderung der temperaturabhängigen Reibungshöhe infolge des inzwischen größeren zurückgelegten Gleitweges in einem weiteren Tieftemperaturprogramm-Versuch (TTPV 2) ermittelt. Für den Anfang und die Fortsetzung des Dauerversuchs ergibt sich folgendes Schema:

TTPV 1 - RTV 1 - TTPV 2 - RTV 2 - TTPV 3 - RTV 3 - TTPV 4 usw.  
20 m            1000 m    20 m            1000 m    20 m            1000 m    20 m            usw.

Abweichend von diesem Versuchsschema wurde vor Beginn der Untersuchungsphasen II bis IV, d. h. nach dem Ausbau und Wiedereinbau zunächst wiederum ein Tieftemperaturprogramm-Versuch und zwar TTPV 7, 13 und 19 als Anschlußversuch nach Versuchsunterbrechung (unter vertikaler Last von  $10 \text{ N/mm}^2$ ) vorgenommen. Damit teilt sich der gesamte aufaddierte Gleitweg der Untersuchungsphasen I bis IV einschließlich der zusätzlichen drei TTPV-Anschlußversuche auf in

24 Abschnitte TTPV = 480 m Gleitweg  
20 Abschnitte RTV = 20000 m Gleitweg

Kennzeichnende Verläufe der Reibungszahlen  $\mu_{An}$  der Tieftemperaturprogramm-Versuche TTPV und der Raumtemperatur-Versuche RTV der Untersuchungsphasen I bis IV sind in Bild 10 bis 13 wiedergegeben. Die bei Versuchsbeginn und zum Zeitpunkt der Versuchsunterbrechungen gemessenen Spaltmaße  $h - \Delta h$  im Modelllager sind in Tafel 7 angegeben.

Ausgehend von einem Anfahrwert bei  $\vartheta = 0$  °C mit rd. 0,009 und einem Maximalwert in der -35 °C-Phase von rd. 0,01 (TTPV 1) steigt das Reibungsniveau bereits während der ersten 1000 m Gleitweg (RTV 1) deutlich an und erreicht dann bei der dritten stufenweisen Absenkung der Temperatur (TTPV 3) nach rd. 2000 m Gleitweg ein doppelt so hohes Reibungsniveau. Am Ende der Untersuchungsphase I nach rd. 5000 m aufaddiertem Gleitweg liegt die maximale Gleitreibungszahl bei  $\vartheta = -35$  °C knapp über 0,03 (TTPV 6), vgl. Bild 10. Im Verlauf der Raumtemperatur-Versuche bis rd. 5000 m Gleitweg erfolgt eine Erhöhung des Reibungsniveaus von anfänglich rd. 0,003 auf rd. 0,01.

Das Spaltmaß in den beiden Lagern hat sich - ausgehend von der Spalthöhe  $h = 2,2$  mm im unbelasteten Zustand - nach der Belastung mit  $30 \text{ N/mm}^2$ , also vor Beginn der Relativbewegung auf 2,05 mm und im Verlauf der Untersuchungsphase I auf 1,45 mm verringert. Die Abnahme des Spaltmaßes ist im Wegbereich 0 bis 5120 m weniger eine Folge von Verschleiß, als eine Folge der Zusammendrückung und Verformung hauptsächlich im überstehenden PTFE.

Mit Ausnahme des hohen Wiederanfahrwertes als Folge der Versuchsunterbrechung zwischen Versuchsphase I und II zeigt sich im Anschlußversuch TTPV 7 ein gegenüber TTPV 6 praktisch unverändertes Reibungsniveau, vgl. Bild 10 und 11. Im weiteren Verlauf der Untersuchungsphase II nimmt die Reibung insbesondere im Temperaturbereich -35 °C deutlich zu und erreicht nach rd. 10000 m (TTPV 12) bei -35 °C einen Maximalwert von rd. 0,07, liegt also damit mehr als doppelt so hoch wie am Ende der Untersuchungsphase I. Das Reibungsniveau der Raumtemperatur-Versuche steigt wesentlich langsamer an. Als Endwert nach rd. 10000 m Gleitweg wird eine Gleitreibungszahl von rd. 0,015 erreicht.

In der Untersuchungsphase II (Gleitweg 5120 bis 10240 m) hat das Spaltmaß um 0,2 mm abgenommen und beträgt jetzt noch 1,35 mm.

Im Anschlußversuch TTPV 13 zu Beginn der Untersuchungsphase III ergibt sich in der Temperaturstufe  $-35^{\circ}\text{C}$  ein deutlich niedrigeres Reibungsniveau als beim TTPV 12, vgl. Bild 11 und 12. Im weiteren Verlauf dieser Versuchsphase nimmt die Gleitreibungszahl wieder zu und erreicht nach rd. 12000 m (TTPV 15) das bereits nach rd. 10000 m (TTPV 12) erlangte Niveau, vgl. Bild 12. Bis zum Ende der Untersuchungsphase III steigt der Reibungswiderstand etwas weniger stark an und pendelt sich nach rd. 15000 m (TTPV 18) auf einen Maximalwert von rd. 0,08 bei  $-35^{\circ}\text{C}$  ein. In den Raumtemperatur-Versuchen stabilisiert sich das Reibungsniveau nach rd. 15000 m Gleitweg bei etwa 0,02.

In der Untersuchungsphase III (Gleitweg 10240 bis 15360 m) hat das Spaltmaß um 0,15 mm abgenommen und beträgt jetzt noch 1,20 mm.

In der Untersuchungsphase IV ergibt sich im Anschlußversuch TTPV 19 gegenüber TTPV 18, vgl. Bild 12 und 13, ein geringfügig höheres Reibungsniveau im gesamten Temperaturbereich. Im weiteren Verlauf bis zum Ende des Dauergleitreibungsversuchs über rd. 20000 m (TTPV 24) beginnt sich im Temperaturbereich  $-35^{\circ}\text{C}$  mit einem Wert von rd. 0,085 ein konstantes Reibungsniveau abzuzeichnen. Die im Raumtemperatur-Versuch (RTV 20) nach rd. 20000 m Gleitweg ermittelte Reibungszahl liegt knapp unter 0,02, d. h. gegenüber dem Wert nach rd. 15000 m hat sich keine weitere Reibungszunahme mehr ergeben.

In der Untersuchungsphase IV (Gleitweg 15360 bis 20480 m) hat das Spaltmaß um 0,05 mm auf einen Wert von 1,15 mm abgenommen.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse des Dauergleitreibungsversuchs ist in Bild 14 wiedergegeben. Nach anfänglich relativ stark zunehmenden Reibungszahlen - insbesondere bei  $-35^{\circ}\text{C}$  - in Untersuchungsphase I und II (Gleitweg 0 bis 10240 m) stellt sich sowohl in den Tieftemperaturprogramm-Versuchen mit dem Spindeltrieb bei  $v = 0,4$  mm/s als auch in den Raumtemperatur-Versuchen mit dem Kurbeltrieb bei  $v_m = 2$  mm/s in Untersuchungsphase III und IV (Gleitweg 10240 bis 20480 m) ein zunehmend degressiv verlaufender Reibungsanstieg ein.

Die in Bild 15 über der Temperatur aufgetragenen Gleitreibungszahlen aus Tieftemperaturprogramm-Versuchen nach rd. 20/5000/10000/15000/20000 m Gleitweg lassen deutlich erkennen, daß insbesondere bei größeren Gleitwegen der Reibungswiderstand mit abnehmender Temperatur stärker anwächst.

Hinsichtlich der in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Gleitflächen mit Schmierstoffspeicherung festgelegten Reibungszahlen kann festgestellt werden, daß der für eine spezifische Belastung von  $30 \text{ N/mm}^2$  zulässige Wert von 0,03 bei einer Temperatur von  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  bereits nach einem aufaddierten Gleitweg von rd. 5000 m erreicht wird. Aus der Untersuchung geht hervor, daß die in den Tieftemperaturprogramm-Versuchen ermittelten Reibungszahlen ab rd. 10000 m Gleitweg degressiv steigen und in den Raumtemperatur-Versuchen ab rd. 15000 m Gleitweg bis Versuchsende praktisch konstant bleiben.

Obwohl das Reibungsniveau am Ende des Dauergleitreibungsversuchs im Temperaturbereich  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  überraschend hoch liegt, ist noch kein ausgesprochenes Versagen des Modellagers abzusehen, da erst bei Temperaturen unter  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  die zulässige Reibungszahl von 0,03 überschritten wird.

Bei der Beurteilung der Reibungszahlen ist zu beachten, daß es sich bei dem vorliegenden Dauergleitreibungsversuch um einen Einzelversuch handelt. Eine Stützung oder Ergänzung der hieraus resultierenden Erkenntnisse durch einen in entsprechender Weise durchgeführten Dauerversuch über rd. 20000 m Gleitweg /12/, vgl. Bild 16, ist nur bedingt möglich, da dieser Versuch unter einer spezifischen Belastung von  $45 \text{ N/mm}^2$  sowie mit einem mechanisch nachbehandelten Gleitblech aus austenitischem Stahl mit verhältnismäßig hoher Härte, die in der Größenordnung von 200 HV 1 liegt, durchgeführt worden ist.

6.2 Untersuchungsphase V  
Einfluß der Flächenpressung ( $p = 10/20/30/45 \text{ N/mm}^2$ )

Unmittelbar im Anschluß an den Dauerversuch unter konstanter Flächenpressung ( $30 \text{ N/mm}^2$ ) wurde gemäß dem in Tafel 6 dargestellten Versuchsablauf die Auswirkung der Veränderung (Verringerung bzw. Erhöhung) der Flächenpressung auf die Reibungshöhe in Kurzzeit-Versuchsschnitten RTV, Bild 17, und TTPV, Bild 18, bei langsamer Hin- und Herbewegung mit dem Spindeltrieb ( $v = 0,4 \text{ mm/s}$ ) - jeweils über 20 m Gleitweg - untersucht.

Mehr oder weniger deutlich, bei Raumtemperatur ausgeprägt, ist die bekannte Reibungszahl/Pressungsabhängigkeit, d. h. die Reibungszunahme mit abnehmender Flächenpressung zu erkennen. Unerklärlich ist, daß der Reibungsverlauf bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  in der  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ -Phase des Tieftemperaturprogramm-Versuchs, vgl. Bild 18, nicht in das erwartete Bild paßt. In der abschließenden  $+21 \text{ }^\circ\text{C}$ -Phase stellt sich dagegen wieder die bekannte Abhängigkeit ein.

### 6.3 Untersuchungsphase VI Einfluß der Bewegungsunterbrechung

Insbesondere bei Kunststoff/Metall-Gleitpaarungen unter Anwendung von Schmierstoffspeicherung führen Belastungszeiten vor Beginn der ersten Bewegung oder Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast zu einer Veränderung der Reibungshöhe.

Nach Beendigung der Untersuchungsphase V ( $p = \text{variabel}$ ) wurden zunächst zwei Anschlußversuche (RTV bzw. TTPV) wiederum bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  Flächenpressung bei langsamer Hin- und Herbewegung mit dem Spindeltrieb ( $v = 0,4 \text{ mm/s}$ ) - jeweils über 20 m Gleitweg - durchgeführt, vgl. Tafel 6, und erst dann in Untersuchungsphase VI der Einfluß der Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast ( $p = 30 \text{ N/mm}^2$ ) bis  $t_u = 120 \text{ h}$  mit dem Spindeltrieb bei Raumtemperatur untersucht.

Wie aus Bild 19 zu ersehen ist, bewirkt eine Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast beim Wiederauffahren grundsätzlich eine Erhöhung des Reibungswiderstandes bei der ersten Bewegung nach der Stillstandszeit. Ausgehend von einer einstündigen Bewegungsunterbrechung mit einem Wiederauffahrwert von rd. 0,025 steigt die Reibungszahl nach 24 h auf rd. 0,028. Durch eine Verlängerung der Bewegungsunterbrechung auf 64 und 120 h ergibt sich keine weitere Erhöhung im Wiederauffahrwert. Das Reibungsniveau ab der zweiten Bewegung wird insgesamt durch die Bewegungsunterbrechung jeweils sogar etwas niedriger.

#### 6.4 Aussehen und Beurteilung des Modellagers nach dem Versuch

Das in den Untersuchungsphasen I bis VI über einen Gesamtgleitweg von 20680 m geprüfte Lager 1 ist im geöffneten Zustand in Bild 20 wiedergegeben. Die während der gesamten Versuchsdauer (ausgenommen die kurzzeitige Absenkung bzw. Erhöhung der Pressung während der Untersuchungsphase V) wirkende spezifische Belastung von  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  hat deutlich zu sichtbaren Verformungen des PTFE geführt. Erkennbar an dem geringfügig dunkleren Aussehen hat sich am Umfang der PTFE-Scheibe ein nahezu konzentrischer, rd. 3,5 mm breiter Wulst (entsprechend der zentrisch wirkenden Normalkraft) gebildet. Dadurch hat sich der Außendurchmesser im nichtgekammerten, aus der Stahlfassung überstehenden Bereich - ausgehend von 75 mm im unbelasteten Zustand bei Versuchsbeginn - auf rd. 82 mm vergrößert. Gleichzeitig dazu hat, wie bereits in Abschnitt 6.1 aufgezeigt, vgl. auch Tafel 7, die Höhe des PTFE-Überstandes aus der Stahlfassung von 2,2 mm (im unbelasteten Zustand) auf 1,15 mm bis zum Ende des Dauergleitreibungsversuchs abgenommen, wobei der Anteil aus Verformung gegenüber dem aus Verschleiß deutlich größer ist. Die tragende PTFE-Fläche weist bei sonst glänzendem Aussehen in Bewegungsrichtung verlaufende Verschleiß(Kratz-)spuren sowie örtlich PTFE-Rückübertrag auf. Die ursprünglichen Schmiertaschen ( $\varnothing$  8 mm, 1,9 mm tief) haben sich im Versuchsverlauf verkleinert, wobei die Volumenabnahme im Randbereich der PTFE-Scheibe stärker als im mittleren Bereich in Erscheinung tritt. Nach dem Versuch liegen die Schmiertaschendurchmesser zwischen 2,5 und 6 mm bei einer Schmiertaschentiefe von 0,5 bis 1 mm.

Bekanntlich verhält sich PTFE ab einer Belastung größer rd.  $7 \text{ N/mm}^2$  überwiegend plastisch. Der aufgenommene Druck wird auf den Schmierstoff übertragen, so daß dieser - unter gleichem Druck stehend - nach und nach Siliconöl und auch Lithiumseife an die Gleitfuge abgibt. Einhergehend mit diesem Prozeß verkleinern sich allmählich die Schmiertaschen durch Nachfließen des PTFE.



Das Gewicht der PTFE-Scheibe wurde vor und nach dem Versuch bestimmt. Daraus ergibt sich ein PTFE-Verschleiß von rd. 6,3 g<sup>7)</sup>. Unter Berücksichtigung der Verformungen an der PTFE-Scheibe setzt sich die Abnahme des Gleitspalt bei überschlägiger Rechnung anteilig aus 0,75 mm Verformung und 0,3 mm Verschleiß zusammen.

