

Khalid Abu Snima

**Kenngrößen und Belastungsgrenzen von
nasslaufenden Lamellenkupplungen unter
Dauerschlupfbeanspruchung**

Characteristics and loading limit of wet multi -
disk clutches under continuous slip stress

Band 21

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: Institut für Produktentwicklung
Universität Karlsruhe (TH), 2006

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Schnelldruck Ernst Grässer, Karlsruhe
Tel.: (0721) 61 50 50

ISSN 1615-8113

Kenngrößen und Belastungsgrenzen von nasslaufenden Lamellenkupplungen unter Dauerschlupfbeanspruchung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Khalid Abu Snima
aus Gazastreifen (Rafah) / Palästina

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Oktober.2005
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrangengineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 21

In der Antriebstechnologie für Kraftfahrzeuge hat sich in den letzten Jahren eine erhebliche Dynamisierung der Konzeptentwicklungen ergeben. Waren ursprünglich Dreigang-Automatgetriebe und Viergang-Handschaltgetriebe über lange Jahre im Bereich der Pkws dominierend, so haben wir heute eine große Vielfalt von Antriebskonzepten. Ziel ist es dabei, bei hohem Komfort die Wirkungsgrade zu optimieren und durch die Antriebsstränge einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Kraftstoff zu erbringen. Stichworte in diesem Zusammenhang sind „Hybridantrieb“ oder „Doppelkupplungsgetriebe“. Im Bereich des Maschinenbaus wird ebenfalls eine Zunahme der Mechatronik in den Maschinen und Aggregaten beobachtet. Hierzu ist es notwendig, ein mechatronisches Stellglied für die Drehmomente in den Antriebssträngen zur Verfügung zu haben.

Für beide Aufgaben eignet sich in hervorragender Weise eine nasslaufende Lamellenkupplung. Die nasslaufende Lamellenkupplung kann genutzt werden, um den Drehmomentfluss im Antriebsstrang gezielt zu beeinflussen. Eine spezielle Möglichkeit ist der Betrieb im Dauerschlupf. Dabei wird die Kupplung gezielt so angesteuert, dass sie über eine längere Zeit im Dauerschlupf betrieben wird und damit über das Kupplungsmoment die im Triebstrang vorliegenden Drehmomente einstellt. Solche Anwendungen findet man z. B. im Fahrzeugbetrieb zur Reduzierung der Drehschwingungen oder im Antrieb von Schiffen zur Durchführung eines feinstgeregelten Rangierbetriebs. Diese neuen Anwendungen mit erheblichen Dauerschlupf-Anteilen führen zu neuen Fragestellungen in der Auslegung von nasslaufenden Lamellenkupplungen. Zu diesem Dauerschlupf-Betrieb liegen bisher nur geringe Erkenntnisse vor. In seiner Arbeit hat Herr Dr.-Ing. Abu Snima sich dieser Fragestellung gewidmet.

Herr Dr.-Ing. Abu Snima setzt sich zum Ziel, durch experimentelle Untersuchungen auf einem speziell dafür zu entwickelnden Prüfstand die Grundlagen für die Auslegung und Dimensionierung von, im Dauerschlupf betriebenen, nasslaufenden Lamellenkupplungen zu legen. Dazu ist es erforderlich, einen geeigneten Prüfstand aufzubauen und damit umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Aus diesen experimentellen Untersuchungen leitet er dann ein entsprechendes Berechnungskonzept und gibt Konstruktionshinweise für nasslaufende Lamellenkupplungen im Dauerschlupfbetrieb. Die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Ab Snima leistet so einen wichtigen Beitrag zur Definition und Auslegung von Kupplungssystemen.

Albert Albers

Kurzfassung

Nasslaufende Lamellenkupplungen und Bremsen werden in verschiedenen Bereichen der Technik im Dauerschlupfbetrieb eingesetzt. Im Bezug auf die Praxis und dem allgemeinen technischen Fortschritt sind die ständig wachsenden Anforderungen an thermische Belastbarkeit, Reibwertkonstanz und Schaltkomfort gegeben. Die Schaltelemente werden dadurch immer mehr bis an ihre Belastungsgrenze ausgelegt. Die richtige Auslegung der Schaltelemente gewinnt an Bedeutung. Veränderungen der Reibcharakteristik während oder bedingt durch Dauerschlupfbelastungen können zu unerwünschten Funktionsbeeinträchtigungen führen, welche die Systemlebensdauer deutlich verringern können. Um das Potential des nasslaufenden Friktionssystems Lamellenkupplung optimal zu nutzen, müssen die Zusammenhänge der Einflussparameter und Kenngrößen im Dauerschlupfbetrieb untersucht und geklärt werden. Die aus dieser Arbeit resultierende Methoden- und Datenbasis unterstützt den Kupplungssystementwickler in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses, wodurch eine wesentliche Verkürzung der Entwicklungszeit in Zusammenhang mit einer Reduktion der Entwicklungskosten ermöglicht wird.

Das Komfort- und Schaltverhalten wird durch die entstehende Funktionsbeeinträchtigung im Dauerschlupfbetrieb stark beeinflusst. Insbesondere bei Pkw-Anwendung mit der Reibpaarung Papierbelag gegen Stahllamellen ist dieser Betriebszustand unerwünscht, weil die Systemlebensdauer durch die zusätzliche thermische Belastung reduziert wird.

Bisher sind keine etablierten Methoden zur Untersuchung nasslaufender Lamellenkupplungen und Bremsen im Dauerschlupfbetrieb vorhanden. Mit Bezug auf praktische Anwendungsgebiete nasslaufender Lamellenkupplungen und Bremsen im Dauerschlupfbetrieb wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Friktionspaarungen untersucht. Die am häufigsten verwendeten Werkstoffkombinationen in den funktionsrelevanten Wirkflächenpaaren sind organische oder sintermetallische Beläge gegen Stahl. Für die Untersuchung wurde ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut, der je nach Konfiguration die Untersuchung von Lamellenkupplungen für Pkw- und Industrieanwendungen ermöglicht. An Hand einer neu entwickelten Untersuchungsmethodik wurden die relevanten Einflussparameter des Friktionssystems im Dauerschlupfbetrieb auf die Leistungsgrenze ermittelt. Der Schwerpunkt der Untersuchung galt zunächst der Identifizierung der bestimmenden Parameter auf die Leistungsgrenzen im Dauerschlupfbetrieb. Darauf aufbauend wurden die Leistungsgrenzen von ausgewählten Kupplungs- und Bremssystemkomponenten unter Dauerschlupfbeanspruchung in Abhängigkeit der identifizierten Parameter experimentell ermittelt und diskutiert.

abstract

Wet multi-disk clutches and brakes are used in permanent slip operation in different areas of technology. The permanent growing demands regarding the practical experience and general technical progress are thermal capacity, adhesion factor constancy and shifting ease. As a result, the clutch elements are brought closer to their loading limit. Therefore, the correct design of these elements becomes clearly more significant. Changes to the friction characteristics during conditional permanent slip loads can lead to unwanted interferences in the functioning, which can significantly shorten the life of the system. To fully use the potential of the wet multi-disk clutch friction system, the coherences between the influencing parameters and data cluster should be analysed and clarified during the permanent slip operation. The resulting methods and data basics support the clutch system developer in the early stages of product development, which can significantly shorten the development period and of course the development costs.

