

Langzeit-Reibungs- und Verschleiß-
versuche mit PTFE-Gleitlagern,
Gleitpartner austenitischer Stahl mit
Gleitfläche in Ausführungsart IIIc,
mechanisch nachbehandelt

T 2068

T 2068

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

Forschungsbericht aus dem Bauforschungsbereich
des Instituts für Bautechnik in Berlin

**LANGZEIT-REIBUNGS- UND VERSCHLEISSVERSUCHE
MIT PTFE-GLEITLAGERN,
GLEITPARTNER AUSTENITISCHER STAHL MIT GLEITFLÄCHE
IN AUSFÜHRUNGSART IIIc, MECHANISCH NACHBEHANDELT**

Dr.-Ing. Volker Hakenjos

Dipl.-Ing. Armin Gerber

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
MPA-Auftrags-Nr. 810 075 000

Mit finanzieller Beteiligung der Firmen:

Glacier GmbH - Sollinger Hütte, Uslar
Gumba Gummi im Bauwesen GmbH, Vaterstetten
Ing. (grad.) Ronald Kaiser Ing.-Büro-Maschinenbau, München
Friedrich Maurer Söhne GmbH & Co. KG, München
Schwäbische Hüttenwerke GmbH Büro Esslingen, Esslingen
Vorspann-Technik GmbH, Ratingen

Forschungsauftrag IV 1-5-412/84 und 1-5-412/86

Forschungsvertrag von 1984-09-24 und 1986-01-30

Forschungsbericht von 1988-10-31

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	2
2 Entwicklung der Prüftechnik	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 Tribologisches System Brückenlager	4
2.3 Prüftechnik	5
3 Versuchseinrichtung	7
4 Stoffe und Probekörperabmessungen	8
5 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung	10
6 Versuchsergebnisse	12
6.1 Untersuchungsphase I bis IV Dauergleitreibungsversuch bei $p = 30 \text{ N/mm}^2$	13
6.2 Untersuchungsphase V und VII Einfluß der Flächenpressung ($p = 10/20/30/45 \text{ N/mm}^2$)	18
6.3 Untersuchungsphase VI und VIII Einfluß von Bewegungsunterbrechung	19
6.4 Beurteilung des Modellagers nach dem Versuch	20
7 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	21
8 Literatur	23
9 Tafeln und Bilder	24

1 Einleitung

Die Zulassungsbestimmungen für PTFE-Brückenlager schreiben als Gegenkörper im ebenen Gleitteil den austenitischen Stahl 1.4401 mit Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc und mechanischer Nachbehandlung vor. Dabei darf die gemittelte Rauhtiefe R_z 1 μm nicht überschreiten.

Bei austenitischen Gleitblechen werden beim Walzvorgang je nach Charge unterschiedlich viele lose mikroskopisch kleine Partikel in die Grenzschicht eingewalzt. Durch die Schubbeanspruchung beim Gleitvorgang können diese in die PTFE-Gleitfläche eingebettet oder auch im Schmierstoff abgelagert werden.

Durch die mechanische Nachbehandlung (Schleifen und Polieren) wird im sog. Laue-Verfahren bis maximal 30 μm der Oberfläche abgetragen. Die häufig als Kriterium für die Eignung von austenitischem Stahl herangezogene Schwarzfärbung des Schmierstoffes - als Folge herausgelöster Stahlpartikel des Stahlbleches - wurde bei Versuchs- und ausgebauten Brückenlagern sowohl mit unbehandelten IIIId-Blechen als auch mit mechanisch nachbehandelten IIIc-Blechen beobachtet.

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

Obwohl bei diesen mit Siliconfett versehenen Gleitsystemen von einer wirksamen Dauerschmierung ausgegangen wird, handelt es sich dabei trotz der Schmierstoffspeicherung um eine einmalige Schmierung, die nicht in der Lage ist, über beliebig große Wegstrecken das anfänglich niedrige Reibungsniveau beizubehalten. Im Verlauf größer werdender Gleitwege verbraucht sich das im Schmierstoff enthaltene Siliconöl und bewirkt damit zwangsläufig einen Anstieg im Reibungs- und Verschleißverhalten.

Alle bisher durchgeführten Reibungs- und Verschleißversuche mit mechanisch nachbehandeltem Gleitblech (Laue-Blech) beschränkten sich auf Kurzzeitversuche bis 20 m Gleitweg und Dauerversuche bis zu 2000 m Gleitweg. Ab 1974 wurde ein Gesamtgleitweg von 5000 m bezüglich des Nachweises der Brauchbarkeit für PTFE-Gleitlager als ausreichend angesehen. Seit 1980 wird die Ansicht vertreten, daß für die Beurteilung des Langzeitverhaltens von Brückenlagern Gleitwege bis 20 km erforderlich sind. Mit dem mechanisch nicht behandeltem IIIId-Blech wurde deshalb bei der Standardpressung von 30 N/mm^2 ein 20 km-Dauergleitreibungsversuch vorgenommen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, Aussagen über das Dauerreibungs- und Verschleißverhalten von mechanisch nachbehandeltem austenitischem IIIIc-Stahl über einen Gesamtgleitweg von 20 km zu erhalten und vergleichend mit den Ergebnissen des 20 km-Versuchs mit unbehandeltem IIIId-Stahl zu werten.

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 bei einem Brückenlager unmittelbar an den Abläufen beteiligten Stoffe (PTFE, austenitischer Stahl, Siliconfett und Umgebungs-

medium) 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.

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 Überbaus 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) /3/.

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

Tribologische Untersuchungen von Gleitwerkstoffen zur Ermittlung von Reibungszahlen werden nach unterschiedlichen Prüfkategorien durchgeführt. Ausgehend von Versuchen mit einfachen (ringförmigen) Probekörpern und einsinnig umlaufender Bewegung /4,5/, 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 und eine originalgetreue Schmierung (Schmierstoffspeicherung) anzuwenden /6/. Die Auswirkung von Temperaturänderungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten /7 bis 9/ läßt sich praxisorientiert durch Anwendung von Temperaturprogrammen im Bereich von Raumtemperatur bis -35 °C erreichen. Als Arbeitshypothese wird im Vergleich zum Betrieb mit dieser Modellager-Prüftechnik 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 eine Versuchseinrichtung /1/ entwickelt, in der im Modellagerversuch das Reibungs- und Verschleißverhalten unter möglichst praxisnahen Bedingungen geprüft werden kann. Dabei werden die (verhältnismäßig) langsamen Bewegungen eines Bauwerkes 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 /1/. Bei dieser Anordnung besteht eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Antrieb, Meßglied und Gleitfläche. Das Versuchslager(-Paar) wird von einem Kälteaggregat über zwei Kühlplatten auf die vorgegebene Versuchstemperatur abgekühlt und ist durch eine Elastomerschürze geschützt. Die Messung der Gleitflächentemperatur erfolgt über ein Thermoelement unterhalb des austenitischen Gleitbleches.

Wie bei den früheren 20 km-Dauerversuchen wurde eine Sondervorrichtung, Bild 2, verwendet. Diese ermöglicht den Dauerversuch in Etappen durchzuführen und verhindert, daß die Gleitpaarung während der Stillstandszeit lastfrei ist. Außerdem bietet die Vorrichtung die Möglichkeit, zwei Gleitpaarungen als Gesamtheit zu prüfen und zu einem späteren Zeitpunkt den Versuch mit nur einem 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 Bauwerkes zu erwartende Wert.

4 Stoffe und Probekörperabmessungen

Für die Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens über rd. 20 km Gleitweg mit geschliffenem und hochglanzpoliertem austenitischem Gleitblech (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc) wurden die Gleitpartner - PTFE weiß und Siliconfett - aus den gleichen Herstellungschargen wie beim 20 km Versuch mit austenitischem Gleitblech in IIId-Ausführung verwendet. Durch die chargengleichen Gleitpartner läßt sich die Streubreite, insbesondere bei Einzelversuchen, deutlich verringern.

Das für den Versuch verwendete geschliffene und hochglanzpolierte Gleitblech wurde aus der laufenden Brückenlagerfertigung entnommen und entspricht dem normalen Verarbeitungsstandard.

Im einzelnen wurden folgende Elemente verwendet:

Grundkörper:

2 Lagerscheiben aus PTFE weiß freigesintert

güteüberwachte Brückenlagerqualität

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_z rd. $3\mu\text{m}$, vgl. Bild 3

Gegenkörper:

2 Gleitbleche aus austenitischem Stahl (X 5 CrNiMo 17 12 2)

Werkstoff gemäß Abnahmeprüfzeugnis B nach DIN 50 049

Abmessungen 120 mm x 110 mm x 2,5 mm

ursprüngliche Oberfläche in Ausführungsart IIIc (kaltgewalzt), Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert
Rauhtiefe der Gleitfläche $R_z < 1\mu\text{m}$, vgl. Bild 4

Oberflächenhärte (Kleinlasthärte) 171 HV 1

Zwischenstoff:

Schmierstoff Siliconfett 300 mittel

güteüberwachte Brückenlagerqualität

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

Die verwendeten Elemente und deren Werkstoffeigenschaften sind
durch Zeugnisse belegt.

5 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Die Versuchsbedingungen des Dauerversuchs wurden entsprechend den Grundlagenversuchen mit PTFE-Gleitlagern sowie den Vorgaben aus Zulassungsbescheiden bzw. den "Bedingungen für die bauliche Durchbildung und Überwachung (Güteüberwachung) von PTFE-Gleitlagern" und in gleicher Weise wie der 20 km-Dauerversuch mit austenitischem Gleitblech in Ausführungsart IIIId festgelegt, Tafel 1. Bis zu einem aufaddierten Gleitweg von rd. 20 km wurde wie beim IIIId-Versuch die spezifische Standardbelastung von $p = 30 \text{ N/mm}^2$ gemäß Lastfall I gewählt. Nach Abschluß des 20 km-Versuchs wurde mit beiden Modellagern (20 km- und 5 km-Lager) zusätzlich der Einfluß der Flächenpressung ($p = 10$ bis 45 N/mm^2) und der Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast ($t_u = 1$ bis 120 h) bei $p = 30 \text{ N/mm}^2$ untersucht.

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

Der Versuchsablauf der Hauptversuche geht aus Tafel 2 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 (relativ langsame Hin- und Herbewegungen aufgrund von Wärmedehnung und schnellere Bewegungen aus Verkehrsschwingungen) so gegliedert, daß zu Versuchsbeginn und nach den Versuchsabschnitten (Raumtem-

peratur-Versuch bei $\vartheta = +21 \text{ }^\circ\text{C}$) über jeweils 1000 m Gleitweg - durchgeführt mit einem Kurbeltrieb bei $v = 2 \text{ mm/s}$ - jeweils 1 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 5 zu ersehen. Beim Wechsel der Antriebsart blieb das Modellager unter Standardlast. Nach den drei Versuchsunterbrechungen wurde beim Wiedereinbau der Prüfeinrichtung in die Anlage jeweils ein Tieftemperaturprogramm-Anschlußversuch durchgeführt. Die vertikale Belastung und der Ausbau des Modellagers erfolgte bei mittlerer Stellung des Modellagers. Mit Hilfe der selbstregelnden Konstanthaltung wurde die Belastung über die Versuchsdauer gleichbleibend gehalten.

Während der Versuchsunterbrechung und nach dem Ausbau der Sondervorrichtung aus der Prüfmaschine blieben die Lager durch die Festhaltekonstruktion mit rd. 10 N/mm^2 weiterhin verspannt. Ausgehend von der Spalthöhe h im unbelasteten Zustand wurde die Abnahme der Spalthöhe Δh bzw. das Spaltmaß $h - \Delta h$ zu Beginn und am Ende jeder Untersuchungsphase (I bis IV) ermittelt.

Der Einfluß der Flächenpressung wurde in Untersuchungsphase V und VII im Raumtemperatur- und Tieftemperaturprogramm-Versuch bei $v = 0,4 \text{ mm/s}$ über jeweils 20 m Gleitweg ermittelt. Mit den Anschlußversuchen ergeben sich bei den 4 verschiedenen spezifischen Belastungen ($p = 10/20/30/45 \text{ N/mm}^2$) jeweils 10 weitere Einzelversuchsabschnitte bis zu einem aufaddierten Gesamtgleitweg von 20680 m (Lager 1) bzw. 5340 m (Lager 2), Tafel 3.

Als Abschluß der Untersuchung wurde in Untersuchungsphase VI (Lager 1) und VIII (Lager 2) der Einfluß der Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 \text{ N/mm}^2$ und Raumtemperatur nach $t_u = 1, 24, 64$ und 120 h ermittelt.

6 Versuchsergebnisse

Entsprechend der Bewegungsart - hin- und hergehende Bewegung - im Brückenlager 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 des 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 6. Während des gesamten Versuchs wurde dabei Gleiten ohne jegliche Stick-Slip-Erscheinungen (Ruckgleiten) beobachtet.

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

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

In Tafel 2 ist der Versuchsablauf des aus 44 Abschnitten bestehenden Dauerversuchs bei $p = 30 \text{ N/mm}^2$ Flächenpressung bis rd. 20 000 m Gleitweg angegeben. Die Versuchsphase I wurde mit 2 Modellagern (Lager 1 und 2) und die Phase II bis IV mit einem Modellager (Lager 1) durchgeführt. Im ersten Versuchsabschnitt (TTPV 1) ist mit dem Spindeltrieb bei $v = 0,4 \text{ mm/s}$ Gleitgeschwindigkeit das Gleitreibungsverhalten bei stufenweiser Abkühlung bis $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ und anschließendem Erwärmen auf $+21 \text{ }^\circ\text{C}$ mit neuen Modellagern aufgenommen worden. 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 aufaddiert und anschließend - wiederum nach $t_u = 1 \text{ h}$ - die Veränderung der temperaturabhängigen Reibungshöhe infolge des inzwischen zurückgelegten größeren Gleitweges in einem weiteren Tieftemperaturprogramm-Versuch (TTPV 2) ermittelt. Für den Anfang und die Fortsetzung des Dauerversuches ergibt sich folgendes Schema:

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

Abweichend von diesem Versuchschemata 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 der Versuchsunterbrechung unter vertikaler Last von 10 N/mm^2 vorgenommen. Damit teilt sich der gesamte aufaddierte Gleitweg der Untersuchungsphasen I bis IV einschließlich der Anschlußversuche auf in

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

In Bild 7 bis 10 sind die kennzeichnenden Reibungszahlen μ_{An} der Tieftemperaturprogramm-Versuche (TTPV) und der Raumtemperatur-

Versuche (RTV) von Versuchsphase I bis IV aufgetragen. Die bei Versuchsbeginn und zum Zeitpunkt der Bewegungsunterbrechungen gemessenen Spaltmaße $h - \Delta h$ im Modellager sind in Tafel 4 zusammengestellt.

Nach einer Vorbelastungszeit von $t_v = 1$ h beginnt der Dauerversuch bei 0°C mit einem Anfahrwert von rd. 0,011 und fällt ab dem zweiten Doppelhub auf ein Reibungsniveau, das unter 0.005 liegt, vgl. Bild 7. Im weiteren Verlauf des 1. Versuchsabschnittes (TTPV 1) steigt die Reibung entsprechend dem Absenken der Temperatur und erreicht in der -35°C -Phase einen Maximalwert von rd. 0.09. Mit Erwärmen auf $+21^\circ\text{C}$ nimmt die Reibung wieder deutlich ab und sinkt auf einen Wert von rd. 0,003. In den weiteren Raumtemperaturversuchen (RTV 1 bis 3) zeigt sich bei $+21^\circ\text{C}$ über einen Gleitweg von rd. 3000 m nur eine geringe Zunahme im Reibungsverhalten. Ganz im Gegensatz dazu nimmt in den Tieftemperaturprogramm-Versuchen das Reibungsniveau in den jeweiligen Temperaturstufen deutlich zu und erreicht in TTPV 3 nach rd. 2000 m Gleitweg einen Reibungsverlauf, der teilweise doppelt so hoch wie bei TTPV 1 liegt. Am Ende der Untersuchungsphase I nach rd. 5000 m Gleitweg beträgt die maximale Reibungszahl in der -35°C -Phase rd. 0,019 (TTPV 6) und am Ende des Versuchs bei $+21^\circ\text{C}$ rd. 0,007.