Das austenitische Stahlblech mit Gleitfläche in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung) zeigt in dem ständig vom PTFE überdeckten inneren Bereich einen mehr oder weniger geschlossenen Werkstoffübertrag aus PTFE, während die bei der Hin- und Herbewegung des Lagers intervallweise überdeckten, sichelförmigen Flächen praktisch blank sind. Der aus der Gleitfuge bevorzugt in Bewegungsrichtung heraustransportierte PTFE-Werkstoffübertrag hat sich in Form loser Verschleißpartikel teilweise vermischt mit Schmierstoff außerhalb der Gleitfläche abgelagert. Das Gleitblech weist vereinzelte, in Gleitrichtung verlaufende Verschleiß(Kratz-)spuren auf (Tiefe 4 bis maximal 8  $\mu\text{m}$ ).

Zur Beurteilung des Schmierstoffzustandes wurden aus den Schmier-taschen der PTFE-Scheibe Fettproben entnommen und der Gehalt an Siliconöl bestimmt. Gegenüber neuem Siliconfett mit einem Siliconölanteil von rd. 80 Gew.-% konnte beim untersuchten Schmierstoff nach rd. 20000 m aufaddiertem Gleitweg kein Siliconöl mehr nachgewiesen werden, d. h. daß der Schmierstoff praktisch nur noch aus Lithiumseife (Fettgerüst), angereichert mit PTFE-Verschleißpartikeln, besteht. In welchem Stadium der Untersuchungsphasen des Dauergleitreibungsversuchs der vermutlich einer exponentiellen Gesetzmäßigkeit (Abnahme) folgende Siliconölanteil den Wert Null erreicht, kann nicht abgeschätzt werden. Auch ist es im Rahmen dieser Untersuchung nicht zu bestimmen, ob in Poren des PTFE noch Siliconölreste verblieben sind.

---

7) Bezogen auf das im Gleitspalt befindliche PTFE-Material im unbelasteten Zustand beträgt der Gewichtsverlust rd. 30 %.

## 7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Im Hinblick auf die Verwendung von austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 mit Gleitfläche in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung) für Gleitlager wurde zur Beurteilung des Langzeitverhaltens und der Lebensdauer ein Dauergleitreibungsversuch in einer speziellen Versuchseinrichtung über rd. 20000 m Gleitweg im Temperaturbereich von +21 °C bis -35 °C unter einer rechnerischen Flächenpressung von 30 N/mm<sup>2</sup>, die der mittleren Maximalbelastung (Lastfall I) zulassungspflichtiger Gleitlager entspricht, etappenweise vorgenommen.

Im Anschluß daran wurde der Einfluß von Pressungsänderung und die Auswirkung von Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast bzw. Teillast untersucht. Die wegen der langen Versuchsdauer erforderlichen Versuchsunterbrechungen erfolgten unter vertikaler Verspannung des Lagersystems bei rd. 10 N/mm<sup>2</sup> bei Unverrückbarkeit in horizontaler Richtung. Das untersuchte Modellager war in keiner Phase lastfrei.

Die ermittelte Reibungszahl/Gleitweg-Abhängigkeit der Gleitpaarung PTFE weiß / Austenitischer Stahl, geschmiert mit Siliconfett unter Anwendung von Schmierstoffspeicherung, weist im Verlauf der untersuchten 20000 m Gleitweg in der Hauptsache zwei kennzeichnende Bereiche auf. Mit Ausnahme des starken Reibungsanstiegs von rd. 0,01 auf über 0,07 bei -35 °C nimmt bis 10000 m Gleitweg die Reibung nahezu linear mit dem Gleitweg zu, wobei die Steigung mit abnehmender Temperatur verstärkt größer wird. Nach einem Übergangsbereich kann man wiederum abhängig von der Temperatur von einer mehr oder weniger geringen Reibungszunahme sprechen, d. h. das Reibungsniveau beginnt sich zu stabilisieren. Nach 20000 m aufaddiertem Gleitweg liegt die Reibungszahl in der -35 °C-Phase bei rd. 0,085 und bei +21 °C knapp unter 0,02. Die in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für PTFE-Flächen mit Schmierstoffspeicherung festgelegte Reibungszahl von 0,03 für 30 N/mm<sup>2</sup> Flächenpressung wird nach 20000 m Gleitweg bei Temperaturen unter 0 °C überschritten, bei -35 °C jedoch bereits nach einem Gleitweg von 5000 m.

Die im Anschluß an den Dauerversuch vorgenommene stufenweise Veränderung der Flächenpressung von 10 bis  $45 \text{ N/mm}^2$  hat auch nach einem aufaddierten Gleitweg von über 20000 m die bekannte Abhängigkeit, d. h. Abnahme der Gleitreibungszahl mit zunehmender Flächenpressung, weitgehend bestätigt.

Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast erbrachten auch nach Unterbrechungszeiten bis 120 h nach einem erhöhten Wiederanfahrwert keine wesentlichen Veränderungen im anschließenden Reibungsniveau.

Aussehen und veränderte Abmessungen der Lagerelemente PTFE und Gleitblech sowie die Analyse des in den Schmiertaschen verbliebenen Schmierstoffs geben zusätzliche Hinweise zur Erklärung des tribologischen Verhaltens. Infolge Zusammendrückung mit ausgeprägter Wulstbildung im nicht gekammerten Bereich der PTFE-Scheibe sowie durch Verbrauch an Schmierstoff verbunden mit Schmiertaschenverkleinerung und PTFE-Verschleiß hat der Gleitpalt im Modellager von 2,2 mm im unbelasteten Zustand auf 1,15 mm abgenommen. Der Anteil an Verformung beträgt dabei rd. 0,75 mm und aus Verschleiß rd. 0,3 mm.

Der ursprünglich aus Siliconöl (80 Gew.-%) und Lithiumseife (20 Gew.-%) bestehende Schmierstoff hat bis Versuchsende den gesamten Siliconölanteil an die Gleitfuge abgegeben. Der in den Schmiertaschen verbliebene Rest besteht aus Lithiumseife und PTFE-Verschleißpartikeln. Orientierungsversuche mit entsprechenden Modellagern, die nur mit Lithiumseife geschmiert wurden, haben bestätigt, daß die Seife allein bei der Kunststoff/Metall-Gleitpaarung schmierwirksame Eigenschaften hat, d. h. das Reibungsniveau von ungeschmiertem PTFE im Temperaturbereich  $+21 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  deutlich herabsetzt.

*Hakenjos*

(Dr.-Ing. V. Hakenjos)

*Gerber*

(Dipl.-Ing. A. Gerber)

8. Literatur

- / 1 / Hakenjos, V. und K. Richter:  
Versuche an Gleitlagern. Grundlagen zur Prüfung und  
Beurteilung von Gleitlagern im Brücken- und Hochbau.  
In:  
Eggert, H., J. Grote und W. Kauschke:  
Lager im Bauwesen.  
Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn, Band 1, 1974, S. 301/309
- / 2 / Hakenjos, V.:  
Untersuchung über die Rollreibung bei Stahl im  
elastisch-plastischen Zustand.  
Diss. Technische Hochschule Stuttgart 1967
- / 3 / -  
Verschleiß - Begriffe, Systemanalyse von Verschleiß-  
vorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes.  
DIN 50 320, 1979
- / 4 / Czichos, H.:  
Tribology.  
New York, Elsevier Scientific Publishing Company 1978
- / 5 / Hakenjos, V., K. Richter, A. Gerber und J. Wiedemeyer:  
Untersuchung der Bewegungen von Brückenbauwerken in-  
folge Temperatur- und Verkehrsbelastung.  
Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des  
Bundesministers für Verkehr FA 15.065 R 78 G  
Die Kurzfassung  
Untersuchung der Bewegungen von Brückenbauwerken in-  
folge Temperatur und Verkehrsbelastung am Beispiel  
einer Stahlbrücke  
erscheint demnächst in Der Stahlbau
- / 6 / Uetz, H., K. Sommer und M. A. Khosrawi:  
Übertragbarkeit von Versuchs- und Prüfergebnissen bei  
abrasiver Verschleißbeanspruchung auf Bauteile.  
VDI-Berichte Nr. 354 (1979), S. 107/124
- / 7 / Uetz, H. und H. Breckel:  
Reibungs- und Verschleißversuche mit Teflon.  
Sonderheft der Staatlichen Materialprüfungsanstalt  
an der TH Stuttgart, 7.12.1964, S. 67/76


- / 8 / Richter, K.:  
Tribologisches Verhalten von Kunststoffen unter Gleitbeanspruchung bei tiefen und erhöhten Temperaturen.  
Diss. Universität Stuttgart 1981  
(Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 5, Nr. 54)
- / 9 / Wellinger, K., H. Uetz und V. Hakenjos:  
Gleitreibungsversuche mit Teflon.  
VDI-Zeitschrift 104 (1962) 18, S. 1434/1440
- / 10 / Uetz, H. und V. Hakenjos:  
Reibungsuntersuchungen mit Polytetrafluoräthylen bei hin- und hergehender Bewegung.  
Die Bautechnik 44 (1967) 5, S. 159/166
- / 11 / Hakenjos, V. und K. Richter:  
Dauergleitreibungsverhalten der Gleitpaarung  
PTFE weiß / Austenitischer Stahl für Lager im Brückenbau.  
Straße, Brücke, Tunnel 11 (1975), S. 294/297
- / 12 / Hakenjos, V., K. Richter, A. Gerber und J. Wiedemeyer:  
Untersuchung des Reibungsverhaltens der Paarung PTFE  
weiß / Austenitischer Stahl für Brücken-Gleitlager bei  
großen aufaddierten Gleitwegen in Abhängigkeit von der  
spezifischen Belastung.  
Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des  
Bundesministers für Verkehr FA 15.084 R 79 G

9. Tafeln und Bilder

Tafel 1: Labor-Prüfbericht für PTFE weiß freigesintert  
 Kennzahl: 004/82      Hersteller: Pampus GmbH

Werkstoffeigenschaften und Prüfumfang gemäß Punkt 1.1  
 und 3.1 der "Bedingungen für Herstellung und Güteüber-  
 wachung von PTFE-Gleitlagern - Stand Februar 1978 -"

Freigabe der PTFE-Charge 1982-08-26, vgl. Bild 3


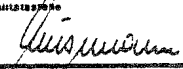
	<b>Labor-Prüfbericht für PTFE-Platten in Brückenlagerqualität</b>	004 / 82  Kennzahl																					
Amtliche Probenahme																							
<b>1. Rohmaterial</b> Chargen-Nr. 127024	Bezeichnung 1353																						
<b>2. Verarbeitetes Material</b> Plattenabmessungen ca. 1200 x 1200 mm																							
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Kennzahl</th> <th style="width: 30%;">2</th> <th style="width: 30%;">Platte</th> <th style="width: 30%;">2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>004/82</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>			Kennzahl	2	Platte	2	004/82	2	2	2													
Kennzahl	2	Platte	2																				
004/82	2	2	2																				
<b>3. Prüfbedingungen</b> 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																							
<b>4. Prüfergebnisse</b>																							
4.1. Rohdichte $\rho_R$ in g/cm <sup>3</sup> nach DIN 53479, Prüfgerät 6.6.	<table style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 60%;">Einzelwerte</td><td style="width: 40%;">Mittelwert</td></tr> <tr><td>2173</td><td></td></tr> <tr><td>2169</td><td></td></tr> <tr><td>2169</td><td style="border-top: 1px solid black;">2170</td></tr> </table>	Einzelwerte	Mittelwert	2173		2169		2169	2170														
Einzelwerte	Mittelwert																						
2173																							
2169																							
2169	2170																						
4.2. Reißfestigkeit $\sigma_R$ in N/mm <sup>2</sup> nach DIN 53455 mit Prüfgeschwindigkeit C Probestab SPi-Standard FD 105 Dicke mm ca. 2,0	<table style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 60%;">Einzelwerte</td><td style="width: 40%;">Mittelwert</td></tr> <tr><td>33,0</td><td></td></tr> <tr><td>35,5</td><td></td></tr> <tr><td>37,8</td><td></td></tr> <tr><td>39,2</td><td></td></tr> <tr><td>35,4</td><td style="border-top: 1px solid black;">36,2</td></tr> <tr><td>335</td><td></td></tr> <tr><td>350</td><td></td></tr> <tr><td>370</td><td></td></tr> <tr><td>360</td><td></td></tr> <tr><td>355</td><td style="border-top: 1px solid black;">354</td></tr> </table>	Einzelwerte	Mittelwert	33,0		35,5		37,8		39,2		35,4	36,2	335		350		370		360		355	354
Einzelwerte	Mittelwert																						
33,0																							
35,5																							
37,8																							
39,2																							
35,4	36,2																						
335																							
350																							
370																							
360																							
355	354																						
4.3. Reißdehnung $\epsilon_R$ in % nach DIN 53455 mit Prüfgeschwindigkeit C	<table style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 60%;">Einzelwerte</td><td style="width: 40%;">Mittelwert</td></tr> <tr><td>30,2</td><td></td></tr> <tr><td>29,7</td><td></td></tr> <tr><td>29,2</td><td></td></tr> <tr><td>29,2</td><td></td></tr> <tr><td>28,7</td><td></td></tr> <tr><td>30,2</td><td></td></tr> <tr><td>28,7</td><td></td></tr> <tr><td>28,7</td><td></td></tr> <tr><td>30,2</td><td></td></tr> <tr><td>29,7</td><td style="border-top: 1px solid black;">29,5</td></tr> </table>	Einzelwerte	Mittelwert	30,2		29,7		29,2		29,2		28,7		30,2		28,7		28,7		30,2		29,7	29,5
Einzelwerte	Mittelwert																						
30,2																							
29,7																							
29,2																							
29,2																							
28,7																							
30,2																							
28,7																							
28,7																							
30,2																							
29,7	29,5																						
4.4. Kugeldruckhärte in N/mm <sup>2</sup> nach DIN 53456 H 132/60	<table style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 60%;">Einzelwerte</td><td style="width: 40%;">Mittelwert</td></tr> <tr><td>30,2</td><td></td></tr> <tr><td>29,7</td><td></td></tr> <tr><td>29,2</td><td></td></tr> <tr><td>29,2</td><td></td></tr> <tr><td>28,7</td><td></td></tr> <tr><td>30,2</td><td></td></tr> <tr><td>28,7</td><td></td></tr> <tr><td>28,7</td><td></td></tr> <tr><td>30,2</td><td></td></tr> <tr><td>29,7</td><td style="border-top: 1px solid black;">29,5</td></tr> </table>	Einzelwerte	Mittelwert	30,2		29,7		29,2		29,2		28,7		30,2		28,7		28,7		30,2		29,7	29,5
Einzelwerte	Mittelwert																						
30,2																							
29,7																							
29,2																							
29,2																							
28,7																							
30,2																							
28,7																							
28,7																							
30,2																							
29,7	29,5																						
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td rowspan="3" style="width: 30px; text-align: center; vertical-align: middle;">M P A STUTTGART</td> <td style="text-align: center;">Güteüberwachung</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Datum: 1982-05-04</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Name: <i>[Signature]</i></td> </tr> </table>			M P A STUTTGART	Güteüberwachung	Datum: 1982-05-04	Name: <i>[Signature]</i>																	
M P A STUTTGART	Güteüberwachung																						
	Datum: 1982-05-04																						
	Name: <i>[Signature]</i>																						
<b>5. Prüfdurchführung</b> Datum: 4.5.1982      Prüfer: <i>[Signature]</i> Freigabe:																							
PAMPUS KG · 4156 Willich-Schiefbahn · W. Germany · Tel. 02154-601 · Telex 8531924 tie																							