The comfort and clutch behaviour is also strongly influenced by these interferences. This condition is especially unwanted in cars with friction combinations paper/steel disks because it reduces the life of the system due to an extra thermal load.

Till now, there have been no established methods in examining wet multi-disk clutches and brakes during permanent slip operation. Concerning practical application areas of multi-disk clutches and brakes in permanent slip operation, different friction pairs were analysed. The most commonly used material combinations in function relevant working surface pairs consist of organic or sinter metallic disks against steel disks. A suitable test stand was designed for this purpose, which made the testing of the multi-disk clutches for automotive and industrial usage possible. By means of a newly developed method of examination, the relevant influencing parameters of the friction system on the performance limit were established during the permanent slip operation. The main focus of this examination is to identify the determinative parameters on the performance limit during permanent slip operation. On this basis, the performance limits of chosen clutch and brake system components during permanent slip stressing in dependence of identified parameters will be experimentally determined and discussed.

Danksagung

Meinem Doktorvater, Herren o. Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Albert Albers, Leiter des Instituts für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH), gilt mein besonders herzlicher Dank für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Insbesondere möchte ich mich für das mir stets entgegengebrachte Zutrauen und auch Vertrauen bedanken, was maßgeblich zu meiner persönlichen und beruflichen Weiterentwicklung an Institut beitrug.

Herrem Prof. Dr.-Ing Jürgen. Schmidt, Geschäftsführer Leiter des Instituts für WBK der Universität Karlsruhe (TH), danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Für die freundliche und sehr angenehme Arbeitsatmosphäre möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Produktentwicklung bedanken. Sie haben durch ihre freundschaftliche Kollegialität wesentlich dazu beigetragen, dass ich mich sehr positiv an meine Zeit am Institut Zurückerinnert. Den Leitern der Forschungsgruppe Antriebstechnik, Herrn Dr. Ing.- Arne Krüger und Herren Dipl.-Ing. Sascha Ott Danke ich für die das Interesse an diesem Forschungsgebiet und die geschaffenen Freiräume.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei Herren Dipl.- Ing. Andreas Stuffer für die fruchtbaren Diskussion und Anregungen.

Weiterhin gebührt mein dank den beiden Studienarbeitern Ali Slim und Steffen Schauroth, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Danke möchte ich auch Herren Lotter Steppe und Herren Dieter Kleiber, die bei der Fertigung der Prüfstandteile unterstützt haben.

Schließlich möchte ich an dieser Stelle auch meiner Eltern in Gaza-Streifen danke, die mich während meines Werdegangs gefördert und letztendlich den Grundstock für die Entstehung dieser Arbeit gelegt haben.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung	3
3	Ziele der Arbeit	8
4	Prüfstand und Versuchsteile	9
4.1	Dauerschlupfprüfstand „DSP“	9
4.2	Messtechnik.....	12
4.3	Prüfteile	12
4.3.1	Belaglamellen	13
4.3.2	Stahllamellen	14
4.3.3	Dokumentation der Versuchsteile	15
4.4	Kühlschmierstoffe	20
5	Versuchsmethodik	21
5.1	Grundlage der experimentellen Untersuchungen	21
5.2	Langzeitversuch.....	22
5.3	Prinzipielle Vorgehensweise	24
5.4	Versuchsdurchführung mit Papierreibbelägen in der Lamellenbaugröße I	25
5.5	Versuchsdurchführung mit Sinterreibbelägen in der Lamellenbaugröße II	26
5.6	Dauerschlupf Betriebsarten	28
5.6.1	Kupplungsbetrieb (KB)	28
5.6.2	Bremsbetrieb (BB)	28
6	Versuchsauswertung	29
6.1	Versuchsauswertung Papierbelag	29
6.1.1	Definition der Abbruchkriterien.....	29
6.1.2	Versuchsablauf	30
6.1.3	Typisches Reibwertverhalten an der Leistungsgrenze	30
6.1.4	Typisches Reibwertverhalten oberhalb der Leistungsgrenze	33
6.1.5	Typisches Reibwertverhalten unterhalb der Leistungsgrenze	34
6.1.6	Typische Veränderung der Oberflächentopographie bei Überschreitung der Leistungsgrenze (Papierreibbeläge)	35
6.1.7	Typische Temperaturmessungen an der Stahllamelle für Baugröße I	37
6.2	Versuchsauswertung Sinterbelag	40
6.2.1	Definition der Abbruchkriterien.....	40
6.2.2	Versuchsablauf	40
6.2.3	Typische Temperaturmessung im Kupplungspaket, Messort und typische Ergebnisse für Sinterbeläge (Baugröße II).....	41
6.2.4	Reibwertverhalten unterhalb der Leistungsgrenze (Bereich A und B).....	42

6.2.5 Reibwertverhalten oberhalb der Leistungsgrenze (Bereich C)	46
7 Versuchsprogramm	47
7.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Absolutdrehzahl (Innenlamellendrehzahl) und der Kühlmenge	47
7.2 Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Nutbildes.....	48
7.3 Versuche zum Einfluss der Lamellenausführung (sinus / plan)	49
7.4 Versuche zum Einfluss der Reibflächenanzahl und des Schmierstoffes	49
7.5 Versuche zum Einfluss der Reibpaarung	50
8 Ergebnisse der Untersuchungen	52
8.1 Versuche mit Papierreibbelägen in der Baugröße I.....	52
8.1.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Kühlmenge	52
8.1.2 Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Nutbildes.....	61
8.1.3 Versuche zum Einfluss der Lamellenausführung (sinus/plan)	67
8.1.4 Versuche zum Einfluss der Reibflächenpaarenanzahl und des Schmierstoffes.	70
8.2 Versuche mit sintermetallischen Reibbelägen in der Baugröße II	77
8.2.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Höhe des Kühllölvolumenstromes .	77
9 Verschleiß und Setzen.....	103
9.1 Der Verschleiß.....	103
9.2 Verschleiß und Setzen der organischen Reibbeläge.....	108
9.3 Verschleiß des Sinterbelages	111
10 Zusammenfassung	115
11 Ausblick	117
12 Literaturverzeichnis	118
13 Anhang.....	125