Ausgehend von einer Spalthöhe $h = 2,2$ mm (im unbelasteten Zustand) hat sich das Spaltmaß beider Lager nach Aufbringen der spezifischen Belastung von $p = 30$ N/mm² auf rd. 2,1 mm vor Bewegungsbeginn im Verlauf der Untersuchungsphase I um rd. 0,35 mm auf 1,75 mm reduziert, vgl. Tafel 4. Die Spaltmaßabnahme ist in diesem Bereich weniger eine Folge von einsetzendem Verschleiß als vielmehr verursacht durch Zusammendrücken und Verformen (Kriechen und Fließen) des überstehenden (nicht gekammerten) Teils der PTFE-Scheibe.

Mit Ausnahme des hohen Wiederanfahrwertes von rd. 0,04 als Folge der nahezu 50-tägigen Versuchsunterbrechung ergibt sich in Untersuchungsphase II im Anschlußversuch TTPV 7 ein etwas niedrigeres Reibungsniveau, vgl. Bild 7 und 8. In den weiteren Versuchsabschnitten bei stufenweiser Absenkung der Temperatur steigt insbesondere bei tiefen Temperaturen die Reibung deutlich an und

erreicht in TTPV 12 nach rd. 10000 m Gleitweg in der -35°C -Phase mit 0,038 einen nahezu doppelt so hohen Wert wie nach rd. 5000 m Gleitweg. Das Reibungsniveau im Raumtemperatur-Versuch steigt wesentlich langsamer an und erreicht nach rd. 10000 m Gleitweg eine Gleitreibungszahl von rd. 0,012.

Das Spaltmaß hat sich während der Untersuchungsphase II um weitere 0,25 mm auf 1,50 vermindert.

Der Anschlußversuch TTPV 13 ergibt mit TTPV 12 eine gute Übereinstimmung, vgl. Bild 8 und 9. Im Verlauf der Untersuchungsphase III nimmt in den Tieftemperaturprogramm-Versuchen die Reibung bis auf rd. 0,072 in der -35°C -Phase zu. Bei den Raumtemperatur-Versuchen ergibt sich im Reibungsverhalten keine wesentliche Veränderung. Nach rd. 15000 m Gleitweg beträgt die ermittelte Reibungszahl bei $+21^{\circ}\text{C}$ rd. 0,013.

Das Spaltmaß hat in Untersuchungsphase III um 0,15 auf rd. 1,35 mm abgenommen.

In der Untersuchungsphase IV zeigt der Anschlußversuch TTPV 19 ein etwas höheres Reibungsniveau als TTPV 18 auf, vgl. Bild 9 und 10. Bis zum Ende des Dauerversuchs über rd. 20000 m stabilisiert sich das Reibungsniveau und erreicht in der -35°C -Phase eine Reibungszahl von rd. 0,087. Die im Raumtemperatur-Versuch nach rd. 20000 m ermittelte Reibungszahl beträgt rd. 0,014.

Das Spaltmaß hat in der Untersuchungsphase IV um lediglich 0,05 mm auf einen Wert von rd. 1,3 mm abgenommen.

In Bild 11 sind die kennzeichnenden Reibungszahlen des gesamten Dauergleitreibungsversuchs aufgetragen. Insbesondere bei -35°C ist in Untersuchungsphase I und IV eine degressive Zunahme der Reibung festzustellen, die dann in Untersuchungsphase II und III in einen sehr progressiven Verlauf übergeht.

Die kennzeichnenden Gleitreibungszahlen aus den Tieftemperaturprogramm-Versuchen nach rd. 20/5000/10000/15000/20000 m Gleitweg sind in Bild 12 über der Temperatur aufgetragen. Wie deutlich

zu ersehen ist, nimmt insbesondere bei größeren Gleitwegen und abnehmender Temperatur die Reibung stark zu.

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit mechanisch behandeltem IIIc-Blech, vgl. Bild 11, sind die in Bild 13 aufgetragenen Reibungszahlen des mechanisch nicht nachbehandelten IIIId-Blechs dargestellt. Der wesentlichste Unterschied zeigt sich in den Reibungskurven bei $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei dem mechanisch behandelten IIIc-Blech setzt gegenüber dem unbehandelten IIIId-Blech der starke Reibungsanstieg erst bei größeren aufaddierten Gleitwegen ein. Der sog. Wegversatz beträgt bereichsweise rd. 3000 m. Das relativ hohe Reibungsniveau am Ende der Dauerversuche ist praktisch bei beiden Blecharten gleich. Die Reibungskurven der übrigen Temperaturstufen der TTPV- und RTV-Versuche weisen beim mechanisch nachbearbeiteten IIIc-Blech ein niedrigeres Niveau auf.

Die Abnahme des Spaltmaßes beträgt beim unbehandelten IIIId-Blech in den Versuchsphasen I und II insgesamt rd. 0,2 mm mehr als beim mechanisch behandelten IIIc-Blech. Im Verlauf des Versuchs über 20000 m Gleitweg hat das Spaltmaß beim behandelten Blech um rd. 0,8 mm auf 1,3 mm und beim unbehandelten Blech um rd. 0,9 mm auf 1,15 mm abgenommen.

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 N/mm^2 zulässige Wert von 0,03 bei einer Temperatur von $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit dem mechanisch nachbehandelten IIIc-Blech nach 8000 bis 9000 m Gleitweg und mit dem unbehandelten IIIId-Blech schon nach rd. 5000 m Gleitweg erreicht wird.

Trotz der hohen Reibungszahl von rd. 0,087 bei $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann von einem Versagen des Gleitlagers nicht ausgegangen werden, da erst bei Temperaturen unterhalb $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ die zulässige Reibungszahl von 0,03 nennenswert überschritten wird.

Bei der Beurteilung der Reibungszahlen ist zu beachten, daß es sich bei dem durchgeführten Dauergleitreibungsversuch um einen Einzelversuch handelt. Eine Stützung oder Ergänzung der vorliegenden Ergebnisse durch einen weiteren in entsprechender Weise vorgenommenen Dauerversuch über rd. 20000 m Gleitweg /8/, vgl. Bild 14, ist nur bedingt möglich, da dieser Versuch unter einer spezifischen Belastung von 45 N/mm² sowie mit einem mechanisch nachbehandelten Gleitblech aus austenitischem Stahl mit verhältnismäßig hoher Härte (200 HV 1) durchgeführt worden ist.

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

Im Anschluß an den Dauerversuch wurde gemäß Tafel 3 in Untersuchungsphase V mit Modellager 1 (Gesamtgleitweg rd. 20000 m bei 30 N/mm^2) und in Versuchsphase VII mit Modellager 2 (Gesamtgleitweg rd. 5000 m bei $p = 30 \text{ N/mm}^2$) die Auswirkung der Pressungsänderung auf die Reibungshöhe in Kurzzeitversuchs-Abschnitten RTV in Bild 15 und 17 sowie TTPV in Bild 16 und 18 bei $0,4 \text{ mm/s}$ Gleitgeschwindigkeit über jeweils 20 m Gleitweg untersucht. Die bekannte Reibungszahl/Pressungsabhängigkeit d. h. Reibungszunahme bei abnehmender Flächenpressung ist im untersuchten Bereich mehr oder weniger deutlich ausgeprägt. Das Modellager 2 mit einem Gleitweg von rd. 5000 m weist gegenüber Modellager 1 mit rd. 20000 m Gleitweg wesentlich niedrigere Reibungszahlen auf.

Im Raumtemperatur-Versuch und bei stufenweiser Absenkung der Temperatur ergeben sich zwischen 30 und 45 N/mm^2 keine wesentlichen Unterschiede in Verlauf und Höhe des Reibungswiderstandes.

In Bild 19 und 20 sind zum Vergleich die Ergebnisse mit unbehandeltem IIIId-Blech nach rd. 20000 m Gleitweg dargestellt. Das unbehandelte IIIId-Blech weist gegenüber dem mechanisch nachbehandelten IIIC-Blech praktisch ein durchweg höheres Reibungsniveau auf.

6.3 Untersuchungsphase VI und VIII 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 und VII (p = variabel) wurden zunächst jeweils zwei Anschlußversuche (RTV bzw. TTPV) wiederum bei 30 N/mm^2 und $0,4 \text{ mm/s}$ Gleitgeschwindigkeit jeweils über 20 m Gleitweg durchgeführt, vgl. Tafel 3, und erst dann in Untersuchungsphase VI und VIII der Einfluß der Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Last bei 30 N/mm^2 und Raumtemperatur bis 120 h untersucht.

Wie aus Bild 21 und 22 zu ersehen ist, bewirkt eine Bewegungsunterbrechung unter vertikaler Auflast grundsätzlich eine Erhöhung des Reibungswiderstandes bei der ersten Bewegung nach der Stillstandszeit. Im weiteren Verlauf des jeweiligen Versuchs ergibt sich keine wesentliche Veränderung im Reibungsniveau. Das Modellager 1 mit rd. 20000 m Gleitweg zeigt deutlich höhere Reibungszahlen als Modellager 2 mit rd. 5000 m Gleitweg.

Mit unbehandeltem IIIId-Blech, vgl. Bild 23, ergeben sich nach rd. 20000 m Gleitweg - mit Ausnahme des Wiederanfahrwertes nach 120 h - höhere Reibungszahlen als beim mechanisch nachbehandelten IIIc-Blech.

6.4 Beurteilen des Modellagers nach dem Versuch

Aufgrund der ermittelten Reibungszahlen und Spaltmaße kann beim Dauerversuch mit mechanisch nachbehandeltem IIIc-Blech wie auch beim unbehandelten IIIId-Blech nach jeweils 20000 m Gesamtgleitweg von einem Versagen der Gleitpaarung nicht ausgegangen werden. Deshalb wurden vereinbarungsgemäß Modellager 1 mit rd. 20000 m Gleitweg und Modellager 2 mit rd. 5000 m Gleitweg nach Abschluß aller Untersuchungen nicht geöffnet, sondern für weitere Versuchsreihen bereitgestellt. Insbesondere ist geplant, mögliche Veränderungen im Reibungsverhalten nach sehr großen Stillstandszeiten zu untersuchen und die Lager bis zum Versagensbereich zu prüfen.

Angaben über PTFE-Lager nach rd. 20000 m Gleitweg bei 30 und 45 N/mm² können den Untersuchungsberichten /8 und 9/ entnommen werden.

7 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Im Hinblick auf die Verwendung von austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 für bauaufsichtlich zugelassene Gleitlager wurde zur Beurteilung des Langzeitverhaltens und der Lebensdauer mit mechanisch behandeltem Gleitblech in Ursprungsoberfläche IIIc (Laue-Blech) ein Dauergleitreibungsversuch in einer speziellen Versuchseinrichtung über rd. 20000 m Gleitweg im Temperaturbereich von +21 bis -35 °C unter einer rechnerischen Flächenpressung von 30 N/mm², die der mittleren Maximalbelastung (Lastfall I) zugelassener Gleitlager entspricht, etappenweise im Vergleich zu einem in gleicher Weise durchgeführten Dauerversuch mit unbehandeltem Gleitblech in Ausführungsart IIIId 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/mm² bei Unverrückbarkeit in horizontaler Richtung. Die untersuchten Modellager waren in keiner Phase lastfrei.

Die ermittelte Reibungszahl/Gleitweg-Abhängigkeit der Gleitpaarung PTFE weiß / Austenitischer Stahl (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert), geschmiert mit Siliconfett unter Anwendung von Schmierstoffspeicherung, weist im Verlauf der untersuchten 20000 m Gleitweg im wesentlichen 3 kennzeichnende Bereiche auf.

Nach einer je nach Temperatur von linear bis degressiv verlaufenden Reibungszunahme in Untersuchungsphase I bis 5000 m Gleitweg nimmt die Reibung insbesondere bei tieferen Temperaturen in Untersuchungsphase II und III bis zu einem Gleitweg von 15000 m deutlich zu, um dann in Versuchsphase IV praktisch stabilisiert einen nahezu konstanten Wert zu erreichen, der bei -35 °C rd. 0,087 und bei Raumtemperatur rd. 0,015 beträgt.

Die in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen festgelegte Reibungszahl von 0,03 für 30 N/mm² Flächenpressung wird nach rd. 20000 m Gleitweg bei Temperaturen unterhalb -10 °C nennenswert überschritten, bei -35 °C jedoch bereits nach einem Gleitweg zwischen 8000 und 9000 m.

Der in einer vorausgegangenen Untersuchung unter praktisch gleichen Versuchsbedingungen durchgeführte Dauergleitreibungsversuch mit austenitischem Stahl in Ausführungsart III d zeigt ein etwas ungünstigeres Reibungsverhalten. Verstärkt bei tieferen Temperaturen nimmt das Reibungsniveau mit zunehmenden Gleitweg deutlich stärker zu. Am Ende des Versuchs ergibt sich bei -35 °C gegenüber dem mechanisch nachbehandelten Gleitblech praktisch kein Unterschied. Bei +21 °C liegt der Endwert mit knapp unter 0,02 etwas höher. Die festgelegte Reibungszahl von 0,03 wird schon bei 0 °C überschritten, bei -35 °C bereits schon nach einem Gleitweg von 5000 m.

Die im Anschluß an den Dauerversuch vorgenommene stufenweise Veränderung der Flächenpressung von 10 bis 45 N/mm² hat auch nach einem aufaddierten Gleitweg von 20000 und 5000 m die bekannte Abhängigkeit d. h. Abnahme der Gleitreibungszahl mit zunehmender Flächenpressung bestätigt.

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

Die Modellager wurden nach Beendigung der Untersuchung nicht geöffnet, sondern in arretiertem Zustand für weitere Untersuchungen zurückgestellt.

V. Hakenjos

(Dr.-Ing. V. Hakenjos)

A. 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 / Hakenjos, V., K. Richter, A. Gerber und J. Wiedemeyer:
Untersuchung der Bewegungen von Brückenbauwerken in-
folge Temperatur- und Verkehrsbelastung.
Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des Bun-
desministers für Verkehr FA 15.065 R 78 G
- / 4 / Uetz, H. und H. Breckel:
Reibungs- und Verschleißversuche mit Teflon.
Sonderheft der Staatlichen Materialprüfungsanstalt
an der TH Stuttgart, 7.12.1964, S. 67/76
- / 5 / Richter, K.:
Tribologisches Verhalten von Kunststoffen unter Gleit-
beanspruchung bei tiefen und erhöhten Temperaturen.
Diss. Universität Stuttgart 1981
(Fortschr.-Bericht VDI-Zeitschrift Reihe 5, Nr. 54)
- / 6 / Wellinger, K., H. Uetz und V. Hakenjos:
Gleitreibungsversuche mit Teflon.
VDI-Zeischrift 104 (1962) 18, S. 1434/1440
- / 7 / Hakenjos, V. und K. Richter:
Dauergleitreibungsverhalten der Gleitpaarung PTFE
weiß / Austenitischer Stahl für Lager im Brückenbau
Straße, Brücke, Tunnel 11 (1975), S. 294/297
- / 8 / 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 / Hakenjos, V. und A. Gerber:
Langzeit- Reibungs- und Verschleißversuche mit PTFE-
Gleitlagern, Gleitpartner Austenitischer Stahl in
Ausführungsart IIIId.
Forschungsbericht aus dem Forschungsbereich des In-
stituts für Bautechnik in Berlin FA IV/1-5-347/82

9 Tafeln und Bilder

Tafel 1: 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 ²	8836	4418	4418
rechnerische Flächenpressung p in N/mm ²	30	10...45	30
vertikale Auflast F _v in kN	264	44...198	132
Belastungszeit t _v vor Beginn der ersten Bewegung in h	1	-	-
Bewegungsunterbrechung t _u unter vertikaler Auflast in h	1	1...120	1
Stillstandszeit t ₀ bei Bewegungsumkehr (Spindeltrieb) in s		12	
Temperaturstufen θ bei den Versuchsabschnitten mit dem Spindeltrieb in °C		0/-10/-20/-35/+21	
Temperatur φ 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 _{ges} 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 ² · mm/s	12/60	4...18/60	12/60

Tafel 2: Versuchsablauf des Dauergleitreibungsversuchs,
Untersuchungsphase I bis IV