Tafel 2: Abnahmeprüfzeugnis B nach DIN 50 049 für den austenitischen Stahl X 5 CrNiMo 18 10 (Werkstoff-Nr. 1.4401)  
 Schmelze-Nr.: 299 627  
 Hersteller: Krupp Stahlwerke Südwestfalen AG  
 Werk Dillenburg



## KRUPP STAHLWERKE SÜDWESTFALEN AG

handelnd im Namen und im Auftrag von FRIED. KRUPP HOTTENWERKE AG

<del>WERKSTOFFPRÜFZEUGNIS</del> <del>WERKSTOFFPRÜFZEUGNIS</del> ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1B -		nach DIN 50049		PRÜF.-NR.					
Krupp Stahlwerke Südwestfalen AG · Postfach 800 · 6340 Dillenburg  MPA - Stuttgart z. Hd. Herrn Dr. Ing. Hakenjos Pfaffenwaldring 32  7000 STUTTGART 80		Besteller: Friedrich Maurer Söhne GmbH. Eisenwerk 8000 MÜNCHEN 44  Bestell-Nr.: 629/2001 vom 23.2.79  Hersteller: Krupp Stahlwerke Südwestfalen AG  Auftrags-Nr.: 40/ 694 932		Prüfgegenstand: Edelstahl ( Band (		Anforderung: DIN 17 440, AD-Merkblatt W 2			
Werkstoff-Nr.: 1.4401 Kurzname: x 5 CrNiMo 18 10 Werkstoff-Nr.: NIROSTA 4401		Erweichungsart E		Zeichen d. Lieferwerk.  KRUPP / 02 SSW		Standort d. Werkstoffbestandes			
Pos.	Stück	Gewicht kg	Breite	Dicke	Länge	Schmelzen Nr.	Probe-Nr.	Band-Nr.	Maß- u. Oberflächenausführung
1	1	1	150	1,00	450	299627		73421	Verf. III D (m)  keine Beanstandung
Schmelzen-Nr.	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	
299627	,048	,30	1,23	,033	,003	16,78	2,06	10,67	
Probe-Nr. Band-Nr.	Abmessung d. Proben Breite x Dicke Durchmesser mm	Rp 0,2 Rp 1% N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	AL 080 %	Tiefung mm	Härte HV	ASTM Korngröße	Rauhig- keit Rz	
	Anforderung: DIN 17 440, AD-Merkblatt W 2								
73421	20,0 x 0,99	318 359	646	53		150			0,7 µm
Nach DIN 50914 (SEP 18/5) ist der Werkstoff interkristallin beständig					KRUPP STAHLWERKE SÜDWESTFALEN AG				
Bemerkung:			Fernruf: (027 71) 39 01		Werk Dillenburg - MZI/Qualitätsstelle				
			Dillenburg, den 25.6.1971 ja		Werkstoffverständige 				



Tafel 3: Labor-Prüfbericht für Siliconfett 300 mittel  
Kennzahl: 0426/031 Lieferant: Fuchs GmbH

Werkstoffeigenschaften und Prüfumfang gemäß Punkt 1.6  
und 3.6 der "Bedingungen für Herstellung und Güteüber-  
wachung von PTFE-Gleitlagern - Stand Februar 1978 -"  
Freigabe der Fett-Charge 1981-03-24, vgl. Bild 7

**WACKER** *silicone*

Chargen-Nr./Kennzahl  
0426 / 031

**FUCHS MINERALOELWERKE GMBH**

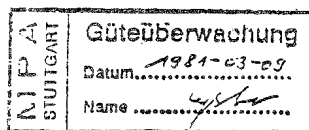
LABOR-PRÜFBERICHT

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: Wacker Siliconfett 300 mittel  
Brückenlagerqualität  
Lieferant: Fuchs Mineraloelwerke GmbH, Mannheim  
Chargenumfang: 500 kg

Prüfergebnisse:	Einheit	Sollwerte	Istwerte
1. Ruhpenetration bei 25 °C DIN 51 804	0,1 mm	240 - 280	<u>265</u>
2. Walkpenetration bei 25 °C DIN 51 804	0,1 mm	265 - 295	<u>270</u>
3. Tropfpunkt DIN 51 801/Blatt 1	°C	≧ 180	<u>214</u>
4. Ölabscheidung nach 24 h bei 100 °C FTMS 791 B-321	Gew.-%	≦ 3	<u>0,2</u>
5. Oxydationsbeständigkeit nach 100 h bei 160 °C DIN 51 808, Druckabfall	N/mm <sup>2</sup>	≦ 0,1	<u>0,03</u>
6. Pour-Point des Grundöles DIN 51 597	°C	unter - 60	unter -60
7. IR-Spektrum	Nr.	entsprechend Nr. 7612-33	<u>8103-25</u>



Datum  
09.03.1981

Sachbearbeiter  
Dr. Jöckel

Laborleiter  
Dr. Ihrig

*R. Jöckel*

*[Signature]*

Tafel 4: Versuchsbedingungen

	Modellager		
	1 und 2	1	2
Durchmesser L der PTFE-Scheiben in mm	2 x 75 -0,2	75 -0,2	75 -0,2
Durchmesser D der PTFE-Aufnahmen in mm		74,5	
Dicke t der PTFE-Scheiben in mm		4,8	
Spalthöhe h im unbelasteten Zustand in mm		2,2	
Gleitfläche A (ohne Abzug der Schmieraschen) in mm <sup>2</sup>	8836	4418	4418
rechnerische Flächenpressung p in N/mm <sup>2</sup>	30	10...45	30
vertikale Auflast F <sub>V</sub> in kN	264	44...198	132
Belastungszeit t <sub>v</sub> vor Beginn der ersten Bewegung in h	1	-	-
Bewegungsunterbrechung t <sub>u</sub> unter vertikaler Auflast in h	1	1...120	1
Stillstandszeit t <sub>0</sub> bei Bewegungsumkehr (Spindeltrieb) in s		12	
Temperaturstufen θ bei den Versuchsabschnitten mit dem Spindeltrieb in °C		0/-10/-20/-35/+21	
Temperatur θ bei den Versuchsabschnitten mit dem Kurbeltrieb in °C		+21	
Gleitweg (einfacher Hub) s bei Spindeltrieb/Kurbeltrieb in mm		10/8 (e = 4)	
aufaddierter Gleitweg s' je Versuchsabschnitt bei Spindeltrieb/Kurbeltrieb in m	20/1000	20/0,6/1000	20/1000
aufaddierter Gleitweg s <sub>ges</sub> je Modellager	5120	20680,6	5120
Gleitgeschwindigkeit v bei Spindeltrieb/Kurbeltrieb in mm/s		0,4/2	
p . v-Wert bei Spindeltrieb/Kurbeltrieb in N/mm <sup>2</sup> . mm/s	12/60	4...18/60	12/60

Tafel 5: Versuchsablauf des Dauergleitreibungsversuchs,  
 Untersuchungsphase I bis IV

TTPV = Tieftemperaturprogramm-Versuch (Spindeltrieb)  
 RTV = Raumtemperatur-Versuch (Kurbeltrieb)

Versuchsphase I		Modellager 1 und 2			$p = 30 \text{ N/mm}^2$	
0	TTPV 1	20 m	RTV 1	1020 m	TTPV 2	1040 m
		1040 m	RTV 2	2040 m	TTPV 3	2060 m
		2060 m	RTV 3	3060 m	TTPV 4	3080 m
		3080 m	RTV 4	4080 m	TTPV 5	4100 m
		4100 m	RTV 5	5100 m	TTPV 6	5120 m
		Versuchsunterbrechung 35 Tage			$p = 10 \text{ N/mm}^2$	
Versuchsphase II		Modellager 1			$p = 30 \text{ N/mm}^2$	
5120 m	TTPV 7	5140 m	RTV 6	6140 m	TTPV 8	6160 m
		6160 m	RTV 7	7160 m	TTPV 9	7180 m
		7180 m	RTV 8	8180 m	TTPV 10	8200 m
		8200 m	RTV 9	9200 m	TTPV 11	9220 m
		9220 m	RTV 10	10220 m	TTPV 12	10240 m
		Versuchsunterbrechung 38 Tage			$p = 10 \text{ N/mm}^2$	
Versuchsphase III		Modellager 1			$p = 30 \text{ N/mm}^2$	
10240 m	TTPV 13	10260 m	RTV 11	11260 m	TTPV 14	11280 m
		11280 m	RTV 12	12280 m	TTPV 15	12300 m
		12300 m	RTV 13	13300 m	TTPV 16	13320 m
		13320 m	RTV 14	14320 m	TTPV 17	14340 m
		14340 m	RTV 15	15340 m	TTPV 18	15360 m
		Versuchsunterbrechung 14 Tage			$p = 10 \text{ N/mm}^2$	
Versuchsphase IV		Modellager 1			$p = 30 \text{ N/mm}^2$	
15360 m	TTPV 19	15380 m	RTV 16	16380 m	TTPV 20	16400 m
		16400 m	RTV 17	17400 m	TTPV 21	17420 m
		17420 m	RTV 18	18420 m	TTPV 22	18440 m
		18440 m	RTV 19	19440 m	TTPV 23	19460 m
		19460 m	RTV 20	20460 m	TTPV 24	20480 m

Tafel 6: Versuchsablauf der Zusatzuntersuchungen im Anschluß an den Dauergleitreibungsversuch bis 20480 m Gleitweg, Untersuchungsphase V und VI

TTPV = Tieftemperaturprogramm-Versuch (Spindeltrieb)  
 RTV = Raumtemperatur-Versuch (Spindeltrieb)

Versuchsphase V	Modellager 1		p = variabel	
	p = 10 N/mm <sup>2</sup>	20480 m	RTV 21	20500 m
		20500 m	TTPV 25	20520 m
	p = 20 N/mm <sup>2</sup>	20520 m	RTV 22	20540 m
		20540 m	TTPV 26	20560 m
	p = 30 N/mm <sup>2</sup>	20560 m	RTV 23	20580 m
		20580 m	TTPV 27	20600 m
	p = 45 N/mm <sup>2</sup>	20600 m	RTV 24	20620 m
		20620 m	TTPV 28	20640 m
Versuchsphase VI	Modellager 1		p = 30 N/mm <sup>2</sup>	
	Anschlußversuche	20640 m	RTV 25	20660 m
		20660 m	TTPV 29	20680 m
	Bewegungsunterbrechung		t <sub>u</sub> = variabel	
	t <sub>u</sub> = 24 h	20680 m	RTV	20680,2 m
	t <sub>u</sub> = 64 h	20680,2 m	RTV	20680,4 m
	t <sub>u</sub> = 120 h	20680,4 m	RTV	20680,6 m

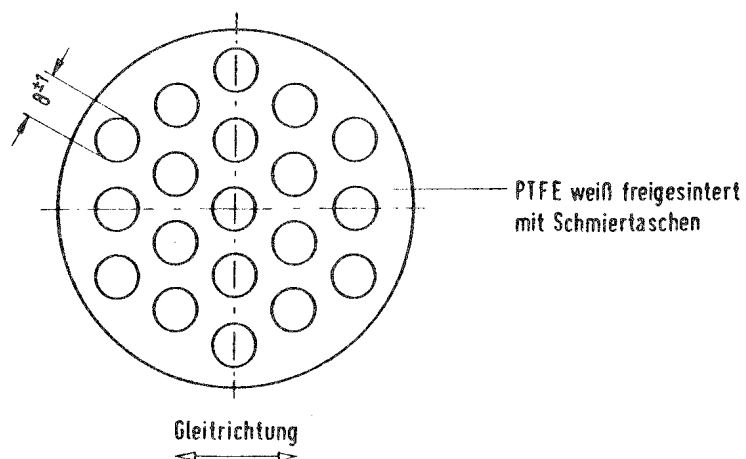
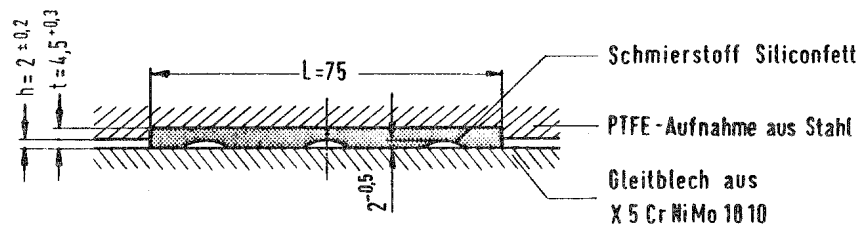
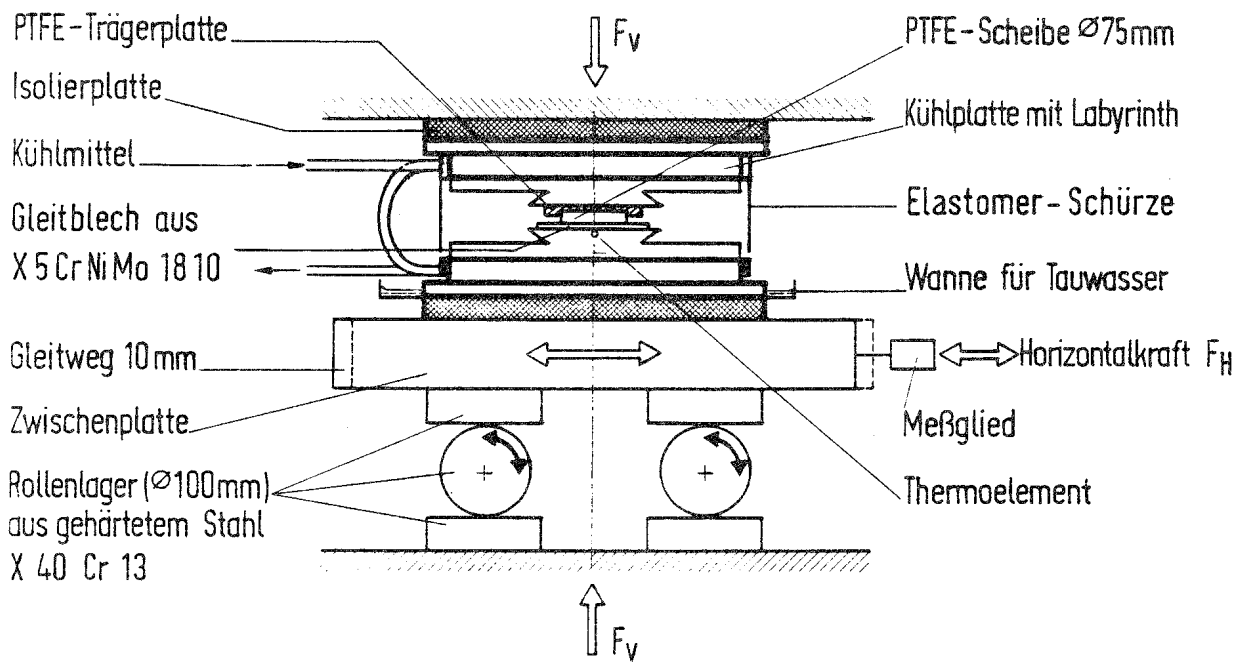
Tafel 7: Ergebnisse der Gleitspaltnmessungen am belasteten Modell-lager 1 ( $p = 30 \text{ N/mm}^2$ ) und zwar bei  $\vartheta = +21 \text{ }^\circ\text{C}$  zu Beginn und am Ende der Untersuchungsphasen I bis IV des Dauergleitreibungsversuchs über einen aufaddierten Gleitweg von 20480 m

Spalthöhe im unbelasteten Zustand des Lagers  $h = 2,2 \text{ mm}$

Untersuchungsphase	Versuchsabschnitt	aufaddierter Gleitweg $s_{\text{ges}}$ m	Spaltmaß $h - \Delta h$ mm
I	TTPV 1	0	2,05
	TTPV 6	5120	1,45 <sup>+) </sup>
II	TTPV 7	5120	1,55 <sup>+) </sup>
	TTPV 12	10240	1,35
III	TTPV 13	10240	1,35
	TTPV 18	15360	1,20
IV	TTPV 19	15360	1,20
	TTPV 24	20480	1,15

<sup>+)</sup>  Die geringfügige Dickenzunahme zwischen TTPV 7 und TTPV 6 läßt sich mit der Versuchsunterbrechung zwischen Untersuchungsphase I und II erklären.