Formelzeichen

A	m	Abstand der Nuten
A_R	mm^2	Brutto-Reibfläche
A_{ges}	mm^2	Gesamtreibfläche
A_k	mm^2	Kolbenfläche
A_{Nut}	mm^2	Querschnittsfläche der Nut
B	m	Paketbreite
b_R	m	Reibflächenbreite
$c_{\text{Öl}}$	J/kg/K	spezifische Wärmekapazität des Kühlöls
Δd	m	Lamellendickenabnahme
D	m	Lamellendicke
d_B	m	Dicke Reibbelag
d_A	m	Außendurchmesser des Belags
$d_{A,\text{max}}$	m	Maximale Außendurchmesser des Belags
d_I	m	Innendurchmesser des Belags
$d_{I,\text{min}}$	m	Minimale Innendurchmesser des Belags
d_m	m	mittlerer Reibdurchmesser
F_N	N	Axialkraft
i	-	Leistungslinie
i_{ist}	-	Leistungsgrenze
n_{an}	U/min	Antriebsdrehzahl
n_{ab}	U/min	Abtriebsdrehzahl
n_s	U/min	Schlupf (Differenzdrehzahl)
p	bar	Druck im Kolben
p_A	bar	Flächenpressung
$P_{\text{Öl}_\text{zu}}$	bar	Zulaufdruck des Schmieröls
P_R	W	Reibleistung
q_p	W/ mm^2	spezifische Reibleistung
q_{pG}	W/ mm^2	spezifische Reibleistungsgrenze

$q_{pÜ}$	W/mm ²	spezifische Übergang-Reibleistungsgrenze
R	m	Außen Reibradius des Belags
R_z	µm	Oberfläche Rauheitstiefe
r	m	Innen Reibradius des Belags
r_m	m	Mittlerer Reibradius des Belags
s	m	Setzen
T_r	Nm	Reibmoment
T_{SL}	°C	Temperatur der Stahllamelle allgemein
$T_{Öl_zu}$	°C	Ölzulauftemperatur
T_{ab}	°C	Ölablauftemperatur
Temperaturen für Sinterlamellen $d_i=209$ mm / $d_A=258$ mm		
T_{SLi_I}	°C	Innere Stahllamellentemperatur bei (20 mm Tiefe)
T_{SLi_M}	°C	Mittlere Stahllamellentemperatur bei (13 mm Tiefe)
T_{SLi_A}	°C	Äußere Stahllamellentemperatur bei (6 mm Tiefe)
i	-	(i=1..2) Stahllamelle von Kolbenseite
<u>Temperaturen für Baugröße I (Referenzlamellen $d_i=165$ mm / $d_A=187,5$ mm)</u>		
T_{SLi_M}	°C	Mittlere Stahllamellentemperatur
i	-	(i=1..3) Stahllamelle von Kolbenseite
V_i	-	Versuch mit (i=1..3)
v_{gl}	m/s	Gleitgeschwindigkeit
$V_{Öl_zu}$	mm ³ /mm ² /s	Spezifische Ölvolumenstrom
z	-	Reibflächenanzahl
μ_p	-	Reibwert über Druck berechnet
μ_F	-	Reibwert über Axialkraft berechnet
$\rho_{Öl}$	kg/m ³	Dicht des Kühllöls

Abkürzungen

ATF:	automatic transmission fluid (Automatikgetriebeöl)
BL:	Belaglamelle
BB:	Bremsbetrieb
DSP:	Dauerschlupfpüfstand
DoE:	Design fo Experiments
EP-Schmierstoffe:	Extreme Pressure - Schmierstoffe
FVA:	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
GP:	Gruppenparallel Nutbild
KB:	Kupplungsbetrieb
Kfz:	Kraftfahrzeug
OB:	Organischer Belag
R:	Radialnutbild
SB:	Sinterbelag
SL:	Stahllamelle
WFP:	Wirkflächenpaaren
WM:	Waffelmuster Nutbild

1 Einleitung

Bei nasslaufenden Kupplungsanwendungen gewinnen Dauerschlupfzustände immer mehr an Bedeutung. Beispiele dafür sind Modulationskupplungen bei Schiffs- und Nutzfahrzeugantrieben¹, schlupfgeregelte Wandlerüberbrückungskupplungen² Lastübernahmeschaltungen oder Anfahrkupplungen in Automatikgetrieben und Doppelkupplungsgetrieben^{3,4}.

In den verschiedenen Anwendungsfeldern ist der Dauerschlupf unterschiedlich definiert. Eine mögliche Festlegung der Kenngrößen der zu untersuchenden Dauerschlupfzustände ist die Reibzeit bezogen auf die Zykluszeit, die sich in folgender Ungleichung ausdrücken lässt:

$$0 \leq \frac{\text{Reibzeit}}{\text{Zykluszeit}} \leq 1$$

Dabei spricht man vom kontinuierlichen Dauerschlupf, wenn die Reibzeit gleich der Zykluszeit ist. Das Verhältnis strebt bei Schaltungsbetrieb gegen kleine Werte. Diese Kenngröße kann als Basis für die Parametervariation in folgenden Untersuchungen herangezogen werden.

Gleichzeitig steigen die Anforderungen des Anwenders an thermische Belastbarkeit, Reibwertkonstanz, Verschleiß und Lebensdauer sowie an den Komfort (Reibcharakteristik, Geräusch- und Schwingungsverhalten).^{5,6,7}

Für die optimale Gestaltung einer Kupplung/Bremse im Dauerschlupfbetrieb sind die Kenntnisse über die verschiedenen Einflussparameter von großer Bedeutung. Wichtige Einflussparameter sind:

- Abmessungen der Kupplung (Durchmesser Verhältnis, Dicke der Stahllamellen, ...),
- Reiblamellenausführung (Reibmaterial, Wellung, Nutbild),
- Kühlölvolumenstrom,
- Gleitgeschwindigkeit,
- Flächenpressung,

¹ Hirt / Witzemberger 1995

² Hein / Nauerz / Wörner 1995

³ Ali Haj 2002

⁴ Engelen 1996

⁵ Fischer / Otto 1994

⁶ Albers / Herbst 2000

⁷ Albers / Herbst 1998

- Reibleistung,
- Kühl- und Schmierstoffqualität,
- max. Temperatur im Öl und an der Reibfläche.