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

Versuchsphase I		Modellager 1 und 2			p = 30 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 49 Tage			p = 10 N/mm ²	
Versuchsphase II		Modellager 1			p = 30 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 50 Tage			p = 10 N/mm ²	
Versuchsphase III		Modellager 1			p = 30 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 17 Tage			p = 10 N/mm ²	
Versuchsphase IV		Modellager 1			p = 30 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 3: Versuchsablauf der Zusatzuntersuchungen im Anschluß an den Dauergleitreibungsversuch bis 20480 m Gleitweg mit Modellager 1 (Untersuchungsphase V und VI) bzw. bis 5120 m Gleitweg mit Modellager 2 (Untersuchungsphase VII und VIII)

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

Versuchsphase V	Modellager 1		p = variabel		
	p = 10 N/mm ²	20480 m	RTV 21	20500 m	
		20500 m	TTPV 25	20520 m	
	p = 20 N/mm ²	20520 m	RTV 22	20540 m	
		20540 m	TTPV 26	20560 m	
	p = 30 N/mm ²	20560 m	RTV 23	20580 m	
		20580 m	TTPV 27	20600 m	
	p = 45 N/mm ²	20600 m	RTV 24	20620 m	
		20620 m	TTPV 28	20640 m	
	Versuchsphase VI	Modellager 1		p = 30 N/mm ²	
		Anschlußversuche	20640 m	RTV 25	20660 m
			20660 m	TTPV 29	20680 m
Bewegungsunterbrechung		t _u = variabel			
t _u = 24 h		20680 m	RTV	20680,2 m	
t _u = 64 h		20680,2 m	RTV	20680,4 m	
t _u = 120 h		20680,4 m	RTV	20680,6 m	
Versuchsphase VII		Modellager 2		p = 30 N/mm ²	
		Anschlußversuch	5120 m	TTPV 30	5140 m
	Modellager 2		p = variabel		
	p = 10 N/mm ²	5140 m	RTV 26	5160 m	
		5160 m	TTPV 31	5180 m	
	p = 20 N/mm ²	5180 m	RTV 27	5200 m	
		5200 m	TTPV 32	5220 m	
	p = 30 N/mm ²	5220 m	RTV 28	5240 m	
		5240 m	TTPV 33	5260 m	
	p = 45 N/mm ²	5260 m	RTV 29	5280 m	
		5280 m	TTPV 34	5300 m	
	Versuchsphase VIII	Modellager 2		p = 30 N/mm ²	
Anschlußversuche		5300 m	RTV 30	5320 m	
		5320 m	TTPV 35	5340 m	
Bewegungsunterbrechung		t _u = variabel			
t _u = 24 h		5340 m	RTV	5340,2 m	
t _u = 64 h		5340,2 m	RTV	5340,4 m	
t _u = 120 h		5340,4 m	RTV	5340,6 m	

Tafel 4: 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 Dauer-gleitreibungsversuchs über einen aufaddierten Gleitweg von 20480 m

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

Untersuchungs- phase	Versuchs- abschnitt	aufaddierter Gleitweg s_{ges} m	Spaltmaß $h-\Delta h$ mm
I	TTPV 1	0	2,10
	TTPV 6	5120	1,75
II	TTPV 7	5120	1,75
	TTPV 12	10240	1,50
III	TTPV 13	10240	1,50
	TTPV 18	15360	1,35
IV	TTPV 19	15360	1,35
	TTPV 24	20480	1,30

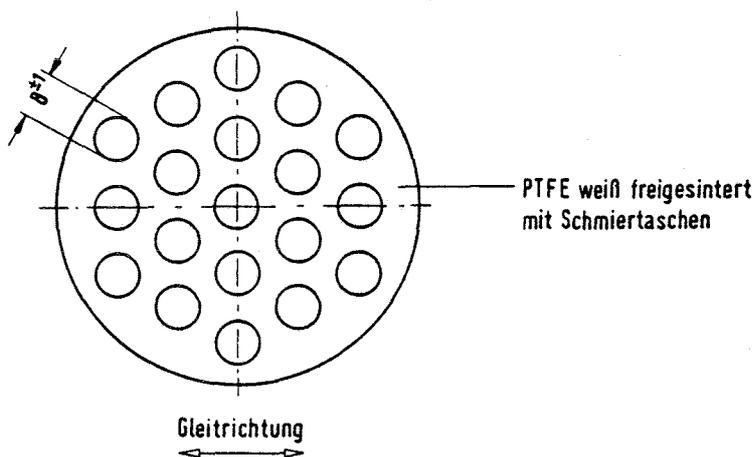
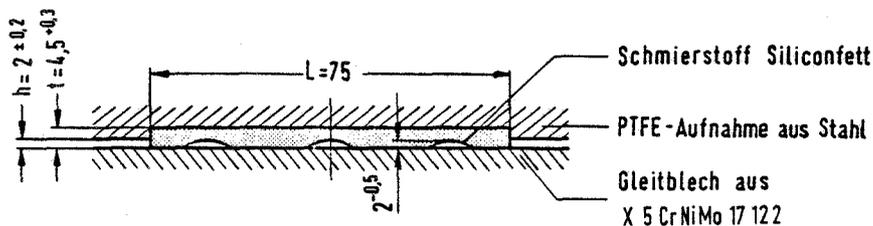
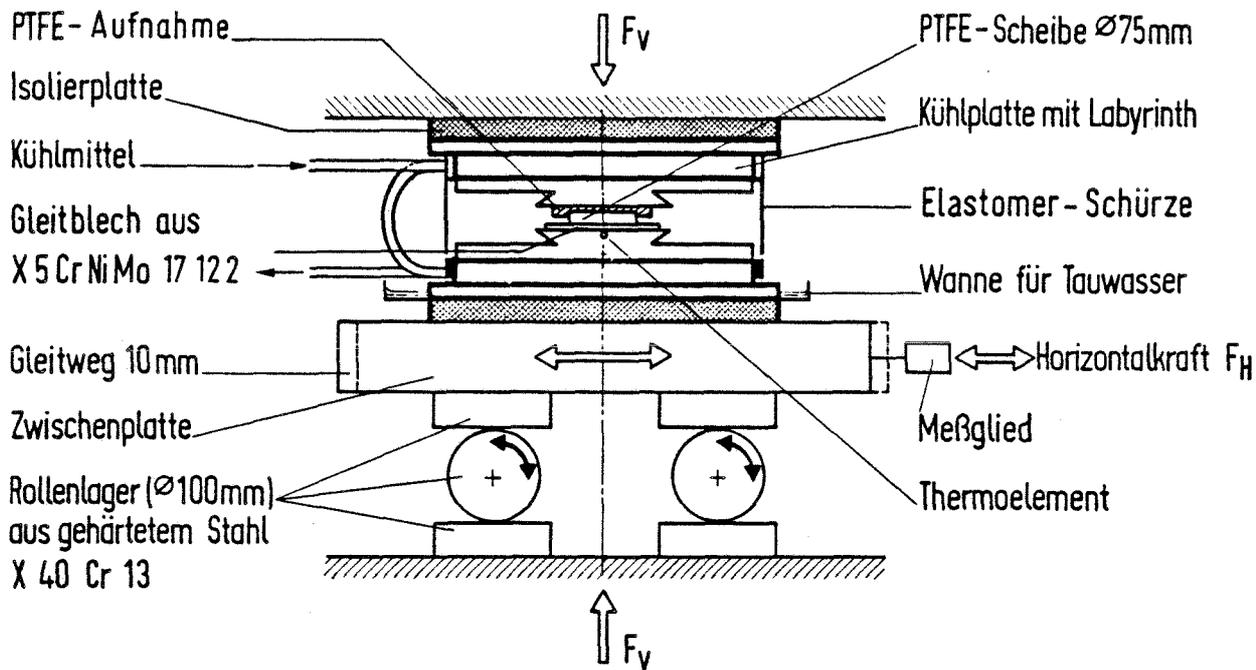


Bild 1: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für Gleitreibungsversuche mit Modellagern bei hin- und hergehender Bewegung sowie Ausführung und Einbau der Modellagerscheibe aus PTFE weiß freigesintert mit Schmieraschen

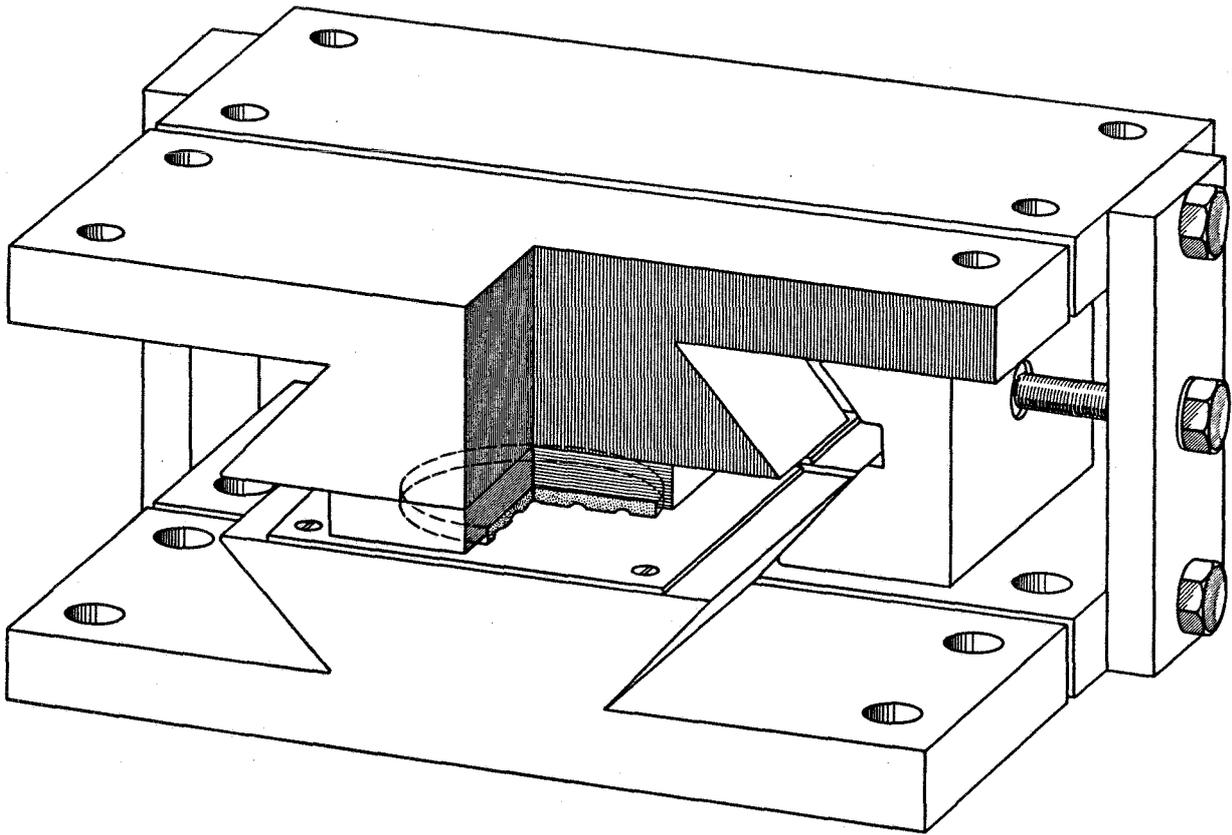
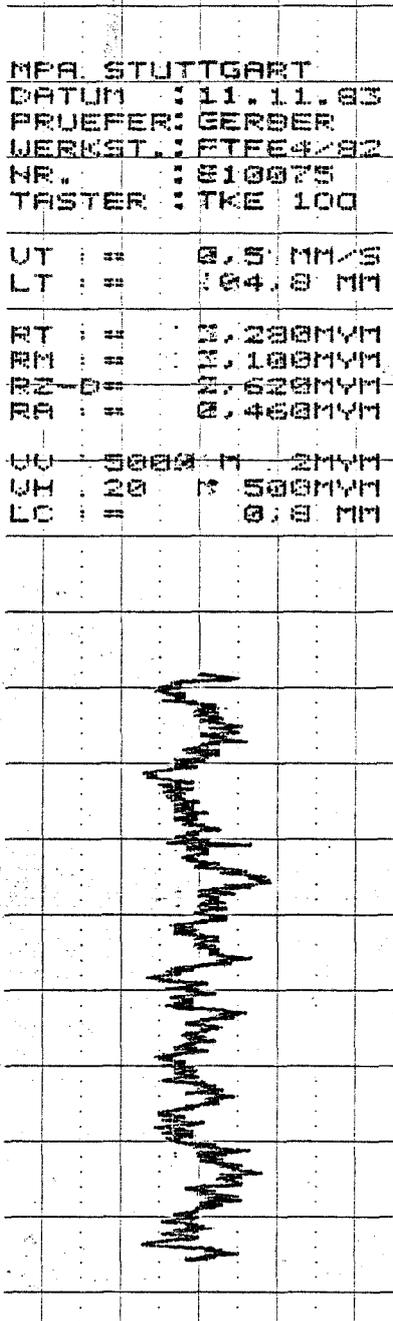


Bild 2: Sondervorrichtung für die Durchführung von Dauergleitreibungsversuchen mit zwei parallel angeordneten Modelllagern sowie Verspanneinrichtung (skizziert am hinteren Lager) für Versuchsunterbrechungen unter Teilbelastung



Reg.-Papier RP 50

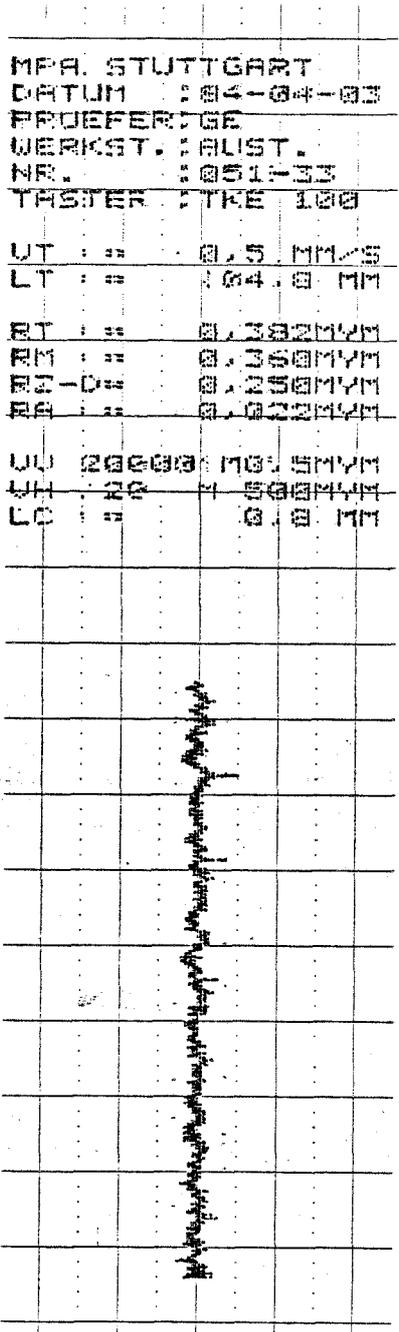
ERKE

Bild 3:

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

Die Abtastrichtung liegt quer zu den
Spaltriefen.

Rauhtiefe der Gleitfläche
 R_z rd. 3 μm



HOMMELWERKE

Reg.-Papier RP 50

MPA. STUTTGART
DATUM : 84-04-03
PROBEFERTIGE
WERKST. FAUST.
NR. : 051-33
TASTER : TKE 100
UT : = 0.5 MM/S
LT : = 104.0 MM
RT : = 0.200MM
RM : = 0.050MM
RS-DL : 0.200MM
RA : = 0.020MM
UU 20000 100.5MM
L0 0.8 MM

Bild 4:

Kennzeichnende Oberflächenprofilaufnahme des Gleitblechs aus austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert)

Die Abtastrichtung liegt quer zur Schleifrichtung.