Im weiteren Verlauf des etappenweise durchgeführten Dauergleitreibungsversuchs erfolgte durch die Versuchsunterbrechungen keine Spaltmaßänderung mehr.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für Gleitreibungsversuche mit Modellagern bei hin- und hergehender Bewegung sowie Ausführung und Einbau der Modellagerscheibe aus PTFE weiß freigesintert mit Schmieraschen

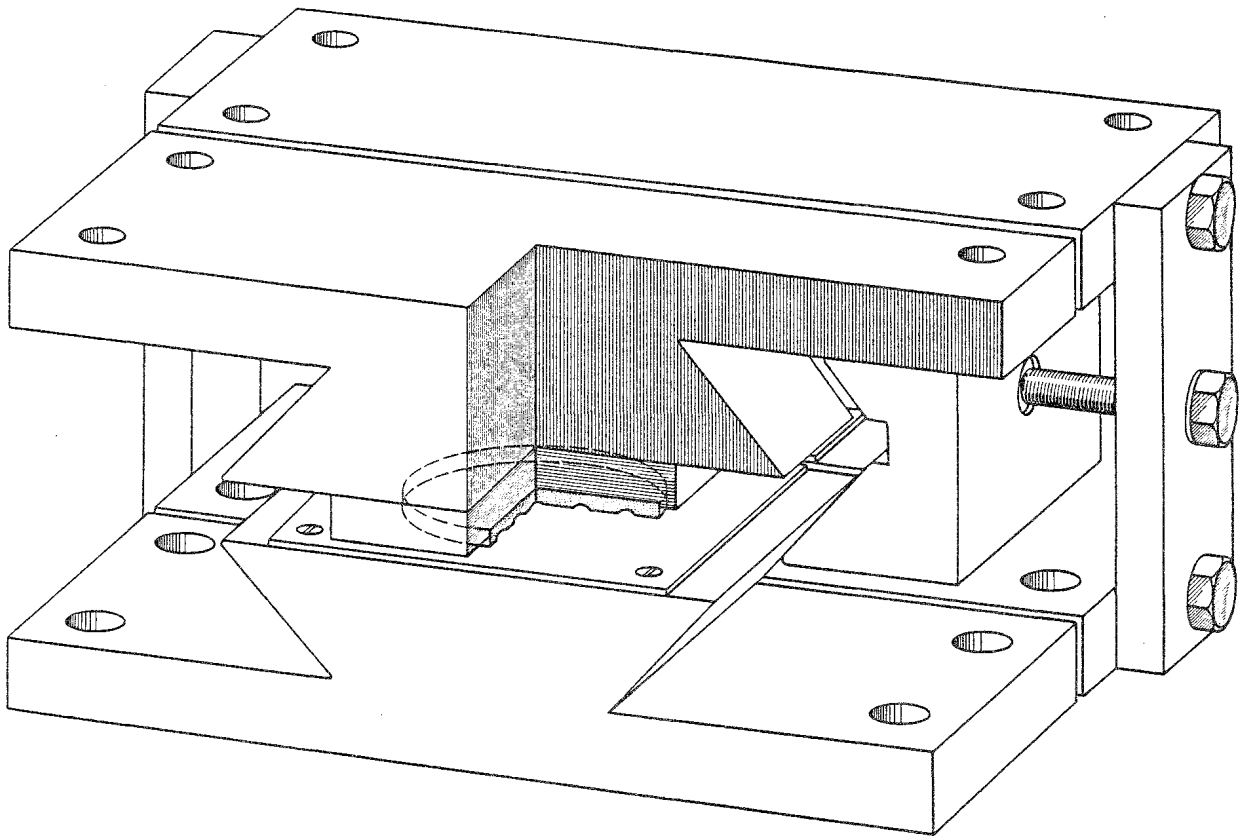
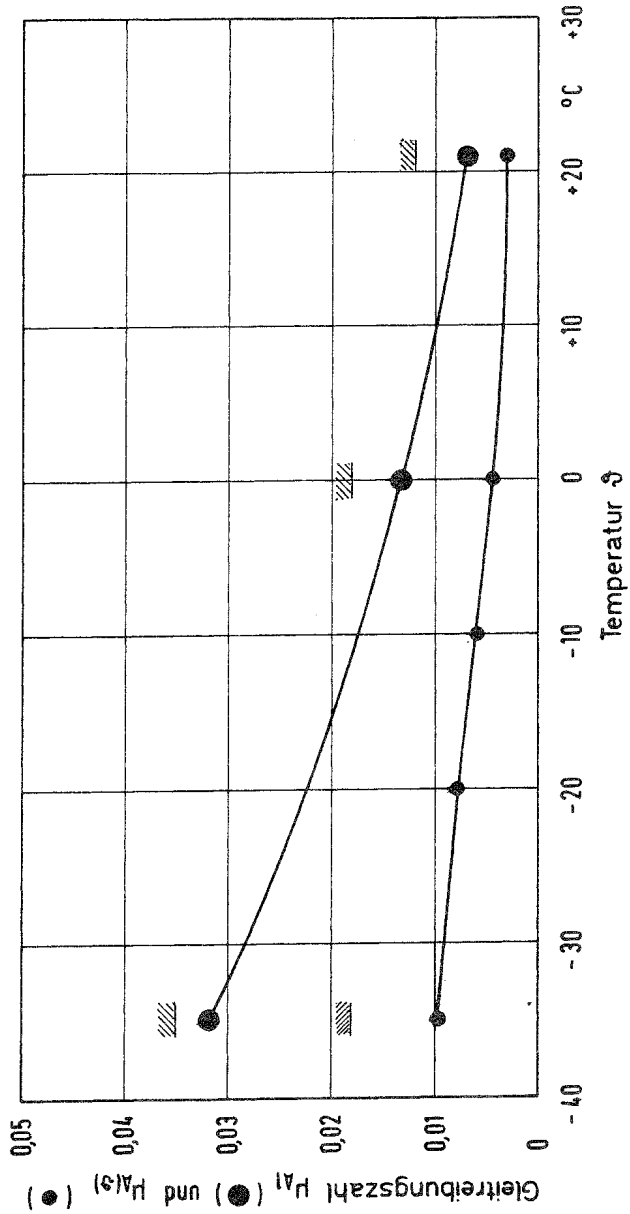


Bild 2: Sondervorrichtung für die Durchführung von Dauergleitreibungsversuchen mit zwei parallel angeordneten Modelllagern sowie Verspanneinrichtung (skizziert am hinteren Lager) für Versuchsunterbrechungen unter Teilbelastung



**Bild 31** PTFE weiß freigesintert (Brückenlagerqualität) / Hartchrom poliert,  $R_{max} = 4 \mu m$   
geschmiert mit Schmierstoffspeicherung

Hersteller: Pampus GmbH  
Kennzahl: 004/82

Schmierstoff: Siliconfett (güteüberwachte Brückenlagerqualität)  
Vorbelastungszeit  $t_v = 1 h$   
Flächenpressung  $p = 30 N/mm^2$   
freigegeben 1982-08-26  
Gleitweg  $s = 10 mm$   
Gleitgeschwindigkeit  $v = 0,4 mm/s$



Kennwort: Güteüberwachung von PTFE weiß freigesintert in Brückenlagerqualität

Bild 3: Freigabegrafik für PTFE weiß freigesintert in Brückenlagerqualität

Kennzahl: 004/82

Hersteller: Pampus GmbH, Willich 3 (Schiefbahn)

Die in den "Bedingungen für Herstellung und Güteüberwachung von PTFE-Gleitlagern - Stand Februar 1978 -" festgelegten oberen Grenzwerte sind schraffiert eingezeichnet.



MFA STUTTGART  
DATUM : 11.11.83  
PRUEFER: GERBER  
WERKST.: PTFE4/82  
NR. : 810075  
TASTER : TKE 100

UT : = 0,5 MM/S  
LT : = 04,8 MM

RT : = 3,200MM  
RM : = 3,100MM  
RN-D : = 2,620MM  
RA : = 0,460MM

UU : 5000 M 2MM  
UH : 20 M 500MM  
LC : = 0,8 MM

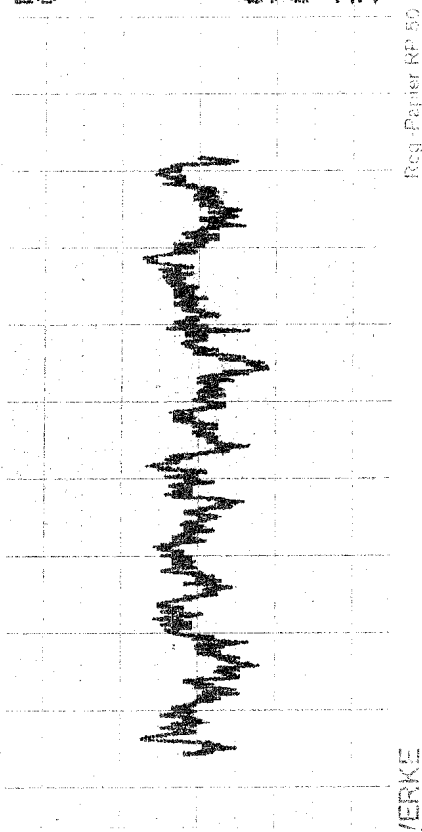


Bild 4:

Kennzeichnende Oberflächenprofil-  
aufnahme des freigesinterten PTFE-  
Plattenmaterials, gespalten vom  
Block

Die Abtastrichtung liegt quer zu  
den Spaltriefen.

Rauhtiefe der Gleitfläche  
 $R_{max}$  rd. 3  $\mu$ m

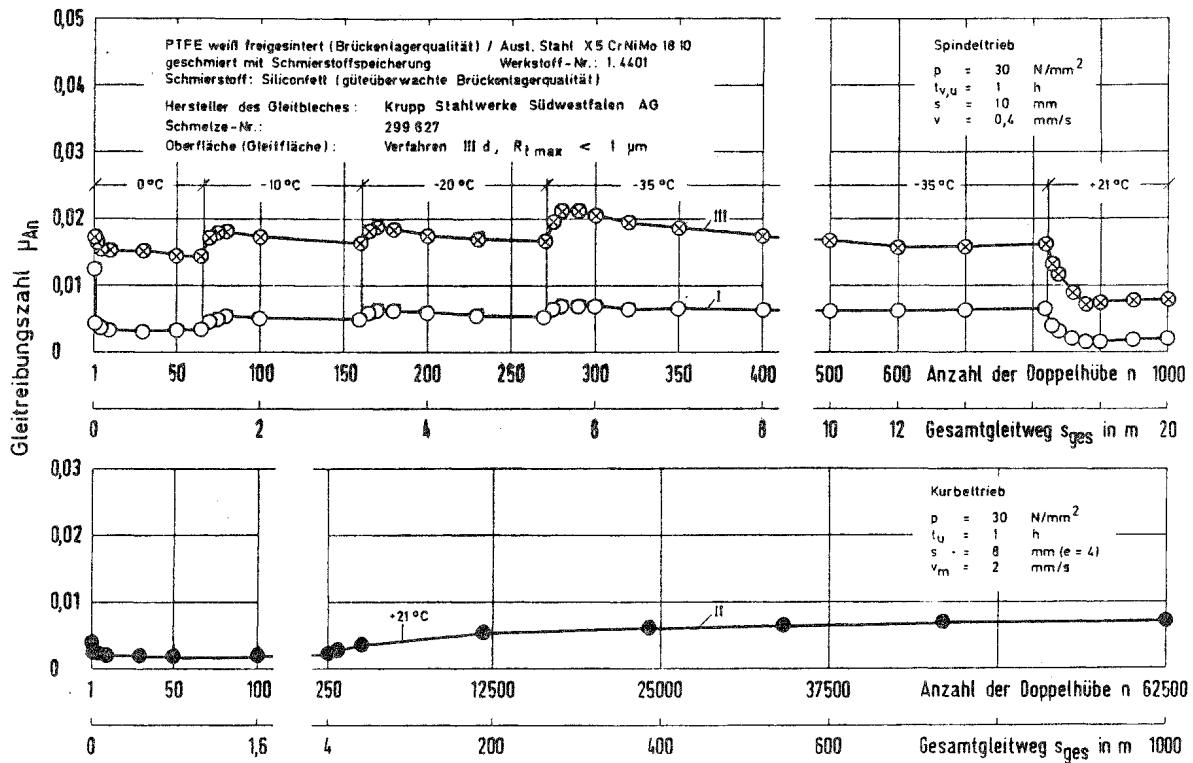


Bild 5: Ergebnisse des Überwachungsversuchs (Standardversuch über 1040 m Gleitweg) mit dem austenitischen Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung)

Schmelze-Nr.: 299 627  
 Hersteller: Krupp Stahlwerke Südwestfalen AG  
 Werk Dillenburg