Das Zusammenspiel und der Einfluss der Größen unter den hier betrachteten Betriebsbedingungen waren bis jetzt weitgehend unbekannt. Anwender und Entwickler mussten bisher in aufwendigen Versuchen die optimale Kombination der o.g. Einflussparameter von Kupplung oder Bremse für den entsprechenden Einsatzfall herausfinden. Allgemeingültige Auslegungsrichtlinien existierten für dauerschleppbeanspruchte nasslaufende Reibsysteme zu Beginn dieser Untersuchungen nicht.

2 Stand der Forschung

Das dauerschlupfbeanspruchte Friktionssystem der Kupplung bzw. Bremse besteht nach⁸ im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Grundkörper (1): Reiblamelle mit Reibbelag
- Gegenkörper (2): Gegenlamelle
- Zwischenstoff (3): Kühl- und Schmieröl, Abrieb, Zersetzungspartikel
- Umgebungsmedium (4): Luft, Feuchtigkeit

Als Reibbeläge⁹ werden überwiegend Papier- und Sinterbeläge verwendet. Als Papierbeläge bezeichnet man üblicherweise phenolharzgebundene Verbundmaterialien, die durch eine Vielzahl von Zuschlagstoffen einen großen Freiraum in der Gestaltung von Reibwerthöhe und -verlauf zulassen. Über die konkreten Einflüsse der einzelnen Zuschlagstoffe auf das Reibverhalten bestehen bei den Anwendern und auch bei den Reibmaterialherstellern meist nur empirische Kenntnisse. Die dynamischen Reibwerte von Papierbelägen liegen zwischen 0,10 und 0,20¹⁰. Sinterbeläge zeichnen sich durch einen geringeren Verschleiß aus, sind jedoch sehr hart und besitzen eine geringere Elastizität als Papierbeläge. Somit ergibt sich in Abhängigkeit der übrigen Systemparameter oft eine ungleichmäßige Druckverteilung, die zu niedrigen dynamischen Reibwerten und einem stark fallenden Reibwertverlauf mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit führt. Außer Papier- und Sinterbelägen gibt es noch weitere Beläge, die für Spezialanwendungen eingesetzt werden. Kapl benennt hier z.B. Graphitbeläge für hoch belastete Friktionssysteme¹¹.

Einen großen Einfluss auf Reibwertverhalten, Verschleiß und Belastbarkeit hat der verwendete Schmierstoff^{12,13}. Die Hauptaufgaben des Schmierstoffs während der Schlupfphase sind nach bisherigem Kenntnisstand:

- Wärmetransport (Kühlung)
- Trennung der Reibpartner durch eine Ölschicht
- Kraftübertragung

⁸ Czichos / Habing 1992

⁹ Frey / Neumann 1993

¹⁰ Winkelmann / Harmuth 1985

¹¹ Kapl 1991

¹² Höhn / Pflaum / Hämmerl 1997

¹³ Hämmerl 1994

Die Anforderungen an das Kühlöl bei Dauerschlupf sind widersprüchlich: Auf der einen Seite muss das Kühlöl die entstehende Wärme abführen, auf der anderen Seite wird ein möglichst geringer Kühlölvolumenstrom gefordert, um die Leistungsverluste speziell im Leerlauf der Kupplung zu begrenzen. Im Tribosystem ist es die Komponente mit der geringsten Temperaturbeständigkeit (120° C – 150° C), soll aber gleichzeitig „Fill-for-Life-Bedingungen“ erfüllen¹⁴.

Bei der Betrachtung der Oberflächenstruktur von Reibbelägen unterscheidet man zwischen

- makroskopischen und
- mikroskopischen Strukturen

Zu der makroskopischen Oberflächenstruktur gehören gezielte Einprägungen von mehreren 0,1 mm Tiefe, wie Riefenmusterung oder Belagnutung. Sie bewirken vor allem eine gezielte Ölzirkulation zwischen den Reibpartnern Um die Oberfläche zu kühlen, eignen sich besonders Geometrien die einen höheren Schmierstoffdurchsatz bewirken^{15,16}.

Bei der mikroskopischen Oberflächenstruktur handelt es sich um reine Rauigkeitseinflüsse. Grundsätzlich hat sich herausgestellt, dass eine hohe Oberflächenrauigkeit zu ungünstigen Reibungs- und Verschleißverhalten durch schnelle und starke Oberflächenveränderungen führt. Sinnvoll ist eine ausreichende mittlere Oberflächenrauigkeit¹⁷. Eine geringe Oberflächenrauigkeit durch Glättungseffekte führt zu hydrodynamischer Drehmomentenübertragung und vermindertem Reibwert. Nicht nur die absolute Rautiefe, auch die Oberflächentopographie bestimmt das Reibverhalten mit.

Im Bereich des Dauerschlupf existieren derzeit noch keine speziellen Arbeiten, vielmehr befasste man sich mit dem Mikroschlupf¹⁸ und dessen Ursachen, dem Schalt- und Reibschwingverhalten nass- und trockenlaufender Lamellenkupplungen.

An der Universität der Bundeswehr in Hamburg werden Versuche an nasslaufenden Lamellenkupplungen, insbesondere für Schiffswendegetriebe aber auch für schnelllaufende Automatikgetriebe, durchgeführt. Dabei wurden Leerlaufuntersuchungen zum thermischen Verhalten nasslaufender Lamellenkupplungen in dynamischen belasteten Schiffswendegetrieben gemacht¹⁹. Friedrich untersuchte er für verschiedene Einbaulagen der Kupplungen die zusätzlichen Belastungen, die im Lamellenpaket entstanden. Es wurde festgestellt, dass die untenliegenden Lamellen erhöhte Reibwärme und mechanischen Verschleiß unterlagen. Zudem wurde die Kühlölzu- und -abfuhr durch die horizontale

¹⁴ Greiner 1997

¹⁵ Razzaque / Kato 1999

¹⁶ Perponche / Höhn / Pflaum 1998

¹⁷ Perponcher 1998

¹⁸ Heilenkötter 1990

¹⁹ Friedrich 1995

Abweichung der Achslage stark beeinflusst und dies wirkte sich negativ auf das Leerlaufverhalten und das Leerlaufmoment aus.

Der Einfluss der Schleppmomente der schnelllaufenden Lamellenkupplungen in Automatikgetrieben wurde in²⁰ untersucht. Es wurden drei Phasen des Leerlaufmoments und dessen Einflussparameter herausgestellt²¹.