Rauftiefe der Gleitfläche
 $R_z < 1 \mu\text{m}$

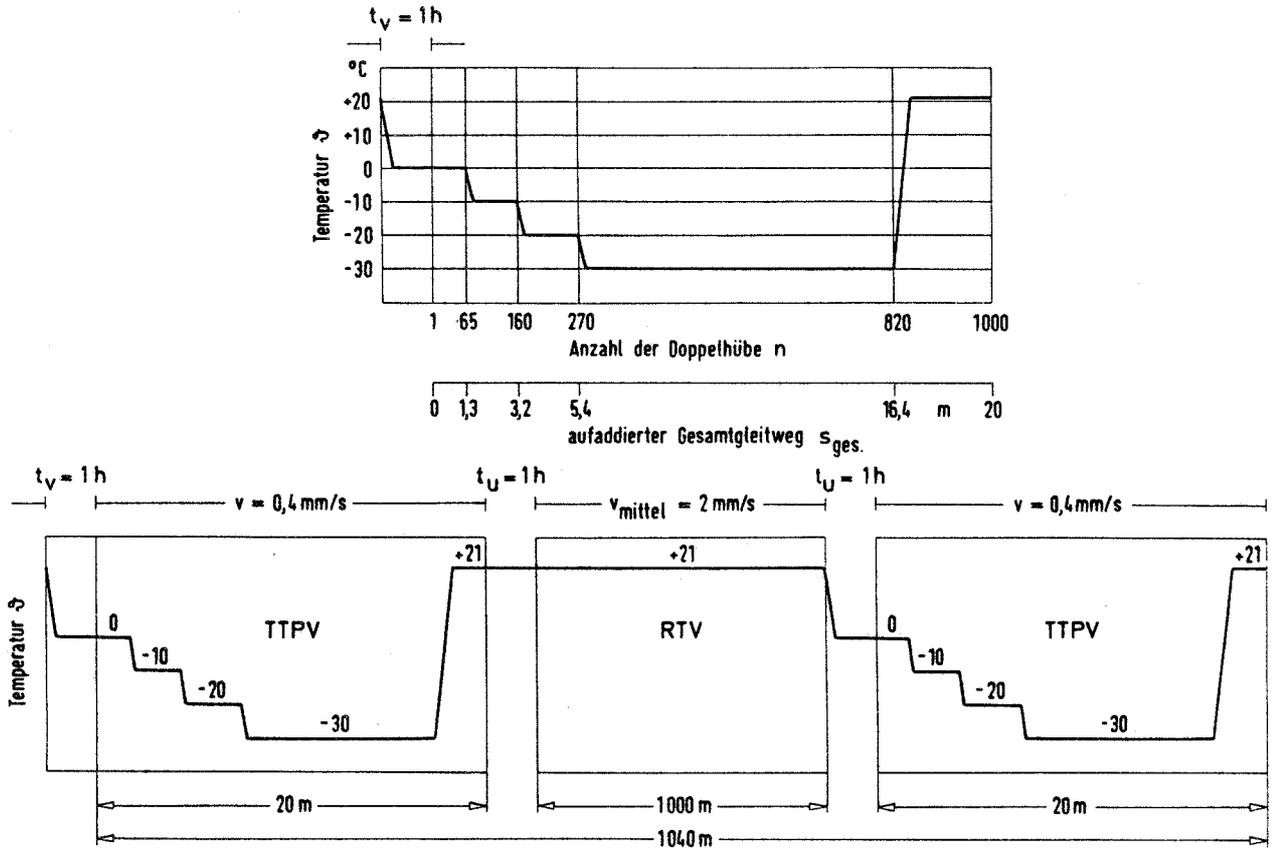


Bild 5: Schematische Darstellung vom Temperaturverlauf des Tieftemperaturprogramm-Versuchs (TTPV) und vom Beginn des Dauergleitreibungsversuchs, Versuchsphase TTPV - RTV - TTPV bis zu einem aufaddierten Gleitweg von 1040 m

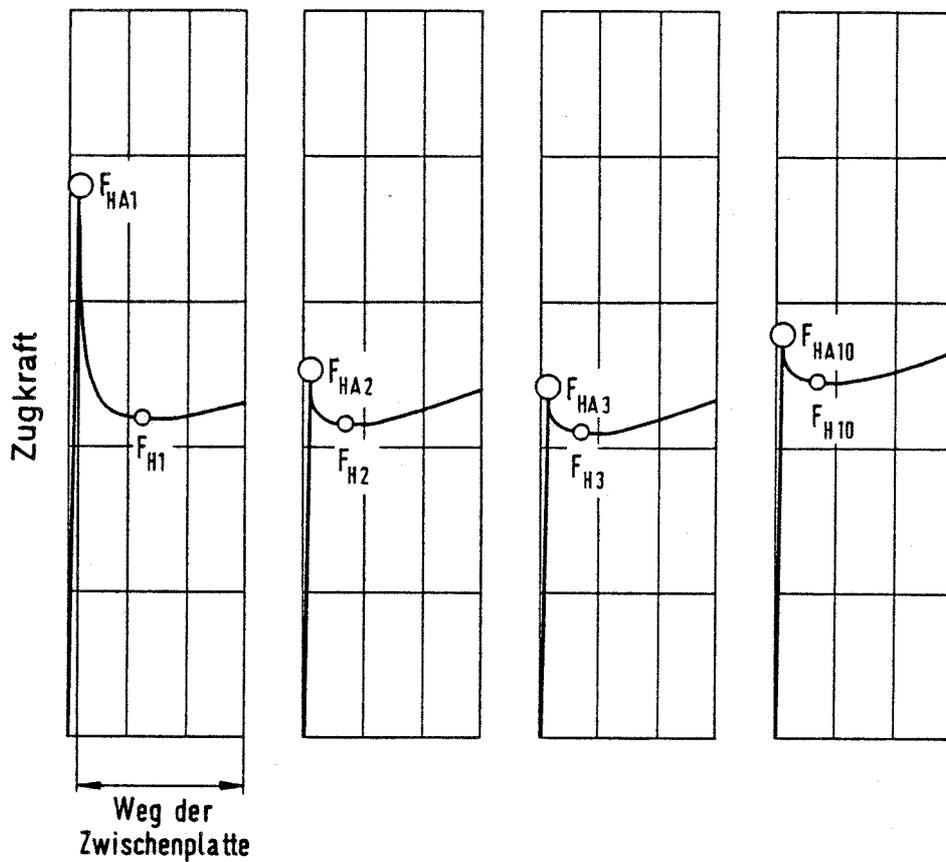


Bild 6: Schematische Darstellung des Horizontalkraftverlaufs (Zugkraft) in Abhängigkeit vom Gleitweg beim Spindeltriebversuch

Gleitreibungszahl: $\mu_{An} = F_{HAn} / F_V$ (statisch)

$\mu_n = F_{Hn} / F_V$ (dynamisch)

mit n = Anzahl der Doppelhübe

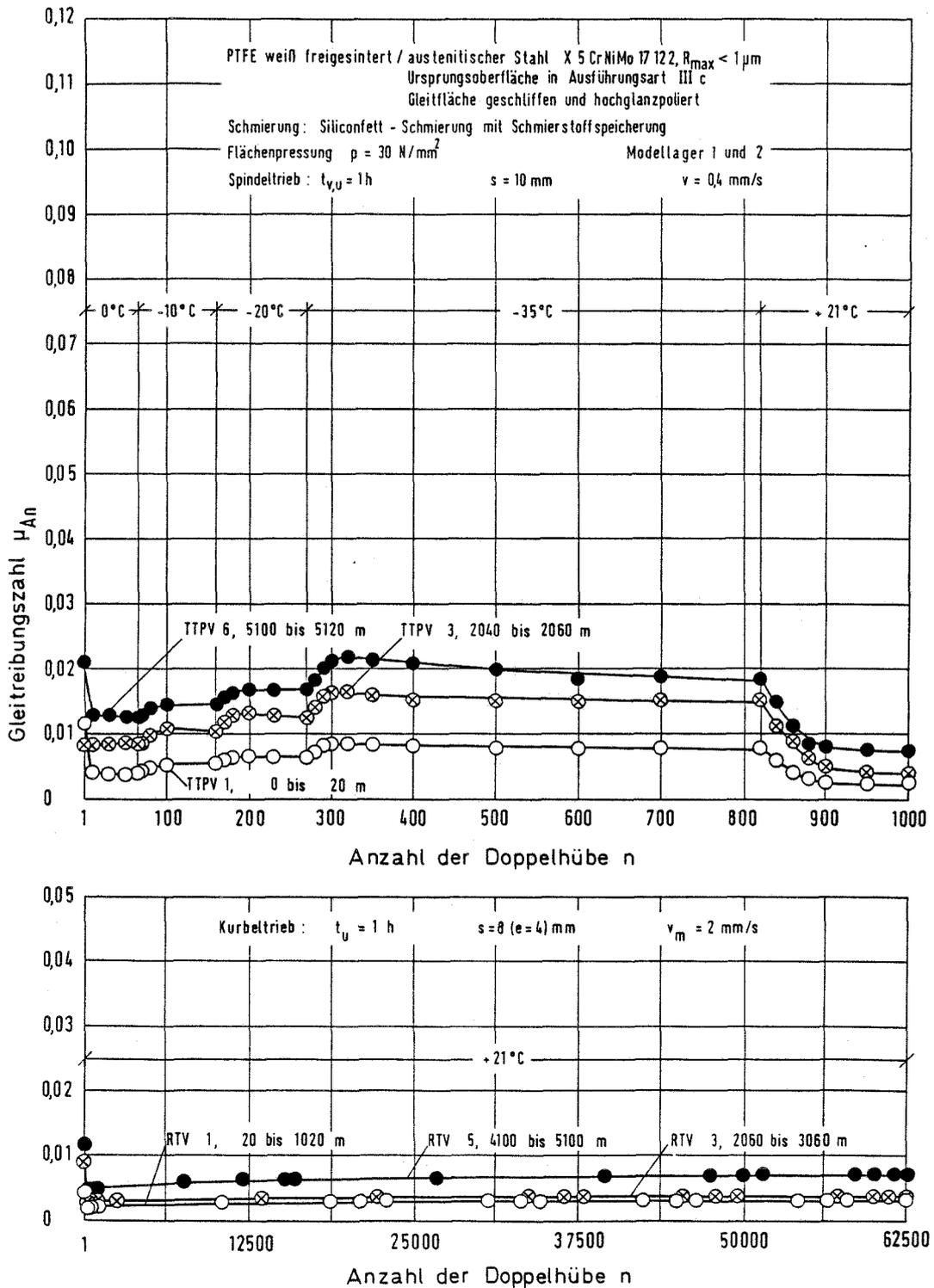


Bild 7: Gleitreibungscharakteristik von zwei parallel angeordneten Modellagern in Untersuchungsphase I (Gleitweg 0 bis 5120 m) des Dauergleitreibungsversuchs über rd. 20 000 Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung $p = 30 N/mm^2$

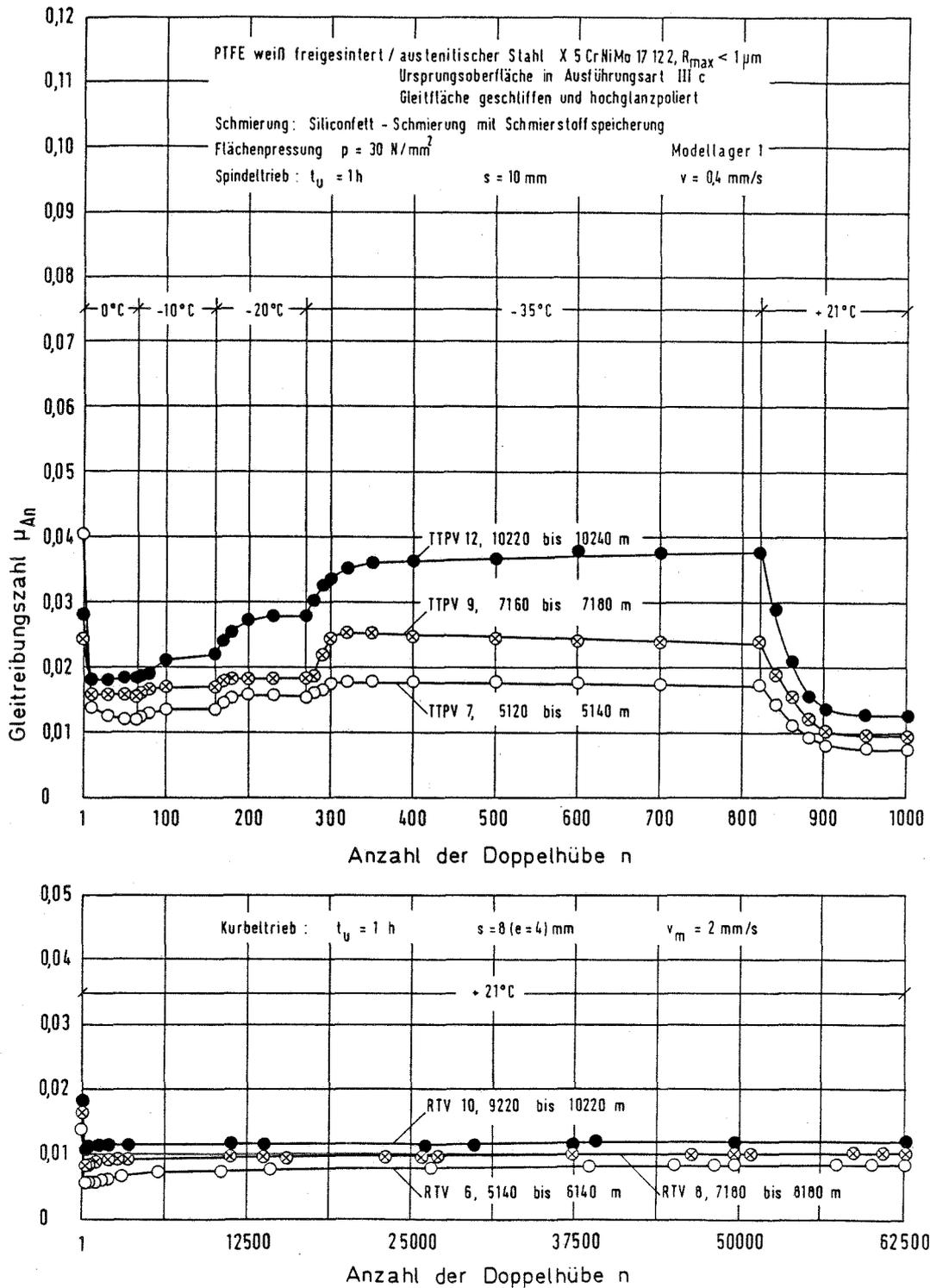


Bild 8: Gleitreibungscharakteristik eines Modellagers in Untersuchungsphase II (Gleitweg 5120 bis 10240 m) des Dauer-
 gleitreibungsversuchs über rd. 20 000 m Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung $p = 30 \text{ N/mm}^2$