MPA. STUTTGART  
DATUM : 11.11.93  
PRUEFER: GERBER  
WERKST.: RUST 3D  
NR.: 010075  
TASTER : TKE 100

UT : # 0,5 MM/S  
LT : # 0,419 MM

RT : # 0,925MYM  
RM : # 0,855MYM  
RN-0# 0,685MYM  
RA : # 0,887MYM

UU 20000 MM. 5MYM  
UH 20 MM 500MYM  
LC : # 0,8 MM

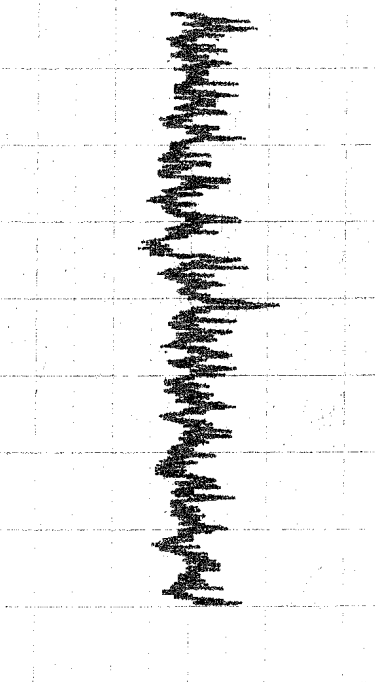


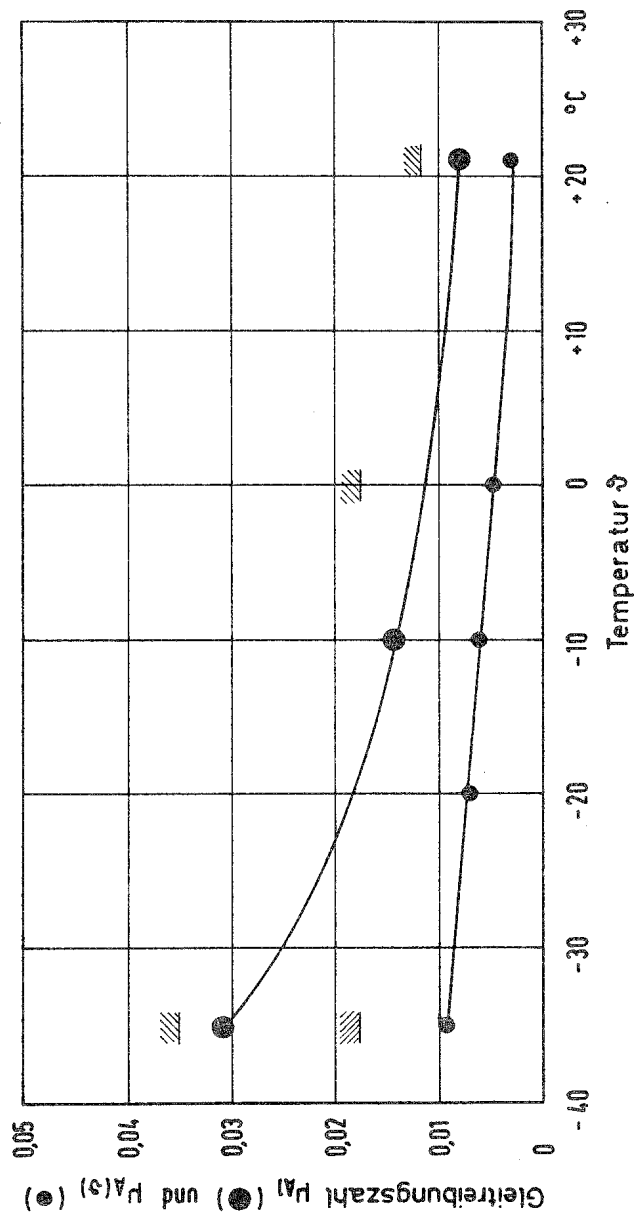
Bild 6:

Kennzeichnende Oberflächenprofil-  
aufnahme des Gleitbleches aus  
austenitischem Stahl X5CrNiMo1810  
in Ausführungsart IIIId (ohne mecha-  
nische Nachbehandlung)

Die Abtastrichtung liegt quer zur  
Walzrichtung.

Rauhtiefe der Gleitfläche

$R_{max} < 1 \mu m$



**Bild 2:** PTFE weiß freigesintert (Brückenlagerqualität) / Hartchrom poliert,  $R_{max} = 4 \mu m$   
geschmiert mit Schmierstoffspeicherung  
Schmierstoff: Siliconfett 300 mittel (Brückenlagerqualität)  
Lieferant: Fuchs GmbH  
Kennzahl: 0426/031  
Vorbelastrungszeit  $t_v = 1 h$   
Flächenpressung  $p = 30 N/mm^2$   
freigegeben 1981-03-24  
Gleitweg  $s = 10 mm$   
Gleitgeschwindigkeit  $v = 0,4 mm/s$



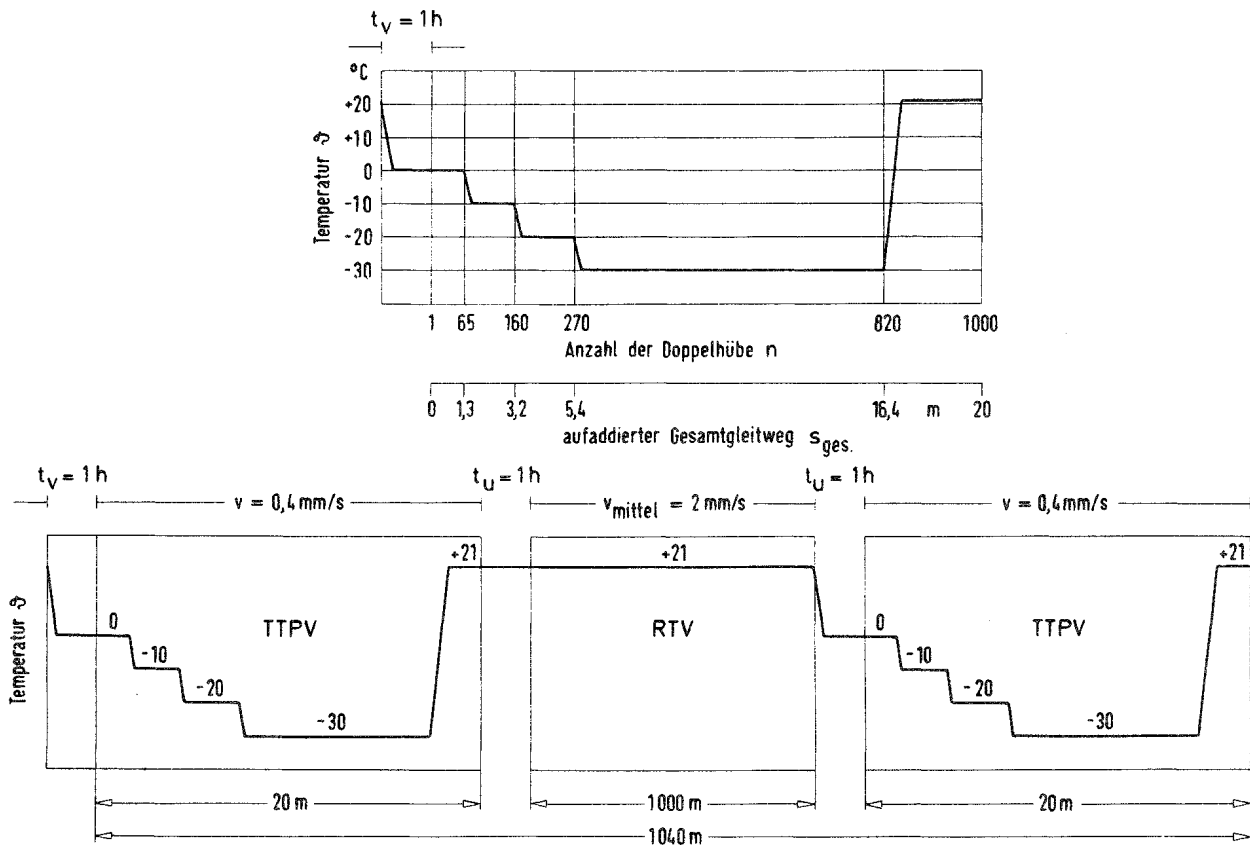
Kenntwort: Güteüberwachung von Schmierstoff in Brückenlagerqualität

Bild 7: Freigabegrafik für Schmierstoff Siliconfett 300 mittel in Brückenlagerqualität

Kennzahl: 0426/031

Lieferant: Fuchs Mineraloelwerke GmbH, Mannheim

Die in den "Bedingungen für Herstellung und Güteüberwachung von PTFE-Gleitlagern - Stand Februar 1978 -" festgelegten oberen Grenzwerte sind schraffiert eingezeichnet.



**Bild 8:** Schematische Darstellung vom Temperaturverlauf des Tieftemperaturprogramm-Versuchs (TTPV) und vom Beginn des Dauergleitreibungsversuchs, Versuchsphase TTPV - RTV - TTPV bis zu einem aufaddierten Gleitweg von 1040 m

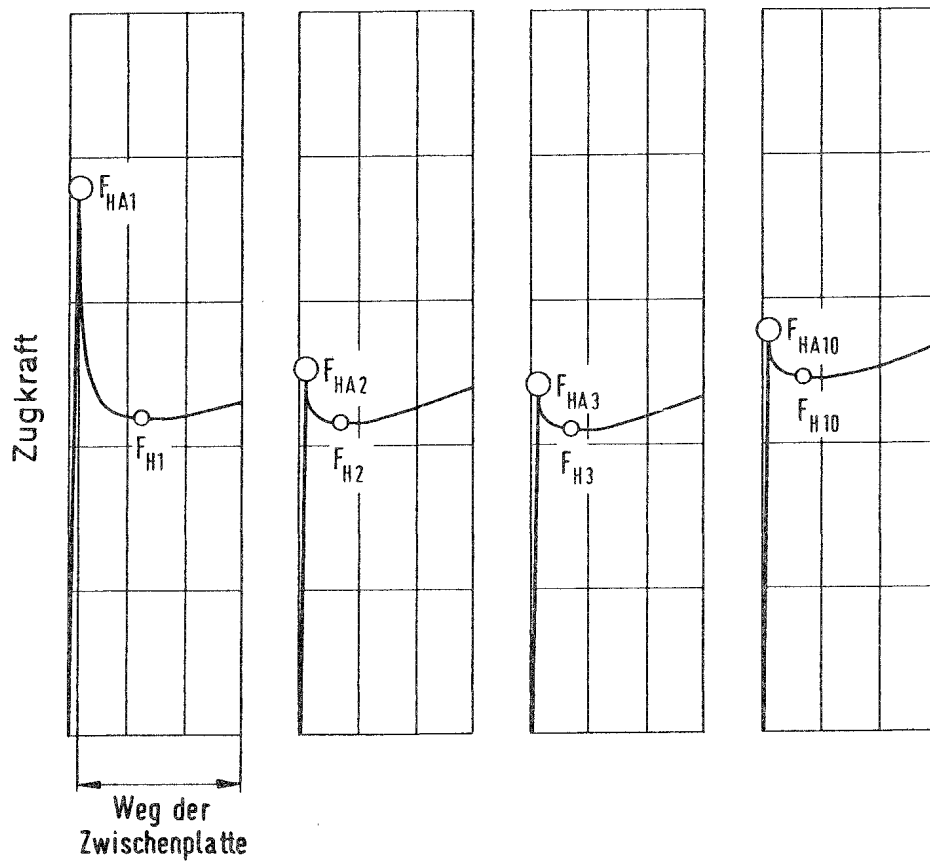


Bild 9: Schematische Darstellung des Horizontalkraftverlaufs (Zugkraft) in Abhängigkeit vom Gleitweg beim Spindeltriebversuch

$$\begin{aligned} \text{Gleitreibungszahl } \mu_{An} &= F_{HAn} / F_V \quad (\text{statisch}) \\ \mu_n &= F_{Hn} / F_V \quad (\text{dynamisch}) \end{aligned}$$