Die Ursache des Lamellentaumelns an nasslaufenden Lamellenkupplungen wurde in²² herausgearbeitet. Man fand heraus, dass im Leerlauf bei ausreichender Schmierstoffversorgung der schlagartige Drehmomentenanstieg verhindert werden kann. Bei Volumenströmen von 0,3 mm³/mm²/s wurde Lamellentaumeln beobachtet. Gewellte Lamellen, welche ein keilförmiges Ölpolster für die Trennung der Nachbarlamellen erzeugen und Beläge mit enger Waffelnut, verkleinern die instabilen Bereiche durch Dämpfung.

In²³ wurde die Entstehung von Mikroschlupf bei Reibpaarungen mit Papier- und Sinterbelägen untersucht. Einer der bedeutendsten Erkenntnisse ist der Einfluss der Additive des Kühllöls, insbesondere der Detergentien des Kalzium-Alkylsalizylat Typs und Friction Modifier und dem Axial- und Winkelversatz auf den Mikroschlupf, der eine Folge einer tribologischen Wechselwirkung zwischen Reibwerkstoff und Schmierstoff ist. Es wurde festgestellt, dass im Schlupfbetrieb die Mischreibung dominant ist.

Das Brems- und Betriebsverhalten von nasslaufenden Lamellenkupplungen wurde M. Weigand untersucht²⁴ untersucht. Die Versuche bezogen sich auf Sinterbelaglamellen und er stellte bei Überbeanspruchung der Reibpaarung einen Sinterübertrag auf die Stahllamellen, welches auch als selektive Übertragung bekannt ist, fest. Der Verschleiß der Sinterlamellen lag im Mittel bei 0,02 mm.

In²⁵ wurde ein Abreißmoment ermittelt, welches 10 % über den Kennmoment liegt, wo ein schlupffreier Betrieb erwartet werden kann. Die Temperaturverteilung auf den Lamellen wurde mit Wärmebildkameras untersucht, wobei ein wandern der Höchsttemperatur von außen nach innen und wieder zurück auf den Lamellen beobachtet wurde^{26;27}

In²⁸ wurde der Einfluss der Kühllölu- und -abfuhr im geschlossenen und im geöffneten Zustand untersucht. Dabei stellte man eine Erhöhung des Leerlaufmoments bei gesteigerten Kühllölvolumenstrom fest. In diesen Untersuchungen wurde auch der Einfluss der Kühllölarart und der Ölalterung auf das Schaltverhalten verifiziert. Dabei erwiesen sich Motorenöle als

²⁰ Oerleke / Funk 2003

²¹ Dümeland 1983

²² Funk 1997

²³ Heilenkötter 1990

²⁴ Weigand 1988

²⁵ Duminy 1979

²⁶ Severin 2002

²⁷ Severin / Dörsch 2001

²⁸ Beisel 1983

besonders untauglich für Lamellenkupplung im nasslaufenden Zustand. Mit zunehmender Ölalterung verschlechterte sich das Übertragungsverhalten der Kupplung²⁹.

In ³⁰ wurde ebenfalls die Ölalterung untersucht. Man ließ Öl durch Wasserzugabe und im Fahrzeug altern. Es wurde festgestellt, dass im Betrieb gealtertes Öl eine Zunahme der Verschleißpartikel zeigt und dies sich ebenfalls auf das Komfort- und Übertragungsverhalten negativ auswirkt.

In ³¹ arbeitete man die Ursachen für Reibschwingungen und Geräuschen an ölgekühlten Reibschaltelementen heraus. In diesen Versuchen wurde der Brems- und Dauerschlupfbetrieb untersucht. Man stellte Reibschwingkarten für die Beurteilung der unkritischen Betriebszustände, bei denen keine Reibschwingungen auftreten, auf^{32,33}.

In ³⁴ wurde zudem durch SNMS und XPS Analysen die tribologischen Grenzschichten in den Stahl- und Sinterlamellen untersucht. Bei Frischöl gab es geringere Schichtdicken, als bei vorbeanspruchtem Öl mit FM Karbonsäure und AW- Additiven. Die dickere Grenzschicht wirkte sich negativ auf das Reibschwingverhalten aus. Insbesondere ist es durch die Schmierstoffabstimmung (Grundöl und Additivierung) möglich, die Reibschwingungen zu unterbinden. Für Friction Modifier aus Karbonsäure und Alkylamin setzt mit zunehmender Kettlänge des Alkylrests ein absinken der Reibungszahl bei größeren Gleitgeschwindigkeiten ein.

³⁵ hat mit Hilfe von Schaltversuchen Referenztemperaturen ermittelt, die ein Versagen der Lamellen durch thermische Überbeanspruchung verhindern sollen. Außerdem wurde die Hot-Spot-Bildung, die eine Reibungszahlschwankung zu Beginn der Rutschphase aufweist, erforscht. Die Hot-Spot Bildung ist unabhängig von der Flächenpressung und steigt mit steigender Anzahl der Reibflächen.

In ^{36,37} wurde die Belastungsgrenze und das Schaltverhalten bei Lastkollektivbeanspruchung untersucht. Bei einer Überlastung von Papierlamellen sinkt die Reibungszahl vom Schaltbeginn ab. Kupplungsausfall wegen Hitzeflecken, Versprödung, Sinterübertrag und Tellern treten bei Hochlastschaltungen des Kollektivs auf. Dabei wurde festgestellt, dass die dauerhaft ertragbare flächenspezifische Reibarbeit unabhängig von dem Dicken der Stahllamellen ist. Bei Papierlamellen fand man eine erhöhte Dickenabnahme bei Gleitrichtungsumkehr und eine Abhängigkeit der Schaltcharakteristik von der Gleitrichtung. Die Einflüsse der Oberflächenbehandlung und des Schmierstoffs auf das Schalt- und