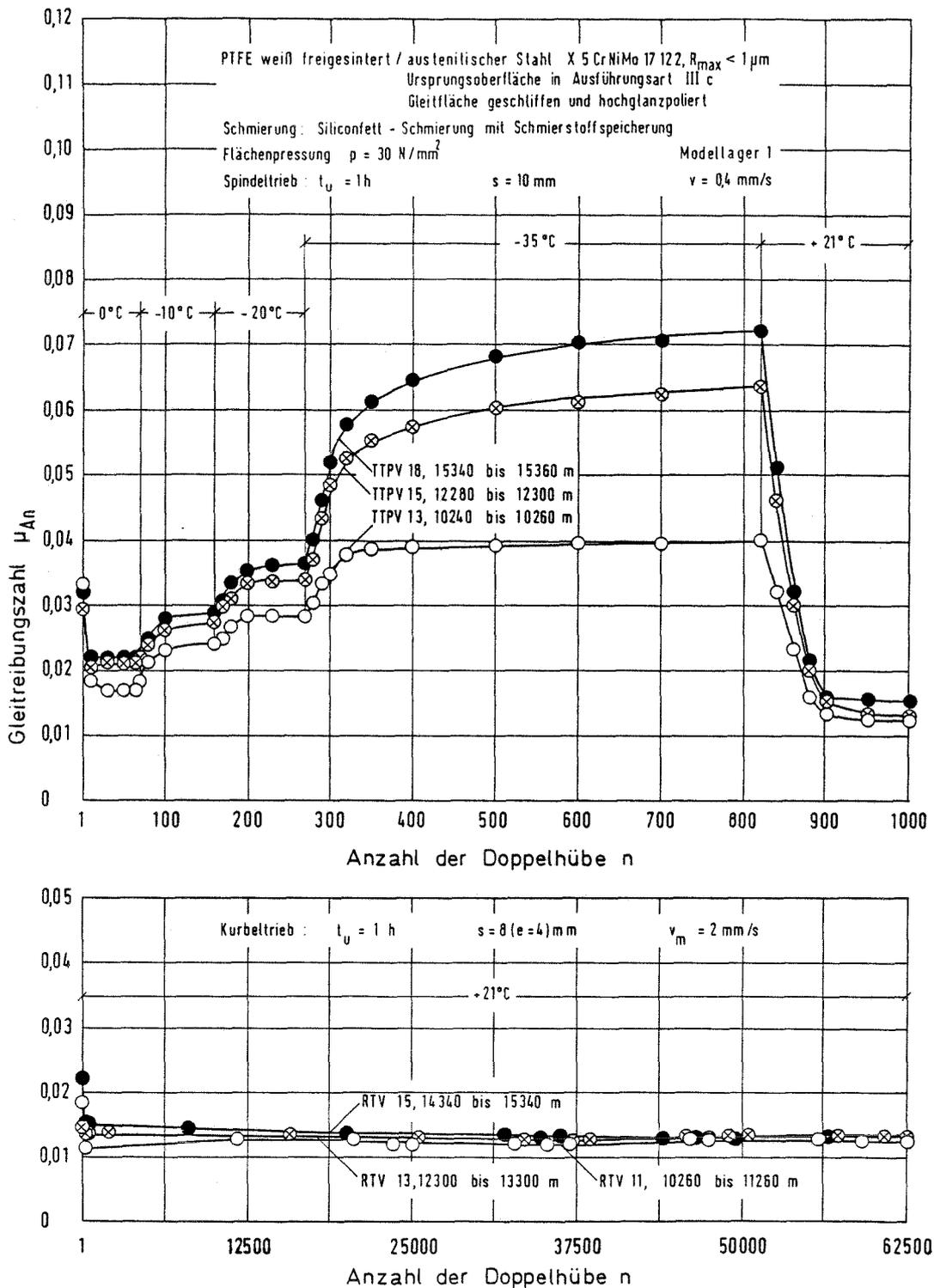


Bild 9: Gleitreibungscharakteristik eines Modellagers in Untersuchungsphase III (Gleitweg 10240 bis 15360 m) des Dauer-
 gleitreibungsversuchs über rd. 20 000 m Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung $p = 30 \text{ N/mm}^2$

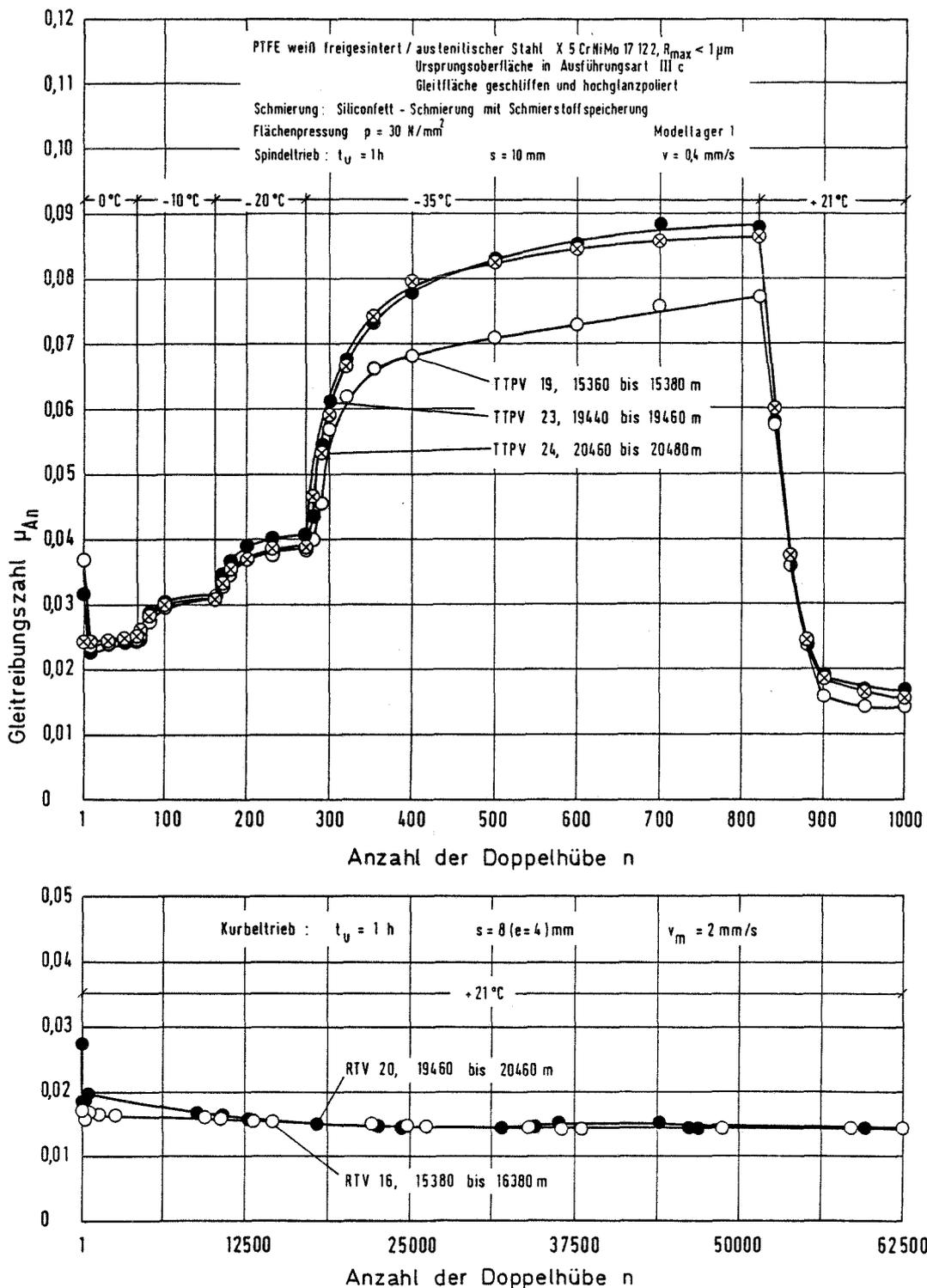


Bild 10: Gleitreibungscharakteristik eines Modellagers in Untersuchungsphase IV (Gleitweg 15360 bis 20480 m) des Dauer-
 gleitreibungsversuchs über rd. 20 000 m Gleitweg mit
 austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsober-
 fläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen
 und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbe-
 lastung $p = 30 \text{ N/mm}^2$

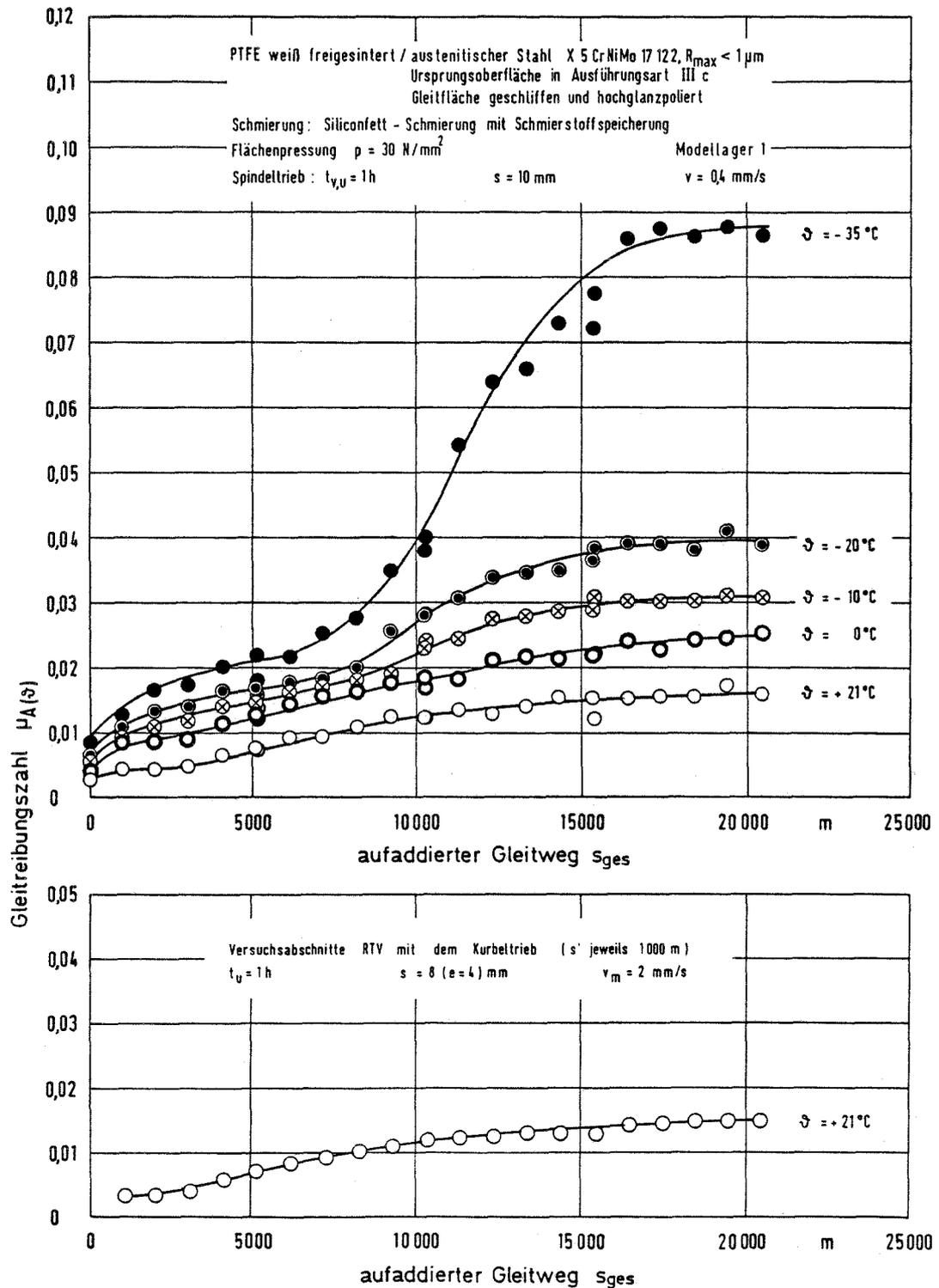


Bild 11: Einfluß von Gleitweg und Temperatur auf das Gleitreibungsverhalten, ermittelt im Dauergleitreibungsversuch (Modellagerversuch) über rd. 20 000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung $p = 30 \text{ N/mm}^2$

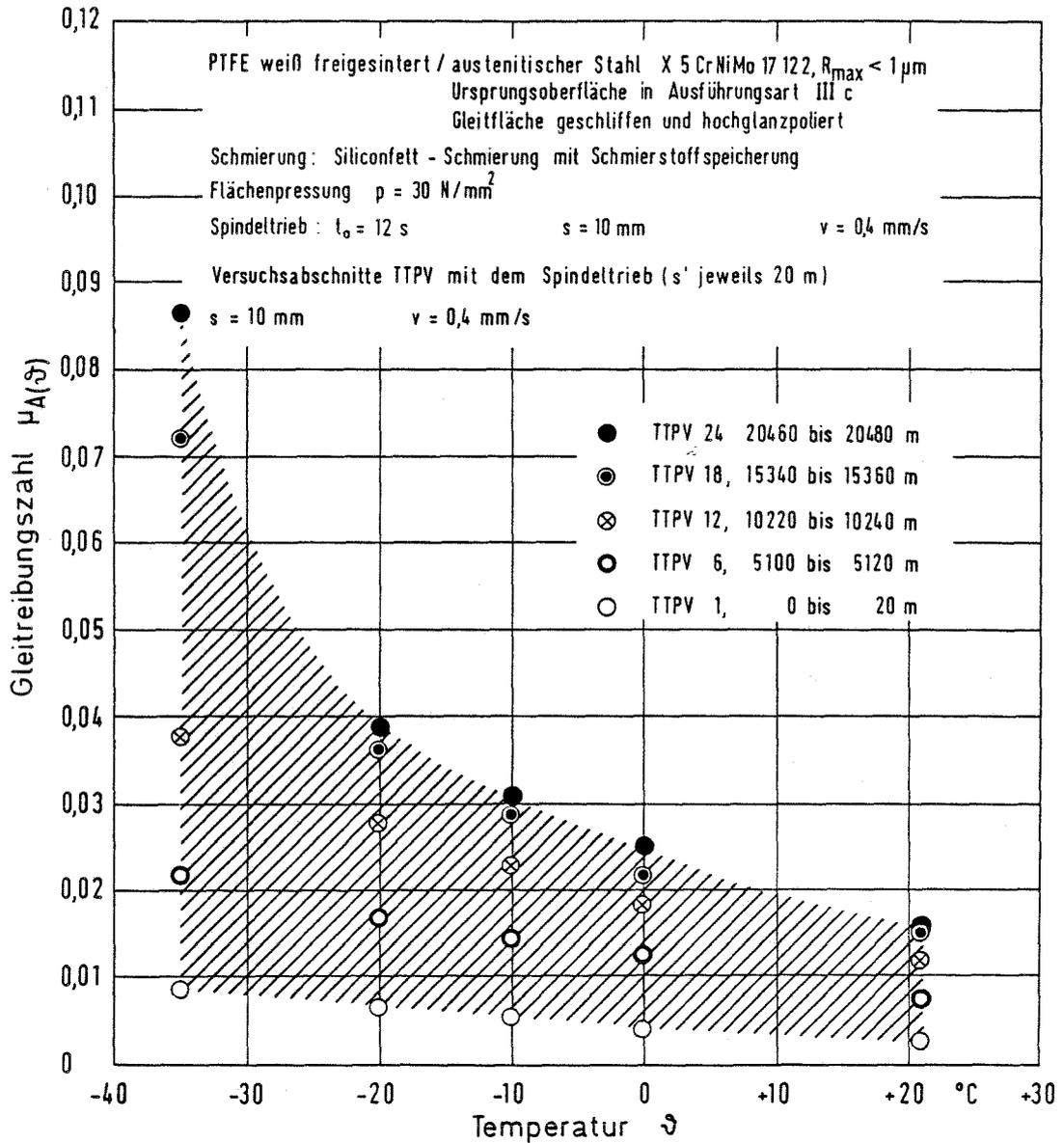


Bild 12: Einfluß der Temperatur auf das Gleitreibungsverhalten nach unterschiedlichen Wegabschnitten des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) über rd. 20 000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung $p = 30 \text{ N/mm}^2$