mit  $n$  = Anzahl der Doppelhübe

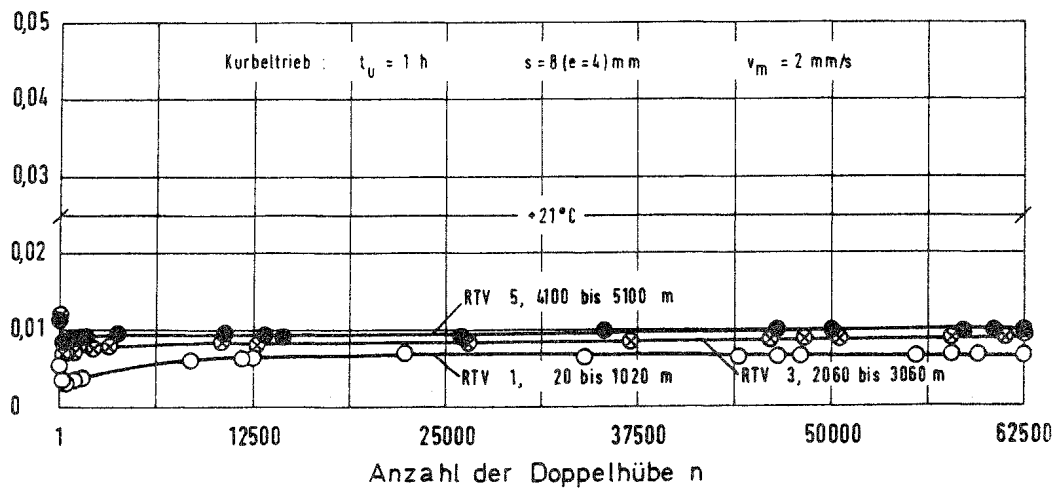
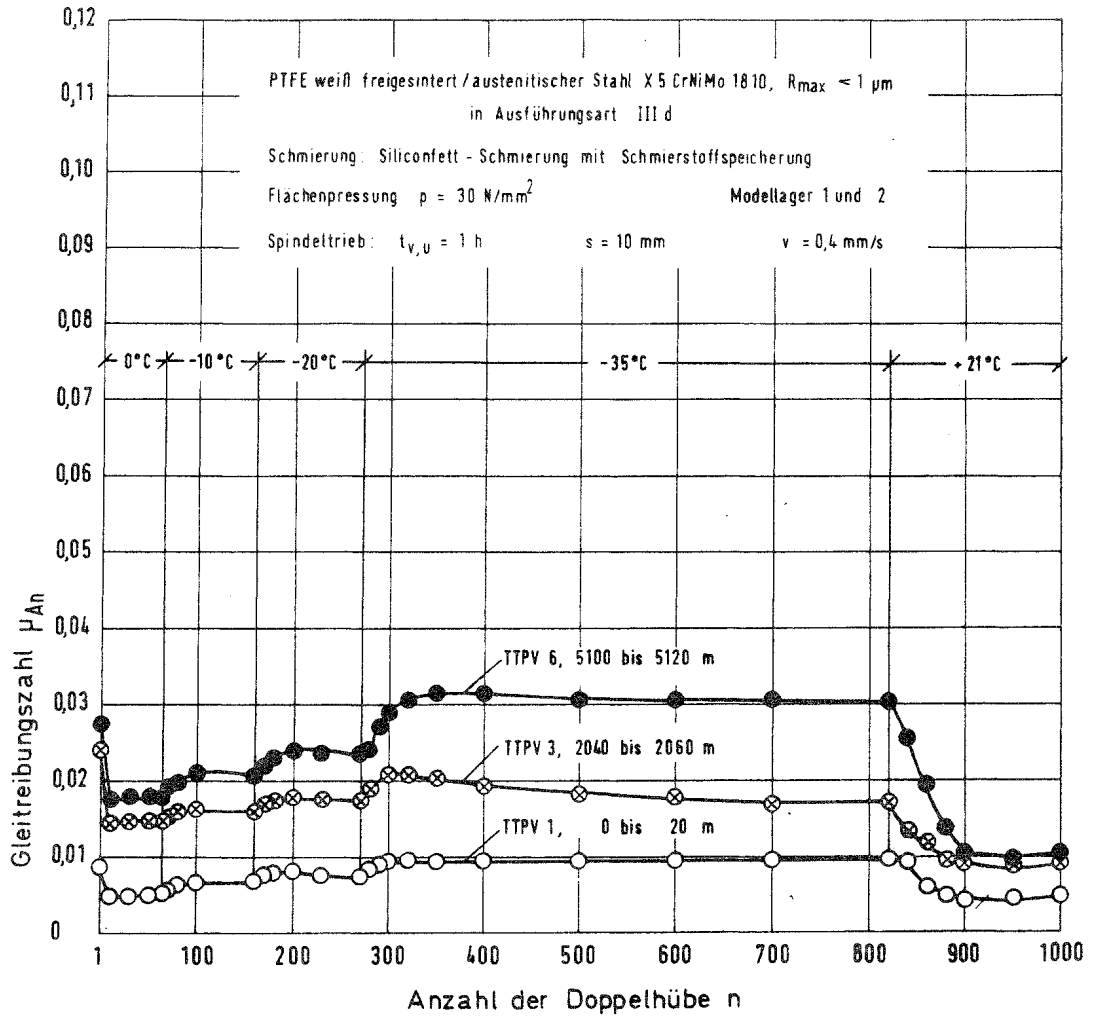
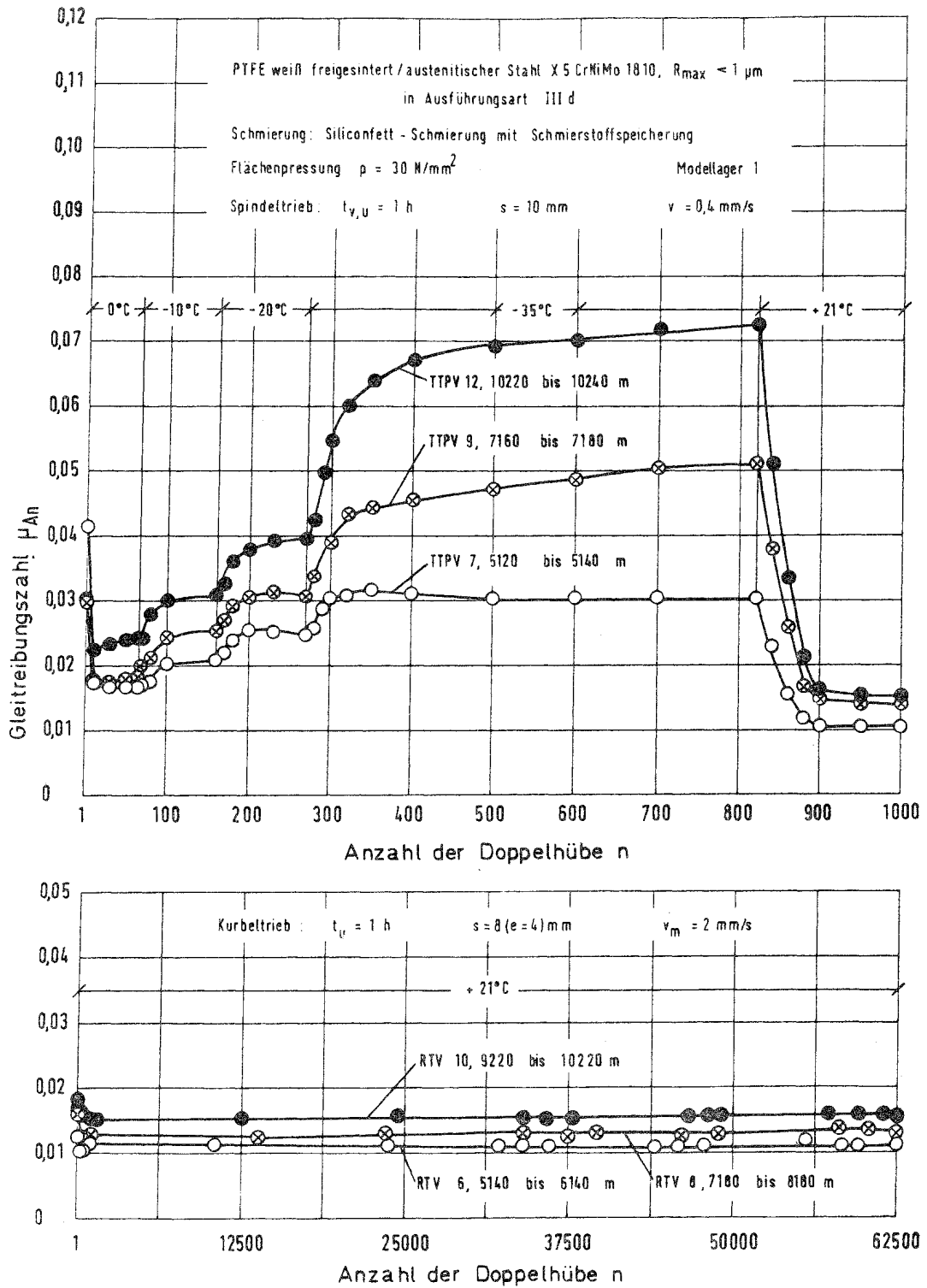


Bild 10: Gleitreibungscharakteristik von zwei parallel angeordneten Modellagern in Untersuchungsphase I (Gleitweg 0 bis 5120 m) des Dauergleitreibungsversuchs über rd. 20000 m Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung) bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$



**Bild 11:** Gleitreibungscharakteristik eines Modellagers in Untersuchungsphase II (Gleitweg 5120 bis 10240 m) des Dauer-  
 gleitreibungsversuchs über rd. 20000 m Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungs-  
 art III d (ohne mechanische Nachbehandlung),  $p = 30 N/mm^2$



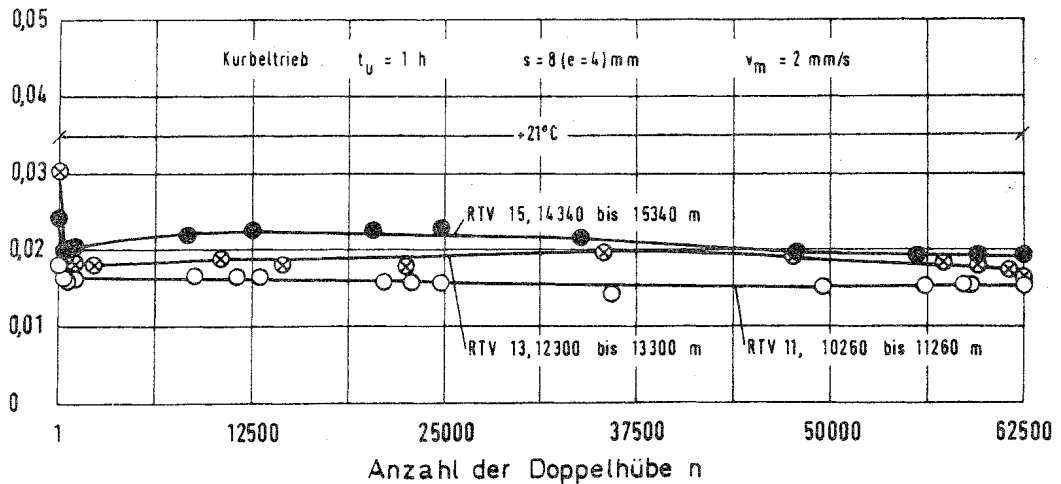
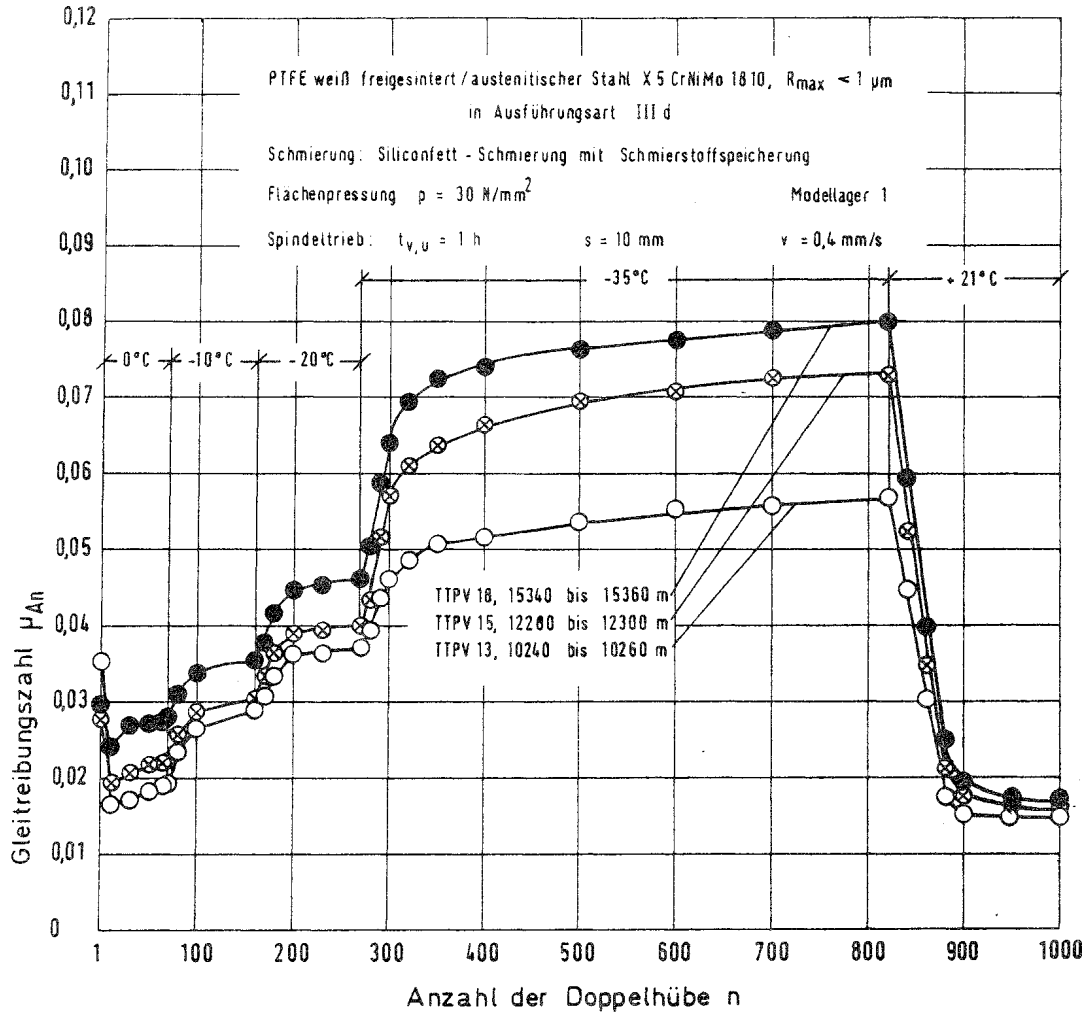
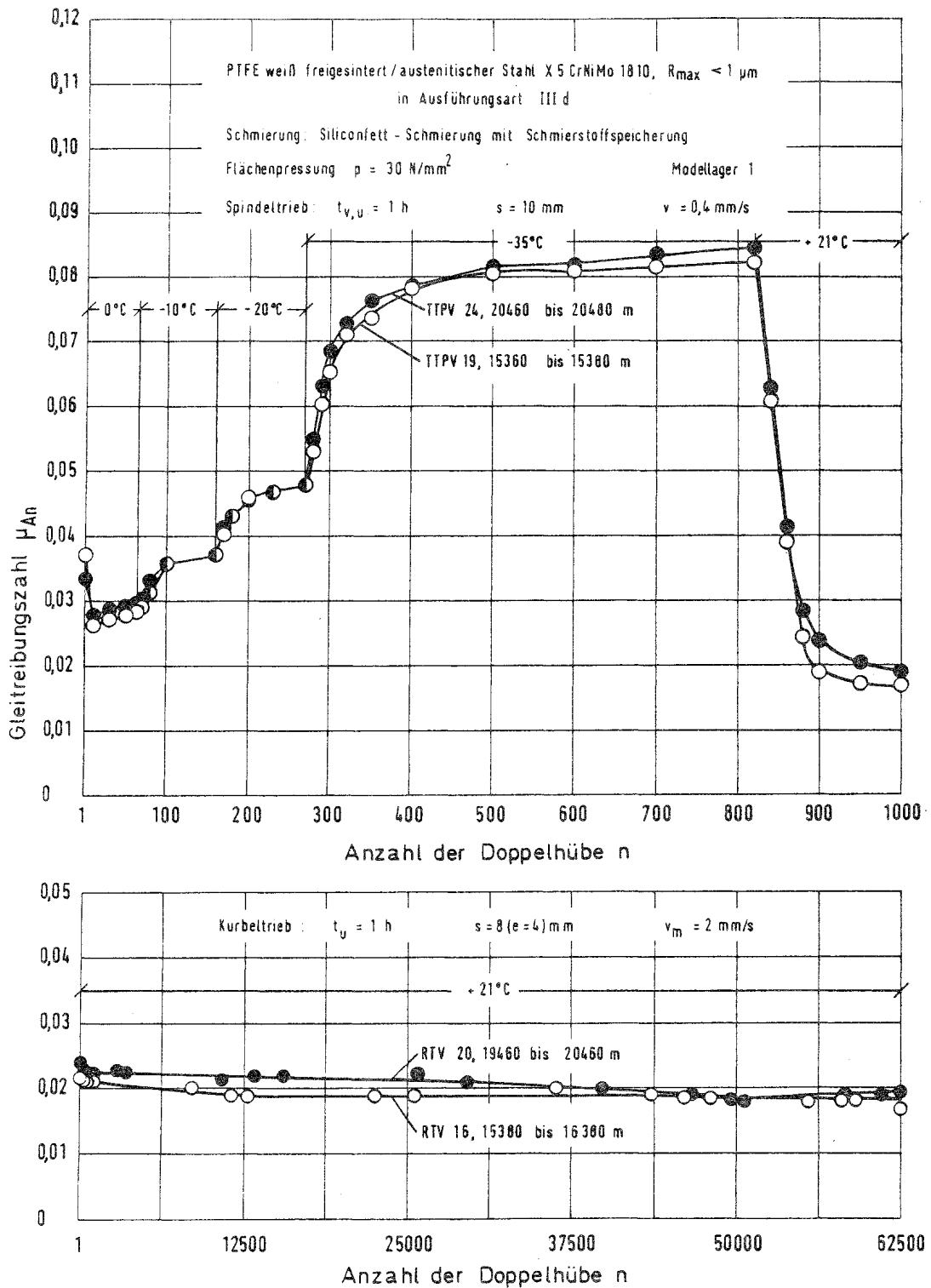
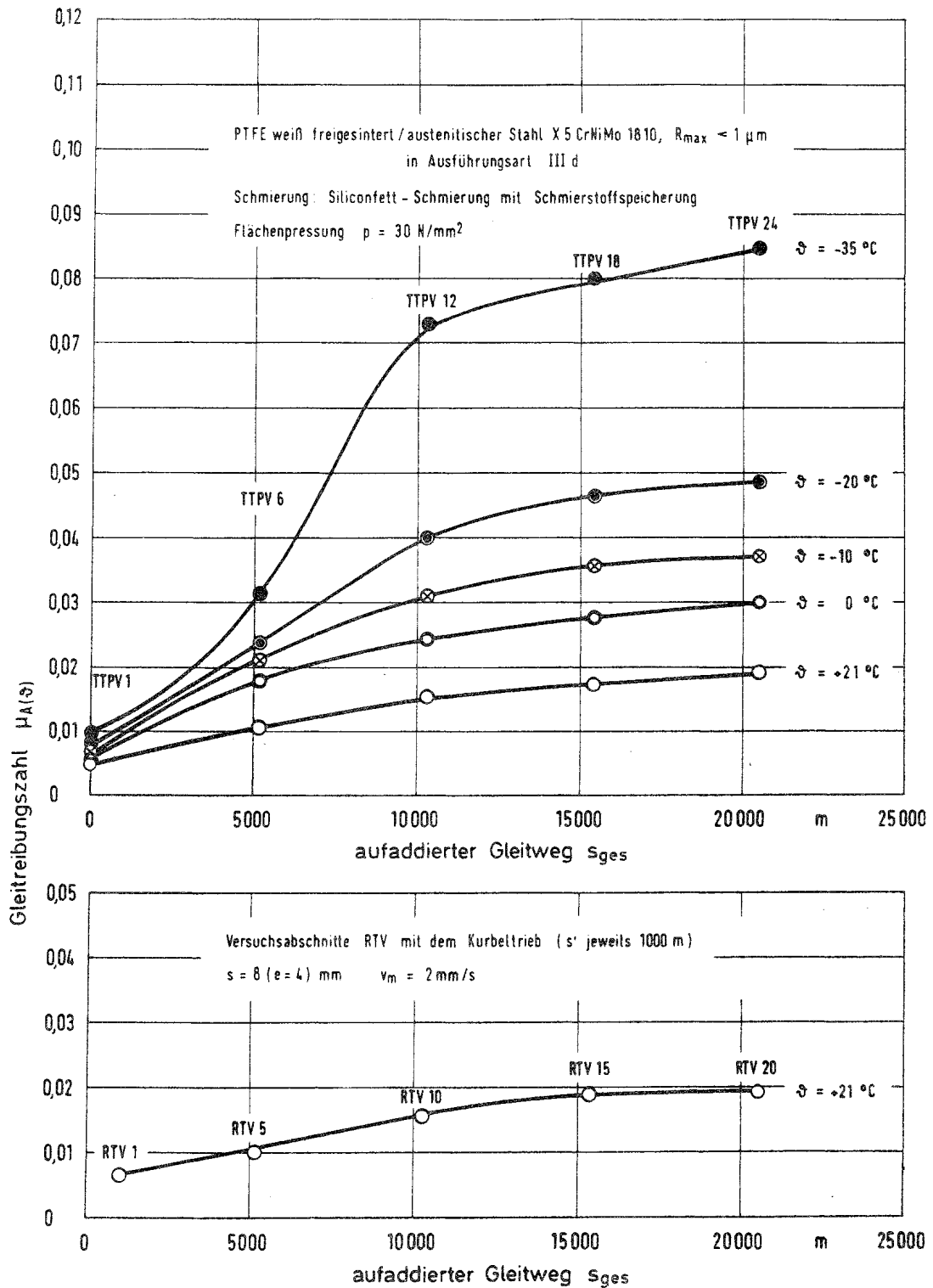