²⁹ Federn / Beisel 1986

³⁰ Mosbach 2002

³¹ Mosbach 2002

³² Höhn / Pflaum / Mosbach 2003

³³ Mosbach 2002

³⁴ Mosbach 2002

³⁵ Hämmerl 1994

³⁶ Hämmerl 1995

³⁷ Hämmerl 1994

Lebensdauerverhalten von Lamellenkupplung wurde in³⁸ erarbeitet. Bei organischen Reibbelägen gepaart mit nitrierten Stahllamellen wurden insbesondere beim Einlaufverhalten hohe statische Reibwerte beobachtet, wobei die Oberflächenbearbeitung wie schleifen und bürsten keinen wesentlichen Einfluss haben. Bei den Lastkollektiv- Dauerschaltversuchen fand man heraus, dass bei nitrierten Stahllamellen ein möglichst dünner Porensaum vorteilhaft ist. Der Schmierstoff wirkte sich stärker auf das Schaltverhalten aus. Bei ATF Ölen wurde eine Abnahme der Reibungszahl und bei Motorenölen eine Reibungszahlspitze gegen Schaltungsende mit organische Belägen verzeichnet³⁹. Insbesondere ist eine starke thermische oxidative Ölalterung bei Motorenöl eingetreten. Biologisch leicht abbaubare Schmierstoffe begünstigen den Verschleiß der Reibbelagsporen mit steigender Gebrauchsdauer und sie besitzen eine niedrigere quasistatische Reibungszahl. Bei Sinterbelägen trat mit ATF Ölen häufig eine Spontanschädigung durch Sinterübertrag auf und dadurch ein Sinken der Gleitreibungszahl. Motorenöle weisen eine nicht so starke Intensität der Spontanschädigung auf, aber hier findet man gegen Schaltungsende eine Reibungszahlspitze. Biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe verhalten sich wie die ATF Öle, aber die Anzahl der Spontanschädigung ist sehr gering. Die Reibcharakteristik in Abhängigkeit von der Lebensdauer hängt deutlich von dem Lastkollektiv ab. Das Verschleißverhalten ist im wesentlichen vom Temperaturniveau und nicht von der Beanspruchungsform abhängig⁴⁰.

³⁸ Pflieger 1998

³⁹ Elbe / Föll / Schüller 2001

⁴⁰ Dörpmund / Oberpichler 1979

3 Ziele der Arbeit

Lamellenkupplungen wurden bisher nicht gezielt unter Dauerschlupfbedingungen untersucht. Da diese Anwendungen aber eine zunehmende Bedeutung haben soll mit dieser Arbeit eine gezielte Untersuchung der für Dauerschlupfanwendungen relevanten Belastungsgrenzen und Belastungsparameter für ausgewählte Kupplungssysteme durchgeführt werden.

Als Ergebnis dieser Arbeit soll eine zuverlässige Datenbasis für die Auslegung von nasslaufenden Lamellenkupplungen unter Dauerschlupfbedingungen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus soll eine versuchsgestützte Methodik erarbeitet werden, mit der es möglich ist, relevante Einflussparameter sicher zu identifizieren. Damit steht dem Kupplungssystementwickler erstmalig Versuchsdaten gestützte Methode zur sicheren Auslegung von nasslaufenden Lamellenkupplungen unter Dauerschlupfbeanspruchung zur Verfügung.

4 Prüfstand und Versuchsteile

4.1 Dauerschlupfprüfstand „DSP“

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden auf einem speziell im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Prüfstand für Lamellenkupplungen in Dauerschlupfanwendungen (Dauerschlupfprüfstand, DSP) durchgeführt. Dabei wurde in besonderem Maße auf die Ausführung als universell einsetzbarer Lamellenkupplungsprüfstand Wert gelegt: Der Prüfstand ist für den Einbau von original Kupplungskomponenten für verschiedene Anwendungsbereiche (Fahrzeug- und Industrieanwendung) konzipiert.

In Tabelle 1 sind die Leistungsdaten des Prüfstandes aufgelistet. In Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau des Prüfstandes, der Ölfluss und die Messaufnehmer, in der Konfiguration für hohe Drehzahlen und relativ niedrige Drehmomente, dargestellt. Bild 2 zeigt anschließend die Prüfstandskonfiguration für hohe Drehmomente mit relativ geringen Drehzahlen. Diese beiden Prüfstandskonfigurationen sind erforderlich, um das ganze Feld der Dauerschlupfanwendungen experimentell abdecken zu können. Hiermit können erstmalig auf einem Prüfstand sowohl kraftfahrzeug- als auch anlagenbautypische Systeme abgebildet werden.

Reibmoment	T_r	\leq	1200	Nm
Drehzahl Innenlamellen	n_{an}	$=$	0-3000	U/min
Drehzahl Außenlamellen	n_{ab}	$=$	0-3000	U/min
Axialkraft	F_N	\leq	60	kN
Ölvolumenstrom	$V_{\text{Öl}}$	\leq	16	l/min
Öleinspritztemperatur T_{zu}	$T_{\text{ÖL}_zu}$	\leq	120	°C
Reibflächenabmessungen $d_{A,max}$	$d_{A,max}$	\leq	300	mm
Reibflächenabmessungen $d_{i,min}$	$d_{i,min}$	\geq	80	mm
Paketbreite	b	\leq	36	mm

Tabelle 1: Daten des Dauerschlupfprüfstands

Die E-Maschinen für An- und Abtrieb werden in den nachfolgend dargestellten Versuchen jeweils drehzahl geregelt betrieben. Der Antrieb erfolgt über eine hochdynamische Servo-Synchronmaschine, der Abtrieb ist über eine Zahnriemenstufe von der Hohlwelle achsparallel versetzt. Diese Riemenstufe für den Abtrieb kann mit den Übersetzungen 1:1 für Pkw-Anwendungen oder 1:3 für Industrieanwendungen betrieben werden. Abtriebsseitig sind die Möglichkeiten des Einbaus einer torsionsweichen Welle und der vollelektrischen Massensimulation gegeben.

Das Lamellenpaket wird über einen Hydraulik-Ringkolben axial verpresst. Der Druck im Kolben wird über ein Proportionalregelventil eingestellt. Über die Prüfstandsregelung können damit die Axialkraft und deren zeitlicher Verlauf genau eingestellt werden. Der Ölvolumenstrom zur Kühlung und Schmierung der Lamellen wird zentral im Lamellenpaketzugeführt und über eine Brause gleichmäßig über dem Umfang verteilt. Der Ölvolumenstrom ist über einen geregelten Pumpenmotor stufenlos einstellbar. Die Öl-Einspritztemperatur wird über zwei Heizpatronen im Tank und einem regelbaren Wärmetauscher, hin zu einem Kühlwasserkreislauf vor der Öleinspritzbrause eingestellt.