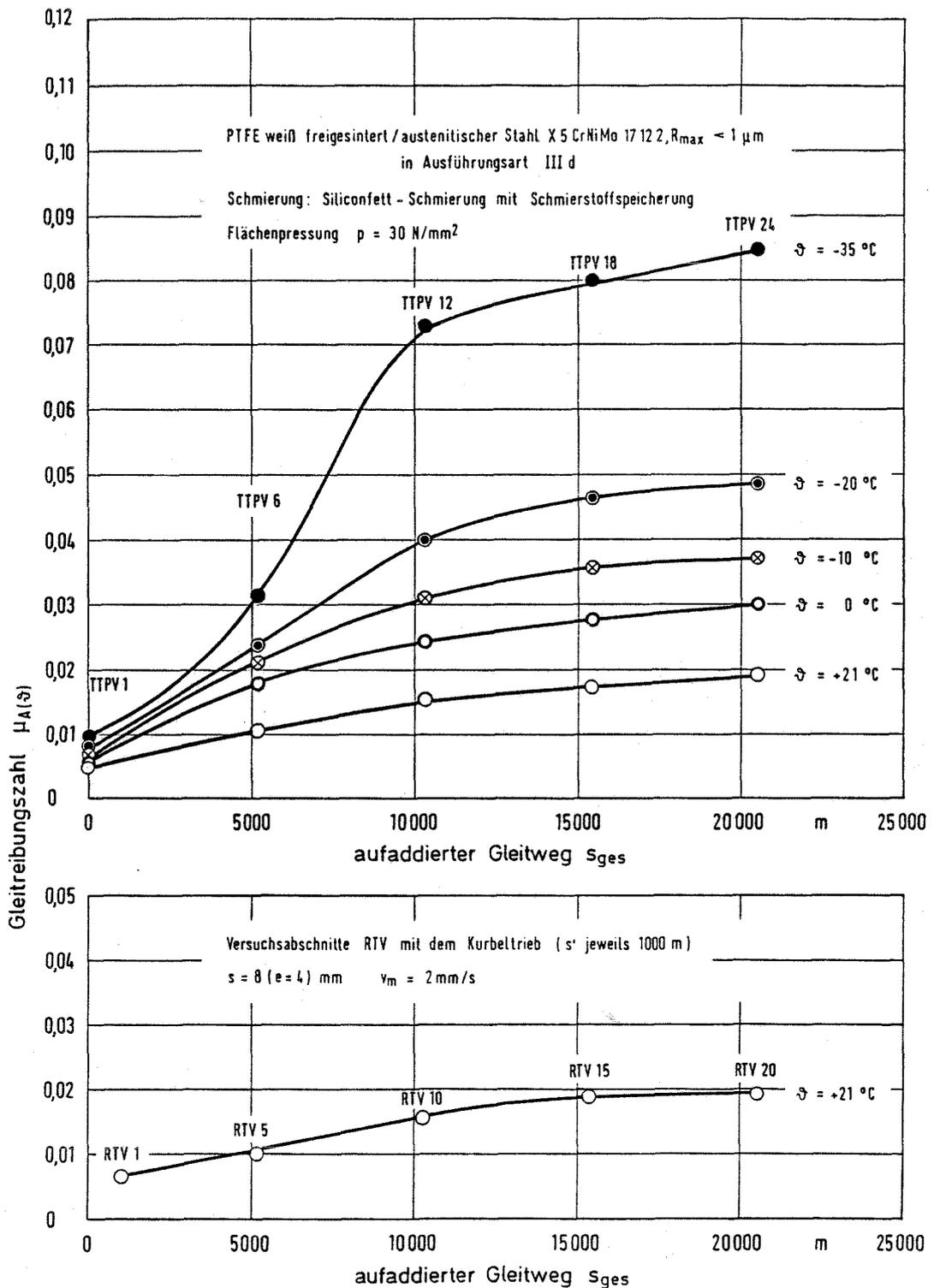


Bild 13: Einfluß von Gleitweg und Temperatur auf das Gleitreibungsverhalten, ermittelt im Dauergleitreibungsversuch (Modell-lagerversuch) über rd. 20 000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Gleitfläche in Ausführungsart III d, ohne mechanische Nachbehandlung) bei der spezifischen Standardbelastung $p = 30 N/mm^2 / 9 /$

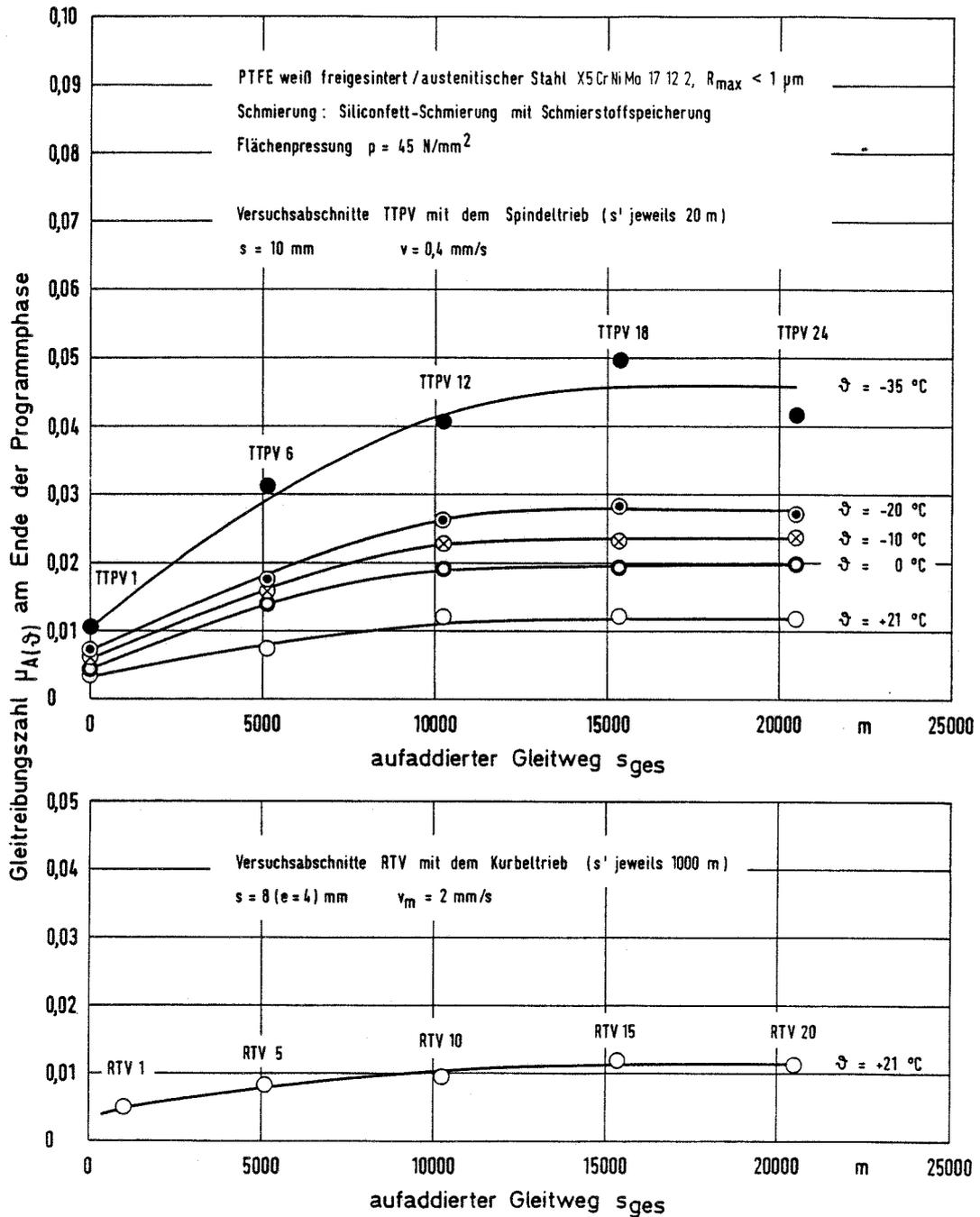


Bild 14: Einfluß von Gleitweg und Temperatur auf das Gleitreibungsverhalten, ermittelt im Dauergleitreibungsversuch (Modell-lagerversuch) über rd. 20 000 m aufaddierten Gleitweg mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und poliert, Avesta-Blech) bei erhöhter spezifischer Belastung $p = 45 \text{ N/mm}^2 / 8 /$

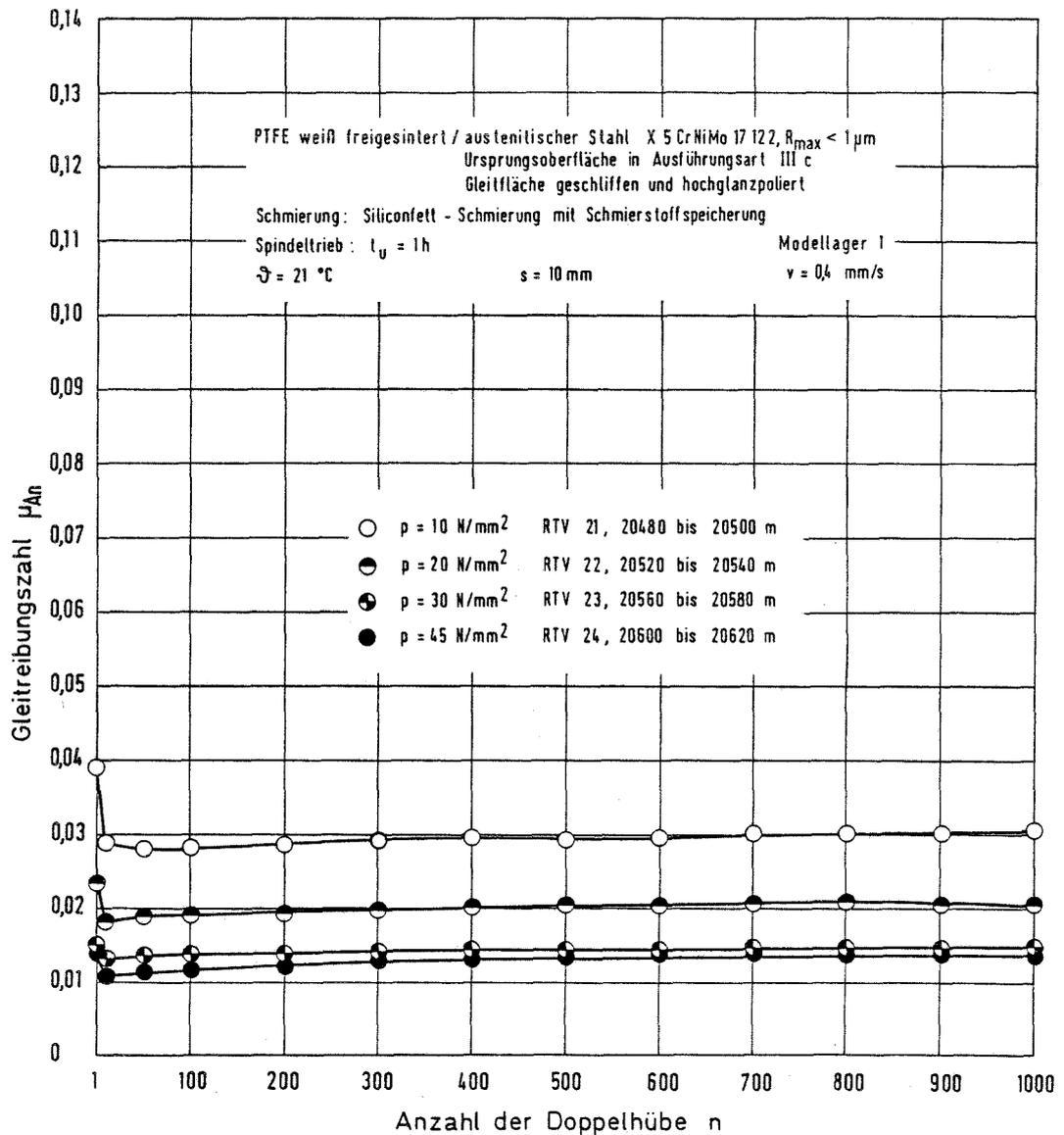


Bild 15: Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) auf die Reibungshöhe nach rd. 20 000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 \text{ N/mm}^2$, ermittelt in Untersuchungsphase V über jeweils 20 m Gleitweg bei Raumtemperatur

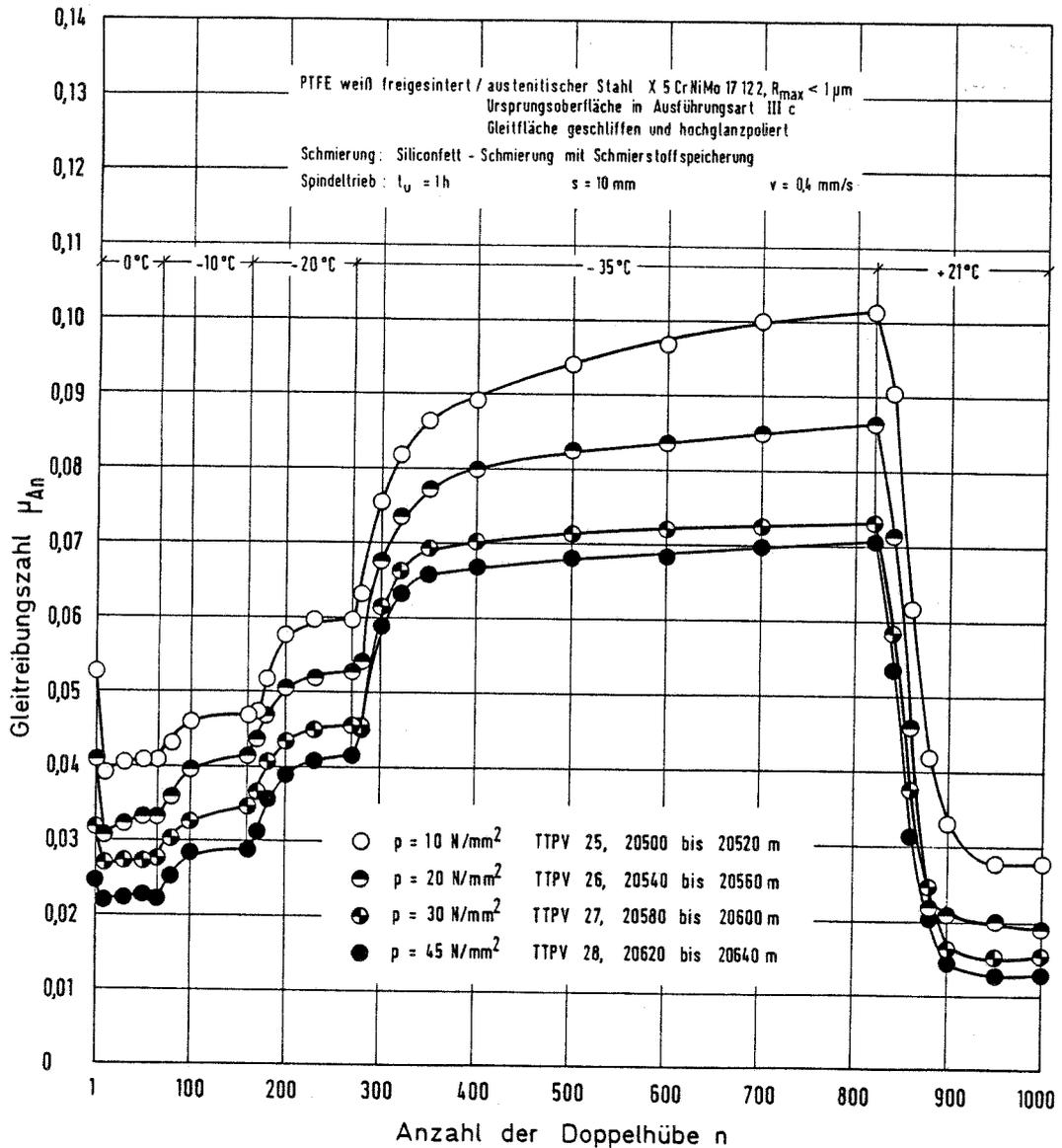


Bild 16: Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) auf die Reibungshöhe nach rd. 20 000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 N/mm^2$, ermittelt in Untersuchungsphase VII über jeweils 20 m Gleitweg bei stufenweiser Absenkung der Temperatur