Bild 12: Gleitreibungscharakteristik eines Modellagers in Untersuchungsphase III (Gleitweg 10240 bis 15360 m) des Dauer-  
gleitreibungsversuchs über rd. 20000 m Gleitweg mit  
austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungs-  
art III d (ohne mechanische Nachbehandlung),  $p = 30 N/mm^2$



**Bild 13:** Gleitreibungscharakteristik eines Modellagers in Untersuchungsphase IV (Gleitweg 15360 bis 20480 m) des Dauer-  
gleitreibungsversuchs über rd. 20000 m Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungs-  
art III d (ohne mechanische Nachbehandlung),  $p = 30 N/mm^2$



**Bild 14:** Einfluß von Gleitweg und Temperatur auf das Gleitreibungsverhalten, ermittelt im Dauergleitreibungsversuch (Modell-lagerversuch) über rd. 20000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung) bei der spezifischen Standardbelastung  $p = 30 \text{ N/mm}^2$

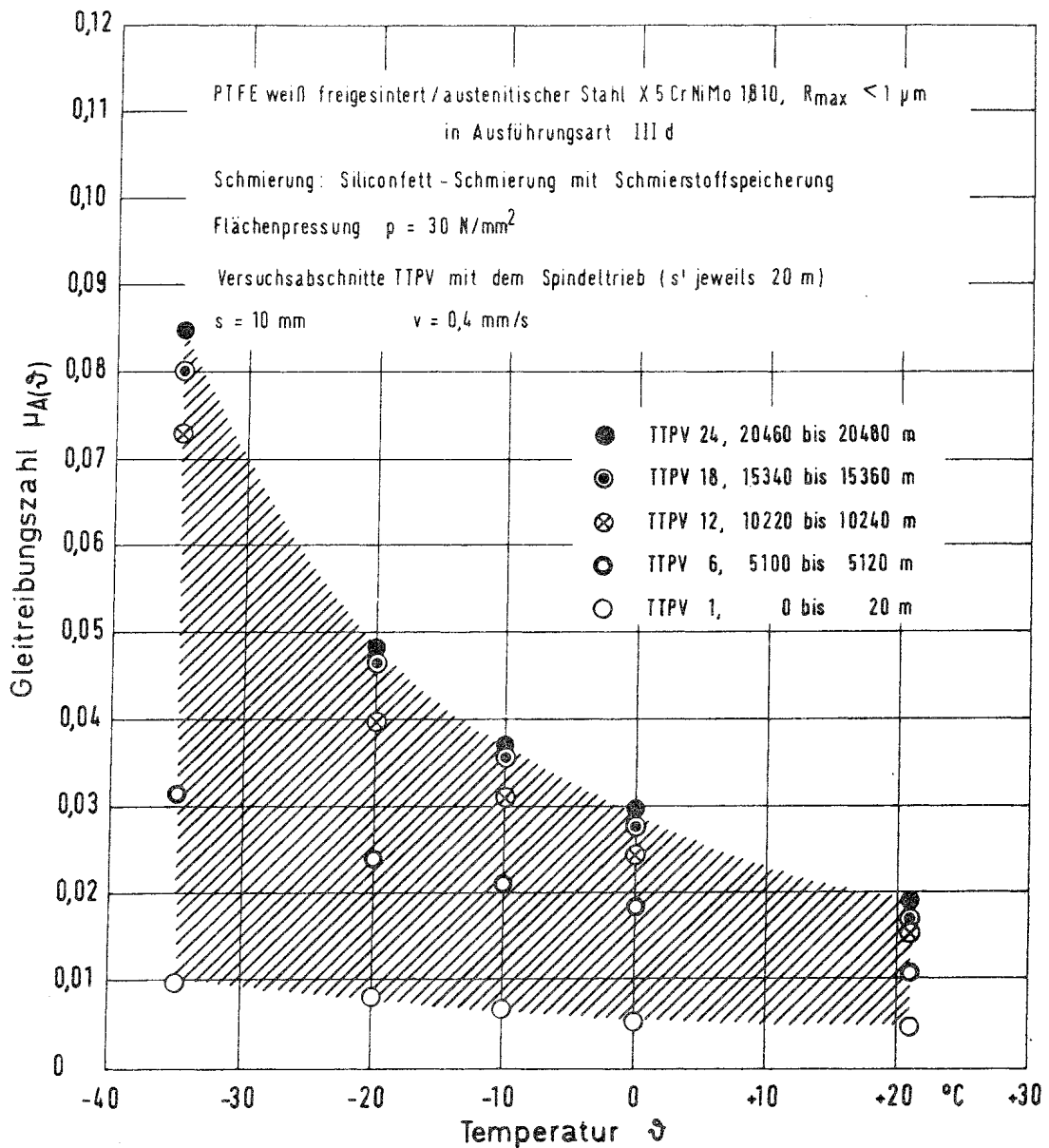
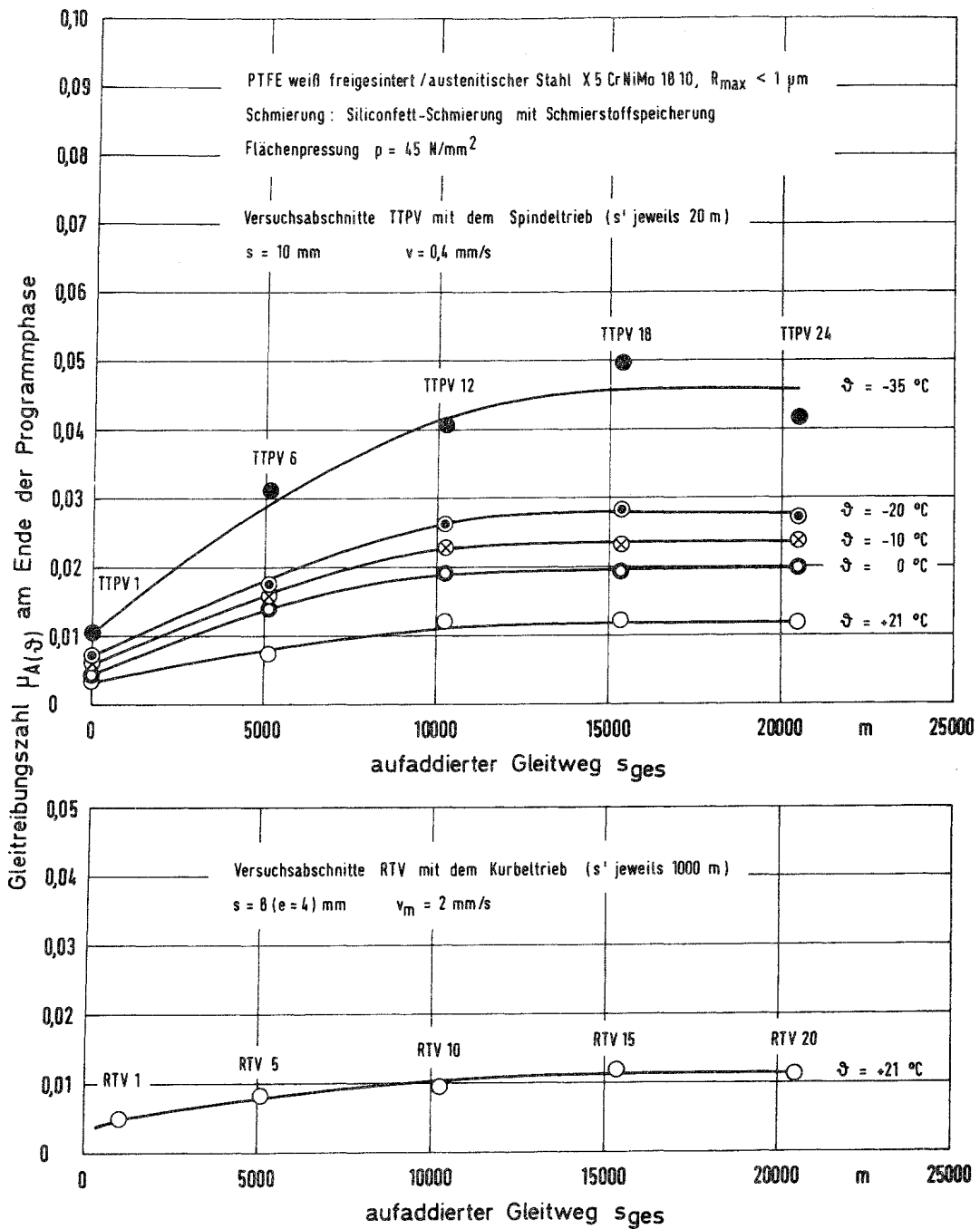
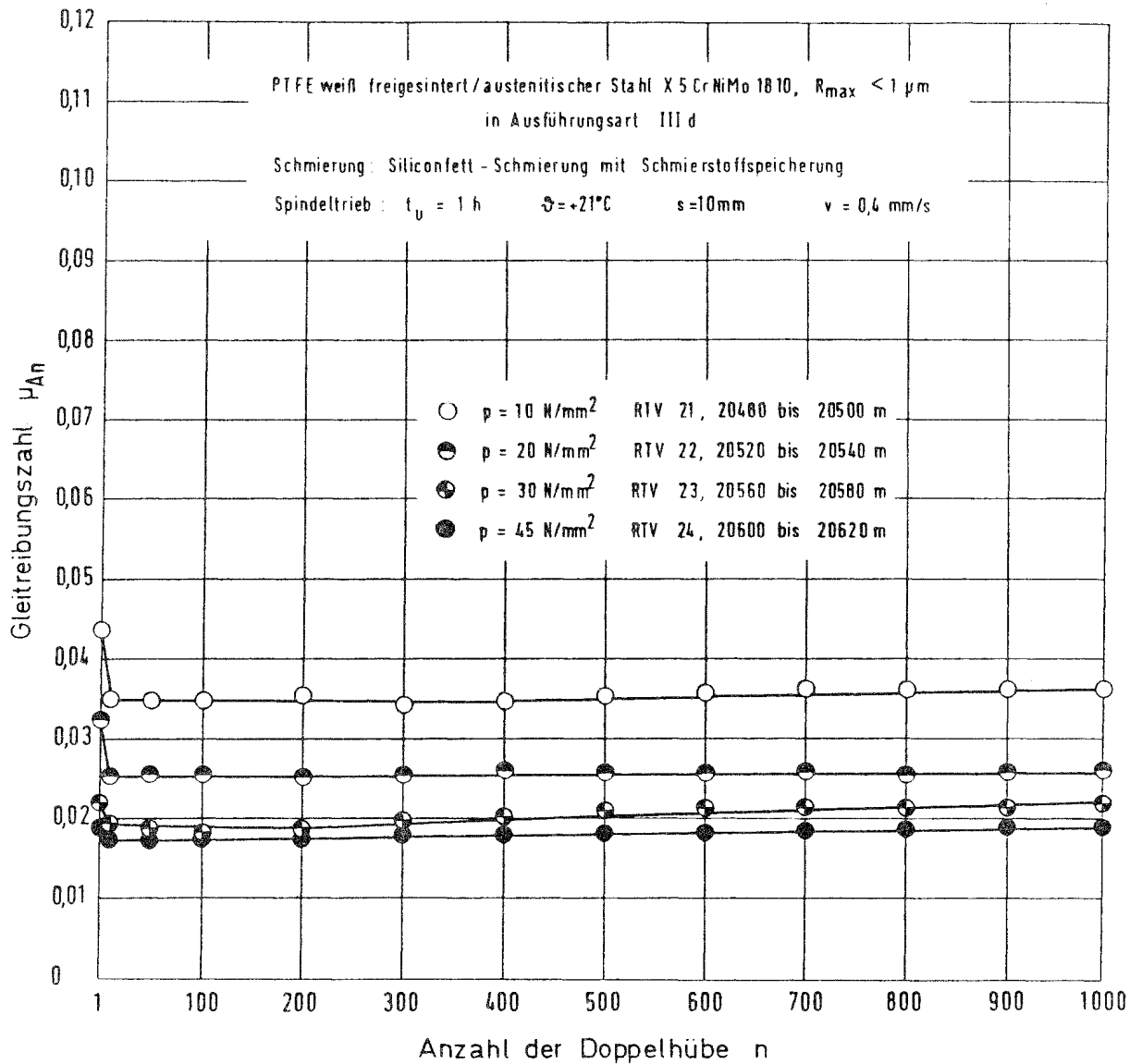