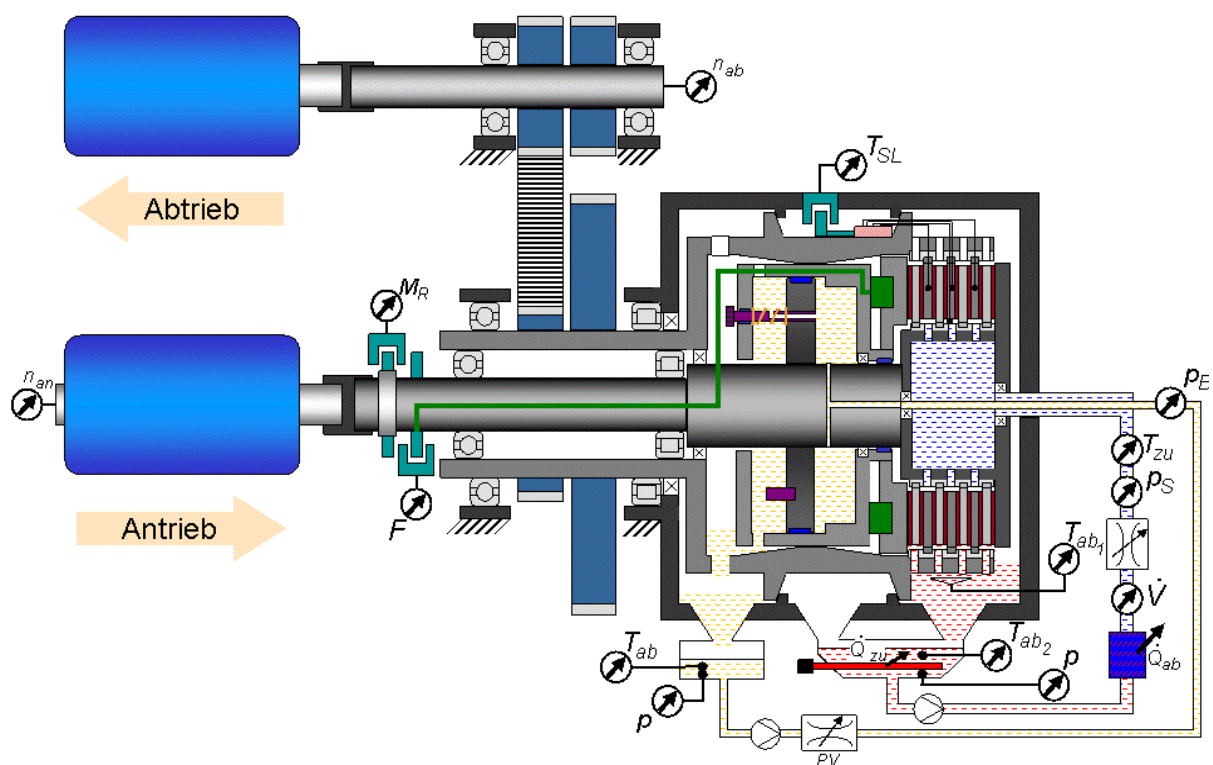


Bild 1: Prinzipdarstellung des Dauerschleppprüfstands (DSP); Konfiguration „Pkw – Anwendungen“

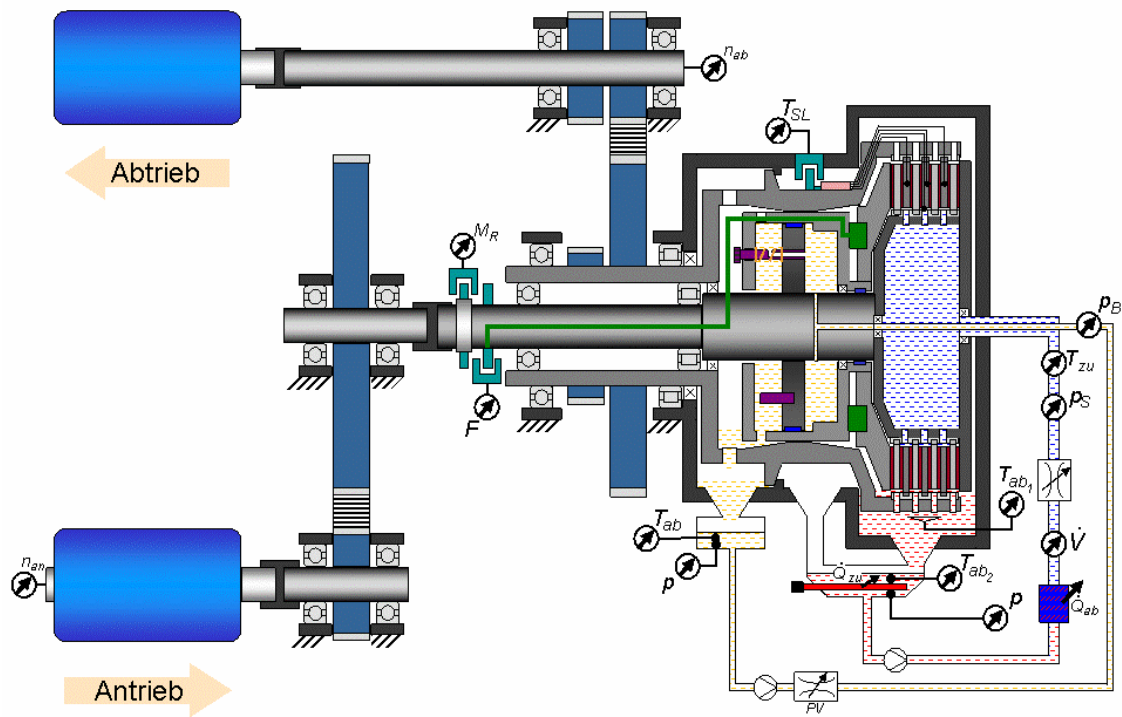


Bild 2: Prinzipdarstellung des Dauerschleppprüfstandes (DSP); Konfiguration „Industrie Anwendungen“