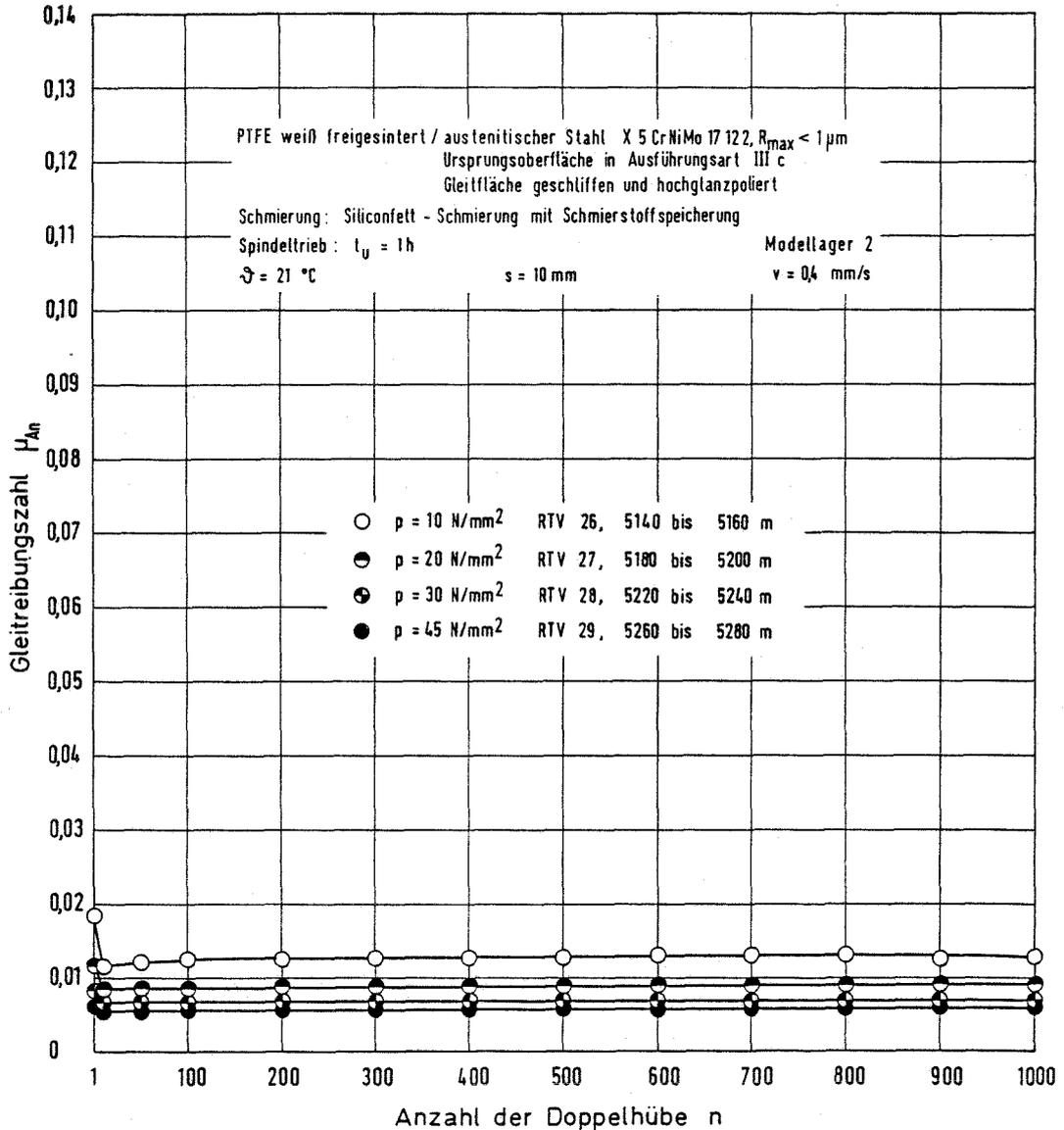


Bild 17: Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) auf die Reibungshöhe nach rd. 5 000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 \text{ N/mm}^2$, ermittelt in Untersuchungsphase VII über jeweils 20 m Gleitweg bei Raumtemperatur

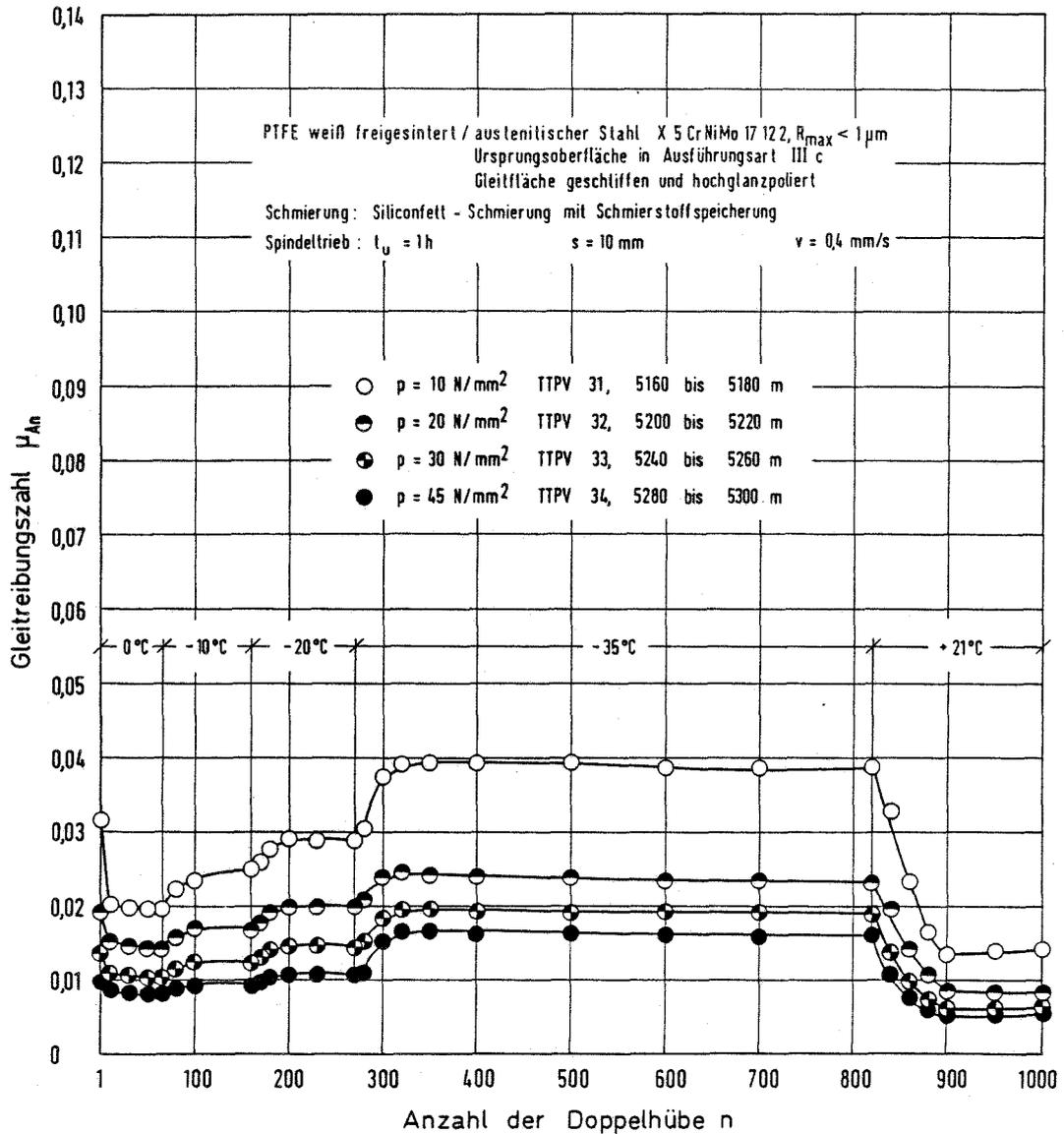


Bild 18: Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) auf die Reibungshöhe nach rd. 5 000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert) bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 N/mm^2$, ermittelt in Untersuchungsphase VII über jeweils 20 m Gleitweg bei stufenweiser Absenkung der Temperatur

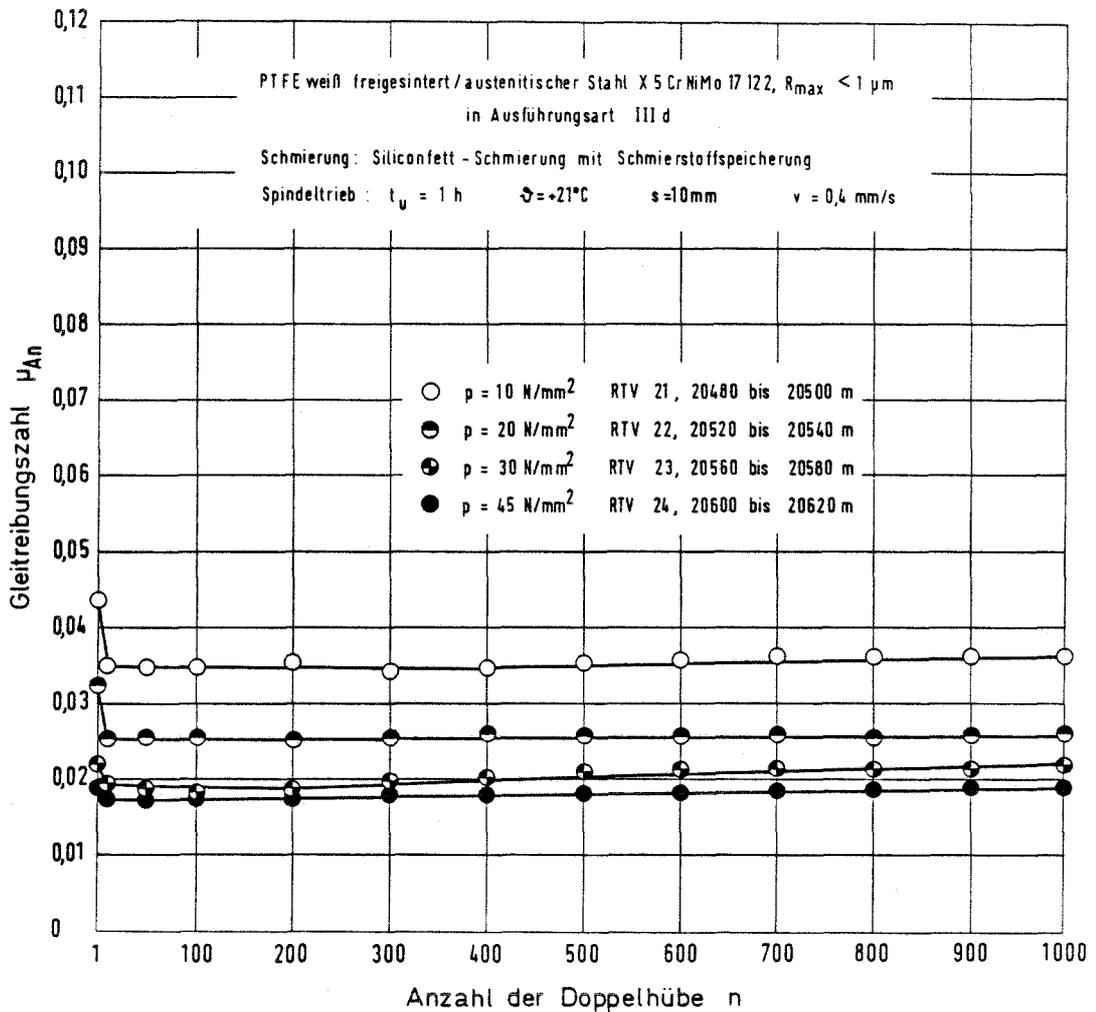


Bild 19: Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) auf die Reibungshöhe nach rd. 20 000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Gleitfläche in Ausführungsart III d, ohne mechanische Nachbehandlung) bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 N/mm^2$, ermittelt in Untersuchungsphase V über jeweils 20 m Gleitweg bei Raumtemperatur / 9 /

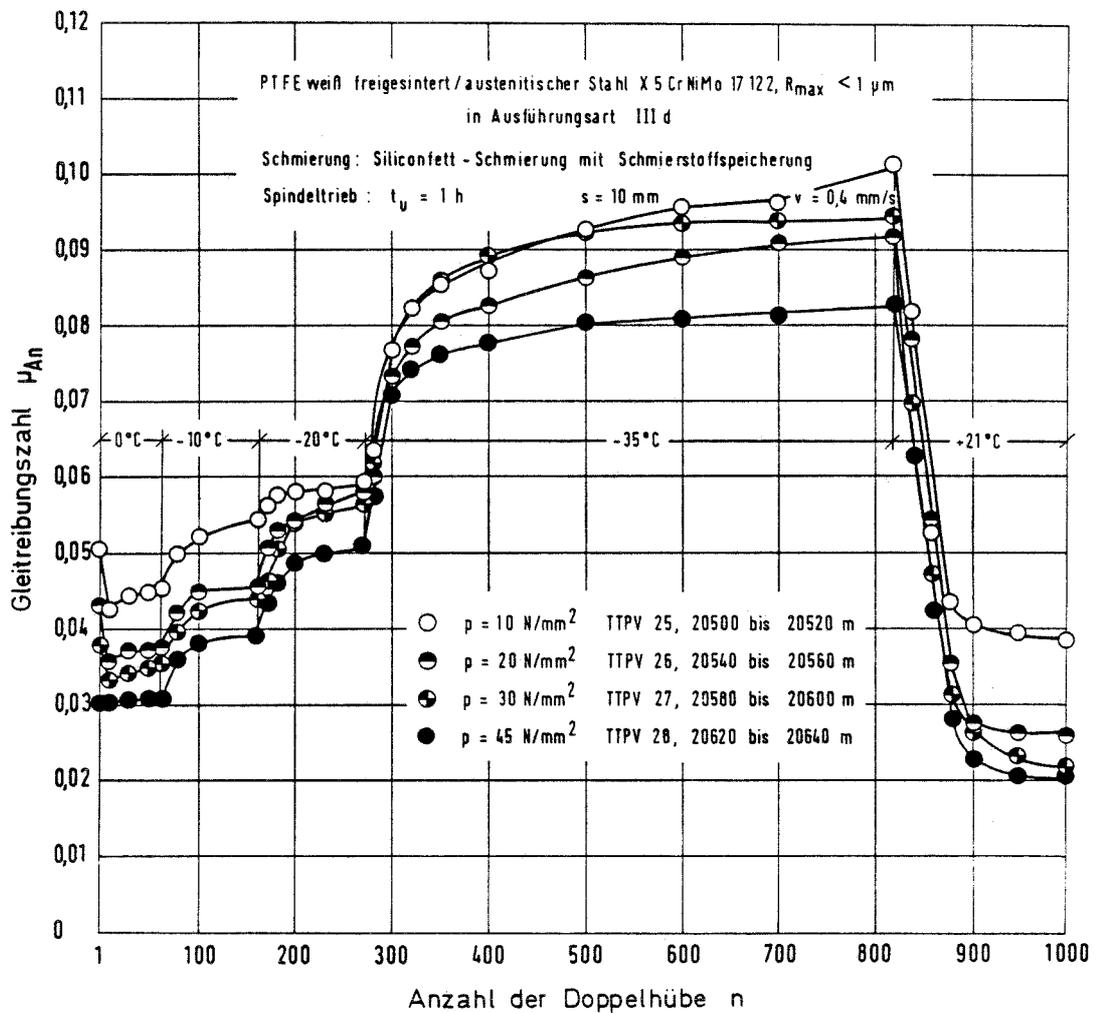


Bild 20: Einfluß von Pressungsänderung (Verringerung bzw. Erhöhung) auf die Reibungshöhe nach rd. 20 000 m aufaddiertem Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Gleitfläche in Ausführungsart III d, ohne mechanische Nachbehandlung) bei der spezifischen Standardbelastung von $p = 30 N/mm^2$, ermittelt in Untersuchungsphase V über jeweils 20 m Gleitweg bei stufenweiser Absenkung der Temperatur / 9 /