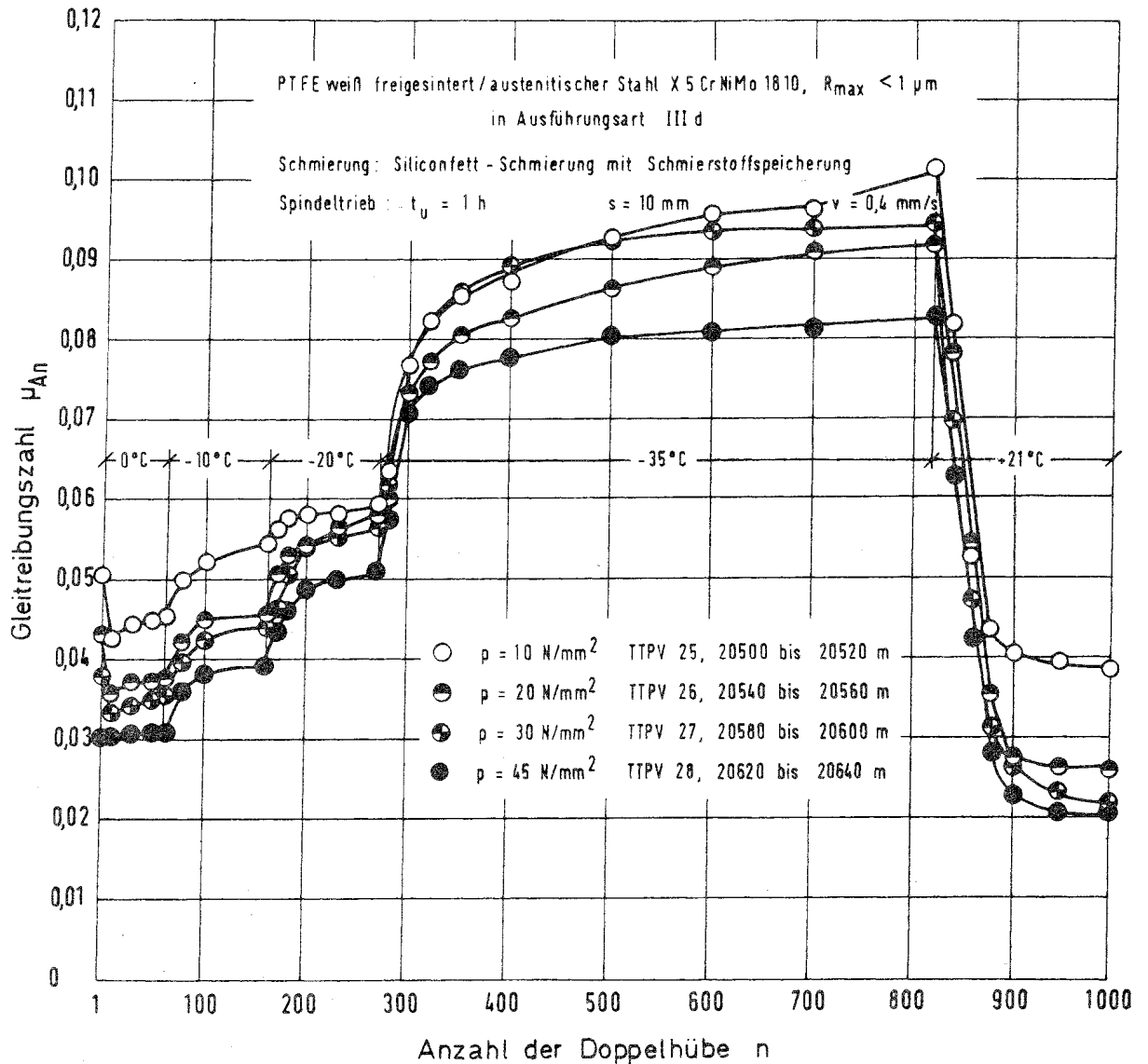
Bild 15: Einfluß der Temperatur auf das Gleitreibungsverhalten nach unterschiedlichen Wegabschnitten des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) über rd. 20000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungsart III d (ohne mechanische Nachbehandlung) bei der spezifischen Standardbelastung  $p = 30 \text{ N/mm}^2$



**Bild 16:** Abhängigkeit der Reibungszahl von Gleitweg und Temperatur des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) über rd. 20000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 18 10 (Avesta-Blech, Gleitfläche mechanisch nachbehandelt) bei erhöhter spezifischer Belastung von  $p = 45 N/mm^2$  /12/



**Bild 17:** Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) bei Raumtemperatur auf die Reibungshöhe nach rd. 20000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs bei  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  Flächenpressung, ermittelt in Untersuchungsphase V über jeweils 20 m Gleitweg



**Bild 18:** Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) bei stufenweiser Absenkung der Temperatur auf die Reibungshöhe nach rd. 20000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs bei  $p = 30 N/mm^2$  Flächenpressung, ermittelt in Untersuchungsphase V über jeweils 20 m Gleitweg

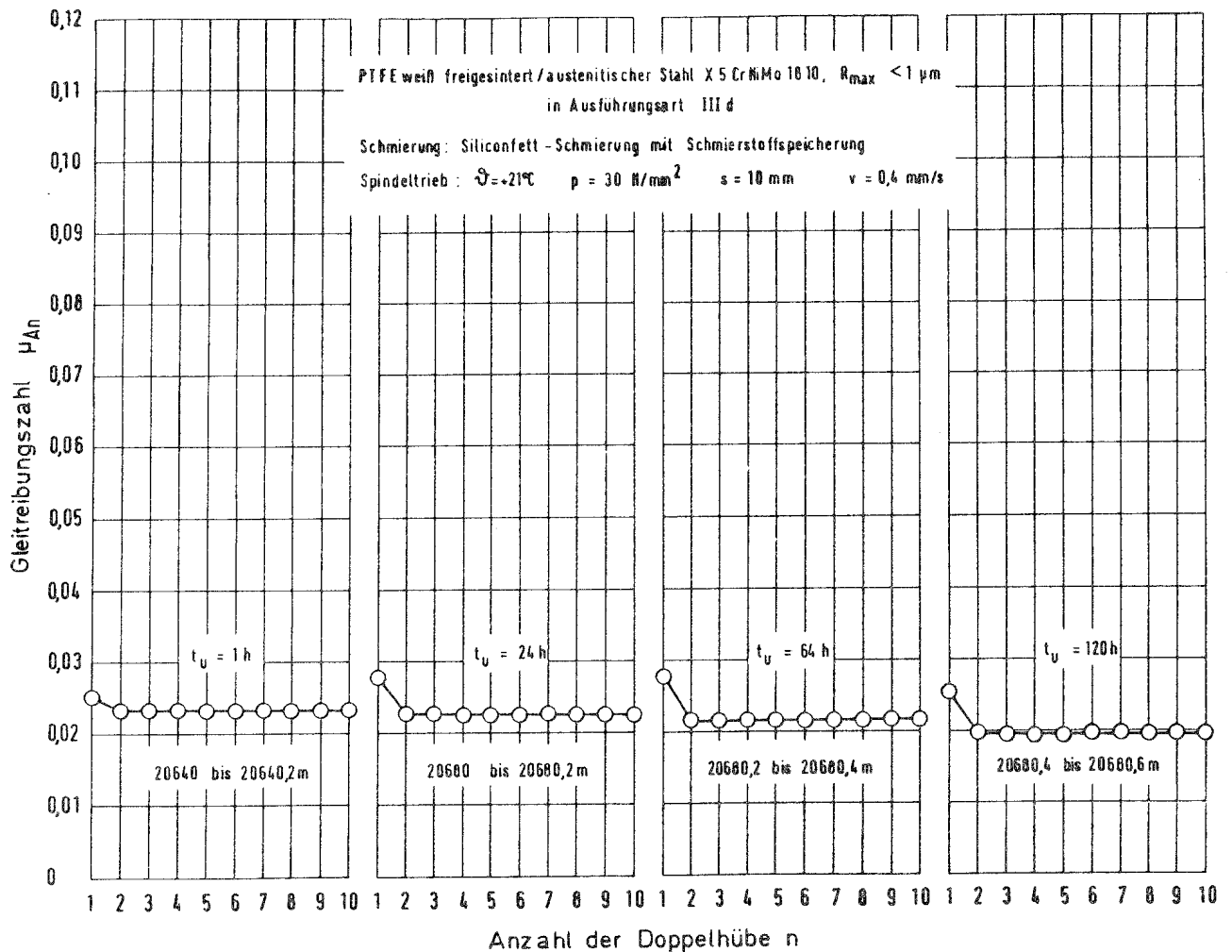


Bild 19: Auswirkung von Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast bei Raumtemperatur und  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  Flächenpressung auf die Reibungszahl beim Wiederanfahren nach rd. 20000 m aufaddiertem Gleitweg, ermittelt in Untersuchungsphase VI über jeweils 0,2 m Gleitweg



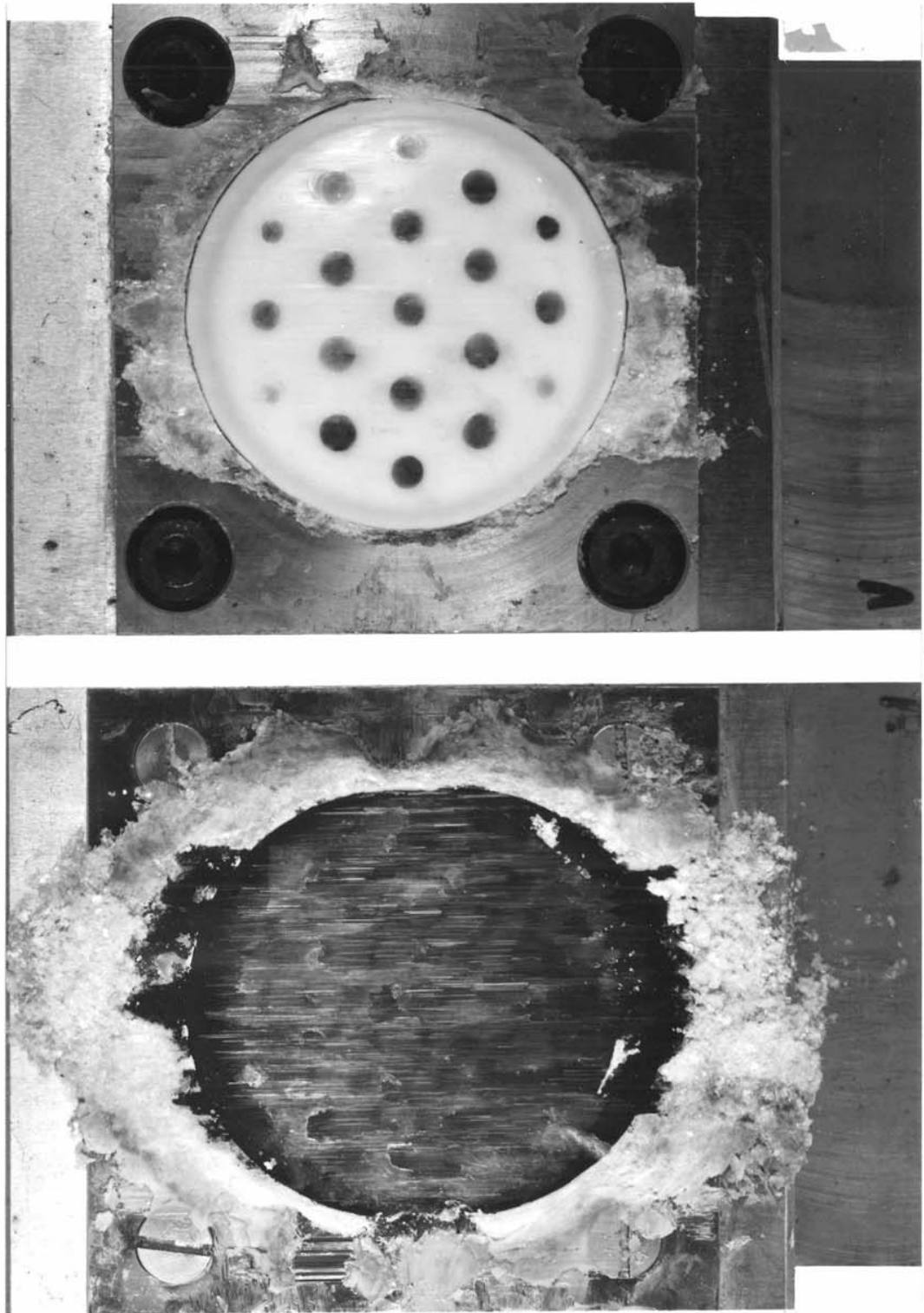


Bild 20: Modellagerkörper PTFE weiß freigesintert und austenitischer Stahl X 5 CrNiMo 18 10 in Ausführungsart IIIId (ohne mechanische Nachbehandlung) mit Siliconfett 300 mittel als Schmierstoff (Modellager 1) nach Abschluß der Untersuchung über 20680 m aufaddierten Gleitweg bei einer Flächenpressung von  $p = 30 \text{ N/mm}^2$  (kurzfristig 45, 20 und  $10 \text{ N/mm}^2$ ), Versuchsablauf vgl. Tafel 5 und 6