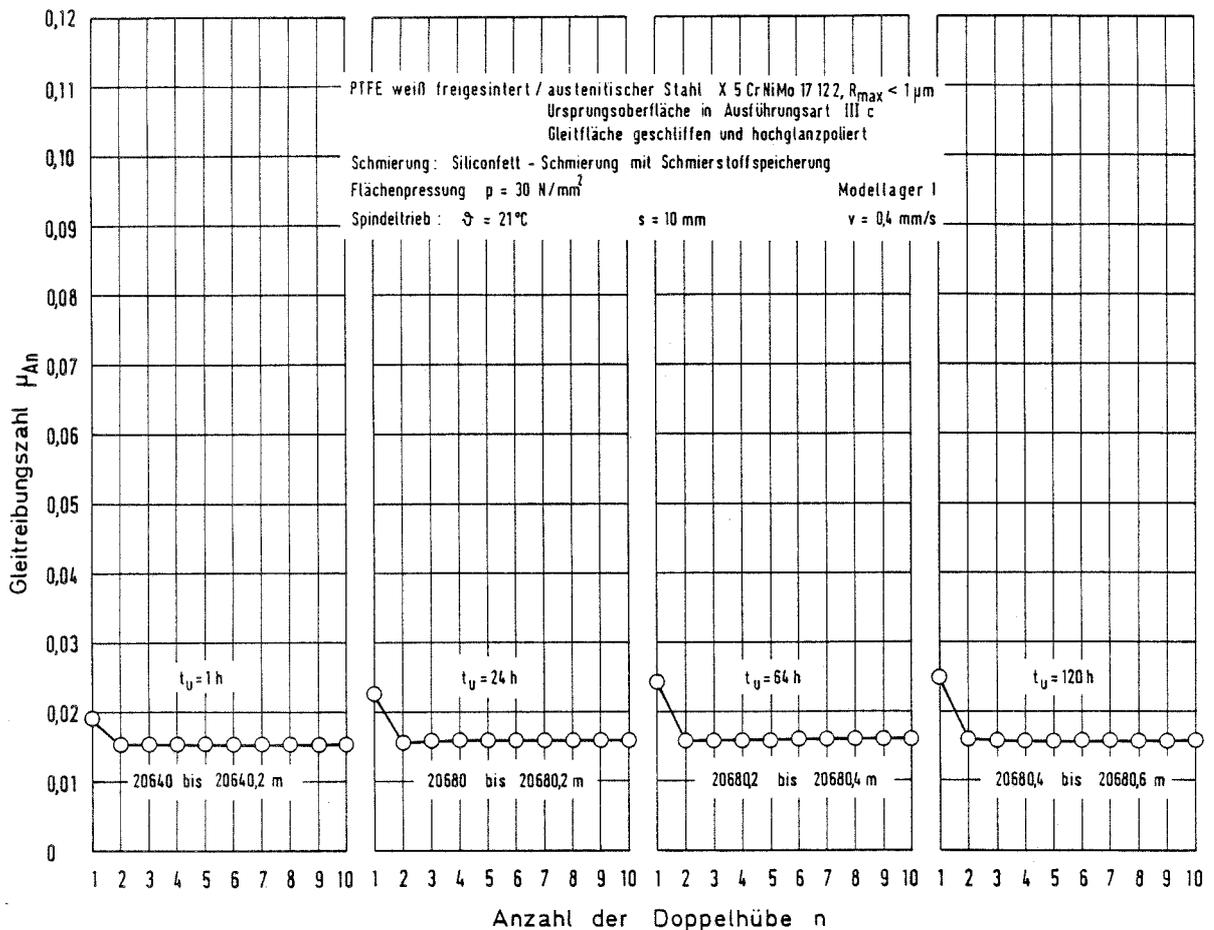


Bild 21: Auswirkung von Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast bei einer spezifischen Standardbelastung von $p = 30 \text{ N/mm}^2$ auf die Reibungszahl beim Wiederauffahren nach rd. 20 000 m aufaddierten Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert), ermittelt in Untersuchungsphase VI über jeweils 0,2 m Gleitweg bei Raumtemperatur

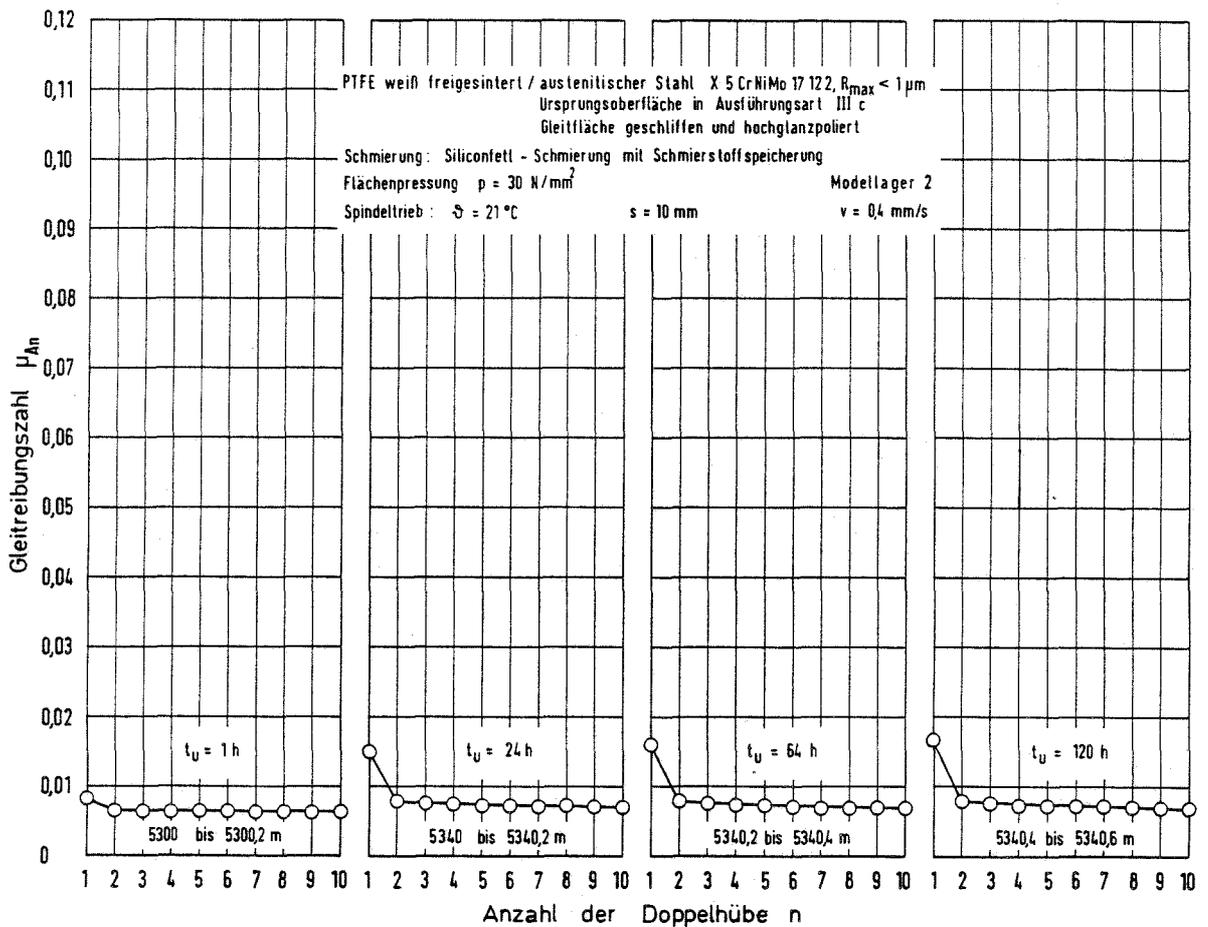


Bild 22: Auswirkung von Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast bei einer spezifischen Standardbelastung von $p = 30 \text{ N/mm}^2$ auf die Reibungszahl beim Wiederauffahren nach rd. 5 000 m aufaddierten Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Ursprungsoberfläche in Ausführungsart IIIc, Gleitfläche geschliffen und hochglanzpoliert), ermittelt in Untersuchungsphase VIII über jeweils 0,2 m Gleitweg bei Raumtemperatur

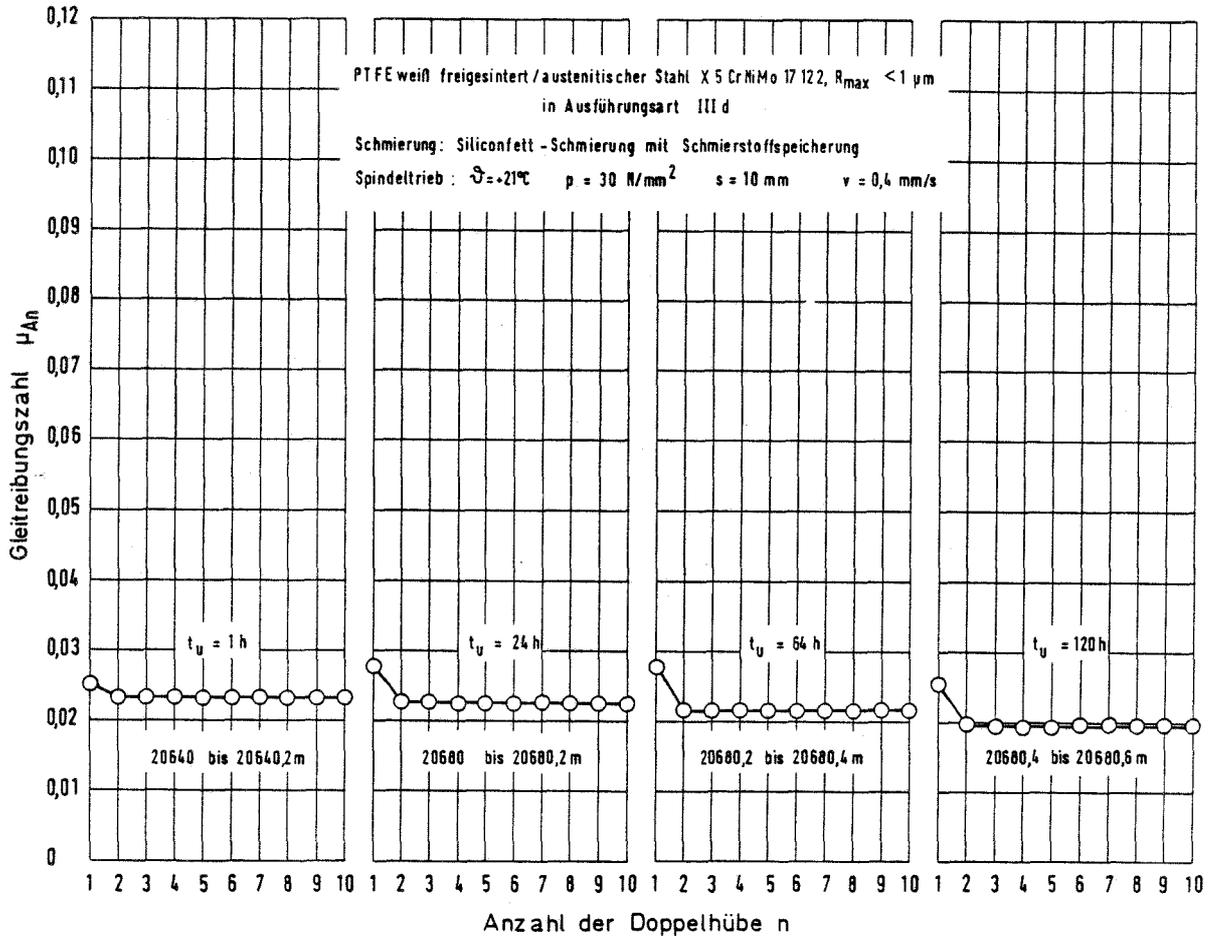


Bild 23: Auswirkung von Bewegungsunterbrechungen unter vertikaler Auflast bei einer spezifischen Standardbelastung von $p = 30 N/mm^2$ auf die Reibungszahl beim Wiederauffahren nach rd. 20 000 m aufaddierten Gleitweg des Dauergleitreibungsversuchs (Modellagerversuch) mit austenitischem Stahl X 5 CrNiMo 17 12 2 (Gleitfläche in Ausführungsart III d, ohne mechanische Nachbehandlung), ermittelt in Untersuchungsphase VI über jeweils 0,2 m Gleitweg bei Raumtemperatur / 9 /

Long-Term Friction- and Wear Tests with PTFE-Slide Bearings,

the sliding counterpart is austenitic steel with the sliding surface fabricated according to the manufacturing mode IIIc, mechanically post-treated

In view of the use of the austenitic stainless steel X 5 CrNiMo 17 12 2 for slide bearings licensed by the construction control board, a long-term slide-friction test was performed to evaluate the long-term behaviour and the life expectancy by means of a mechanically post-treated sliding sheet metal and the original surface IIIc. The test was conducted in several steps in the temperature range of $+21^{\circ}$ to -35°C and under a calculated surface pressure of 30 N/mm^2 , corresponding to the mean maximum load (load case I) of slide bearings which are subject to licensing. The sliding distance amounted to about 20 000 m. The test results were compared with those of a similar long-term test with a non-treated sliding sheet metal of the manufacturing mode IIId.

The determined friction coefficient/dependence from the sliding distance of the combination white PTFE/austenitic steel (original surface of manufacturing mode IIIc, sliding surface smoothed and high-polished), greased with silicon and under application of grease storage, mainly shows three significant stages in the course of the 20 000 m sliding distance under investigation. After an increase in friction which, in dependence from temperature, ranges from linear to degressive for a sliding distance of up to 5 000 m in testing phase I, friction increases significantly at low temperatures up to a sliding distance of 15 000 m in phases II and III. During phase IV, at a sliding distance of up to 20 000 m, friction reaches an almost constant value and is nearly stabilised. This constant value lies at about 0,087 at -35°C and at about 0,015 at room temperature. The friction coefficient of 0,03 which is generally required by the licensing boards for a surface pressure of 30 N/mm^2 is exceeded after about 20 000 m sliding distance at temperatures between 0° and -10°C , at -35°C this happens already after a distance of 8 000 to 9 000 m.

The long-term friction test of a previous investigation, which was performed at almost analogue conditions using the austenitic steel of manufacturing mode IIId, shows a more unfavourable friction behaviour than the steel of mode IIIc. At low temperatures, the level of friction rises distinctly with increasing sliding distance. At the end of the test, there is practically no difference at -35°C compared to the mechanically post-treated sliding sheet metal. At $+21^{\circ}\text{C}$, the

final value is with 0,02 slightly higher. The fixed friction coefficient of 0,03 is already exceeded at 0°C, and at -35°C already after a distance of 5000 m.

During the long-term friction test with a sliding distance of 20 000 m, the gap of the bearing with the mechanically post-treated IIIc-sheet metal abated by 0,8 mm to 1,3 mm and that of the bearing with the nontreated IIIId-sheet metal decreased by 0,9 mm to 1,15 mm.

Essais de frottement et d'usure avec appareils d'appui glissants, Surfaces de glissement constituées pour l'une de PTFE et pour l'autre d'acier inoxydable, tôle IIIc polie.

Dans le cadre de l'utilisation, pour les appareils d'appui glissants agréés, de la combinaison tôle en acier inoxydable X 5 CrNiMo 17 12 2 et PTFE, des essais de longue durée comparatif entre tôles IIIc polies et non polies ont été entrepris et exécutés pour en apprécier le comportement ainsi que la longévité, au moyen d'un dispositif expérimental spécial permettant un déplacement total cumulé de 20000 m environ, sous différentes températures, de +21 à -35 °C, cela sous une pression verticale moyenne de contact égale à 30 N/mm².

La relation mesurée frottement-déplacement de la combinaison PTFE avec cavités/tôle inox, dont la surface, d'origine de qualité IIIc, a été polie et enduite d'une graisse silicone, montre au cours des 20000 m parcourus essentiellement trois zones caractéristiques. Après une augmentation, linéaire ou dégressive selon la température, dans la phase I, c'est-à-dire jusqu' à 5000 m de déplacement, le frottement augmente de manière significative, en particulier aux basses températures dans les phases II & III, de 5000 à 15000 m de déplacement, pour se stabiliser dans la phase IV, jusqu'à 20000 m de déplacement, à des valeurs constantes, soit 0,087 à -35 °C et 0,015 à la température ambiante. La valeur de 0,03 indiquée dans les différents agréments pour une pression moyenne de 30 N/mm² est dépassée après 20000 m avec des températures comprises entre 0 & -10 °C, et déjà après 8000 à 9000 m avec -35 °C.

L'essai antérieurement exécuté dans des conditions semblables avec une tôle inox non polie montre un comportement légèrement plus défavorable vis-a-vis du frottement. Plus important aux basses températures, le frottement augmente plus nettement avec le déplacement. A la fin de l'essai, pour une température de -35 °C, il n'existe cependant pas de différence entre tôle polie ou non; à la température ambiante par contre la valeur finale obtenue 0,02 est légèrement supérieure. La valeur de 0,03 mentionnée plus haut est déjà dépassée avec une température de 0 °C après 20000 m, et avec une température de -35 °C après 5000 m.

Après l'essai de 20000 m la hauteur libre de PTFE s'est réduite de 0,8 mm pour devenir 1,3 mm dans le cas de la tôle polie et respectivement 0,9 mm & 1,15 mm dans l'autre cas.