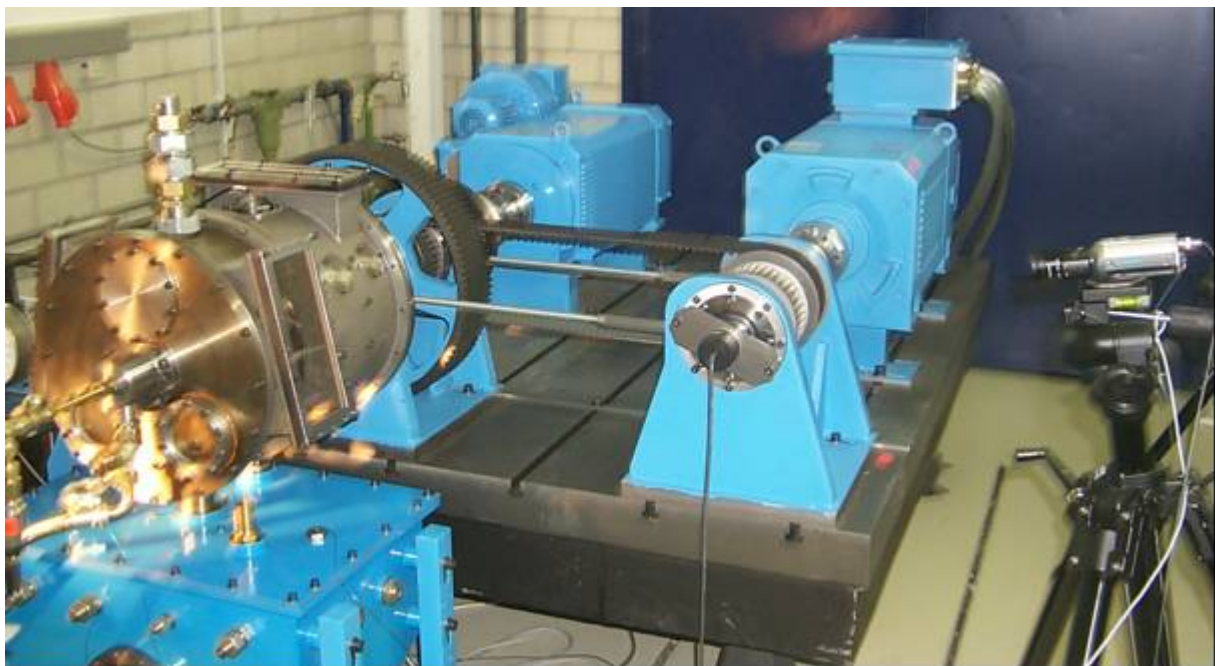


Bild 3: Foto des Lamellenkupplungsprüfstandes für Dauerschleppanwendungen (DSP)

4.2 Messtechnik

Die am Prüfstand gemessenen Größen sind:

- Drehmoment
- Axialkraft
- An- und Abtriebsdrehzahlen
- Anpressdruck
- Verschiedene Temperaturen, u. a. auf den rotierenden Stahllamellen
- Ölvolumenstrom
- Druck im Kühlölzulauf

Das Drehmoment wird über eine Messnabe mit einem Messbereich von bis zu 1 kNm und einer Genauigkeit von 0,25 % vom Endwert gemessen und telemetrisch mit einer Messsignalbandbreite von 10 kHz übertragen.

Die Axialkraft wird über einen mit DMS bestückten Biegebalken-Kraftaufnehmer, der im Kraftfluss zwischen Anpresskolben und Lamellenpaket sitzt, ermittelt. Auch dieses Messsignal wird telemetrisch übertragen (Bandbreite 5 kHz). Es können Axialkräfte bis 8 kN direkt über dieses Messprinzip gemessen werden. Die Axialkraft wird im darüber hinausgehenden Bereich über den gemessenen Öldruck berechnet. Hierbei werden Fliehkrafteinflüsse und Hystereseeffekte (z.B. durch Dichtungsreibung) kompensiert. Der Drucksensor besitzt einen Messbereich bis zu 25 bar mit einer Genauigkeit von 0,1 % vom Endwert.

Die Drehzahlen der Antriebs- und Bremsmaschine werden über jeweils einen Inkremental-Drehgeber ermittelt und über f/U – Wandler der Messdatenerfassung zugeführt.

Der Kühlölvolumenstrom wird über einen präzisen Volumenstromzähler geregelt. Um zu ermitteln, (ob bzw.) bei welchem Kühlölvolumenstrom ein Rückstau im Schmierölzufluss entsteht (Schluckvermögen), wird auch hier der Druck gemessen.

4.3 Prüfteile

Die Versuche werden an zwei Baugrößen (Belagreifflächen-Innendurchmesser d_I und Außendurchmesser d_A) durchgeführt:

- Baugröße I $d_A = 187,5$ mm, $d_I = 165$ mm, Hersteller BorgWarner
- Baugröße II $d_A = 258$ mm, $d_I = 209$ mm, Hersteller Ortlinghaus-Werke GmbH

Für die Lamellen der Baugröße I (Papierbelag) wurden die geometrischen Abmessungen der Mitnehmervverzahnung serienmäßigen verwendet. Die Lamellen der Baugröße II wurden mit serienmäßigem Sinterbelag beschichtet. Ein großer Teil der systematischen Untersuchungen an Lamellen der Baugröße I werden mit 6 Wirkflächenpaaren (WFP) bzw. Reibflächenpaarenanzahl $z=6$ durchgeführt. Weiterhin werden Stichversuche mit Lamellen

der Baugröße I mit Variation der Wirkflächenpaaranzahl (4, 8,10) durchgeführt. Mit den Lamellen der Baugröße II werden 4 Wirkflächenpaare (WFP) untersucht.

4.3.1 Belaglamellen

Die organischen Belaglamellen (OB) (Papierbelag) wurden auf innenverzahnten Trägerblechen aufgeklebt. Mit dem Streusinter- Verfahren wurde der Sinterbelag (SB) hergestellt.

Um den Einfluss des Nutbildes zu ermitteln, werden an den Lamellen der Baugröße I drei verschiedene Nutungen untersucht. Die Nutbilder sind Radialnut (R), Kamm/Gruppenparallel (K/GP) und Waffelmuster (WM) (Bild 4). Für die Versuche mit den Belaglamellen OB4 wird die Lamelle mit einer 6-fach Sinuswellung (Wellenhöhe = 0,15 mm) ausgeführt.

An den Lamellen der Baugröße II mit Sinterbelag (SB) wird das Nutbild Waffelmuster (WM) untersucht (Bild 5).

In Tabelle 2 sind Daten der Untersuchten Belaglamellen zusammengefasst.

Belagbez.	Baugröße	Hersteller	Reibbelags- typ	Nutbild	d_{BL} [mm]	b_{Nut} [mm]	t_{Nut} [mm]	a [mm]	Wellung
OB1	I	A	Papier	R	2,8	1,6	1	* ⁴¹	plan
OB2	I	A	Papier	K/GP	2,8	1	0,17	4	plan
OB3	I	A	Papier	WM	2,8	1,2	0,3	4,5	plan
OB4	I	A	Papier	R	2,8	1,6	1	** ⁴²	sinus
SB	II	B	Sinter	WM	3	-	-	-	plan

Tabelle 2: Daten der Belaglamellen

⁴¹ Anzahl der Nuten 32 Nuten

⁴² Anzahl der Nuten 32 Nuten



Bild 4: eingesetzte Innenlamellen der Lamellenbaugröße I mit dem Nutbild Radial(R), Kamm/Gruppenparallel(K/GP) und Waffelmuster (WM)

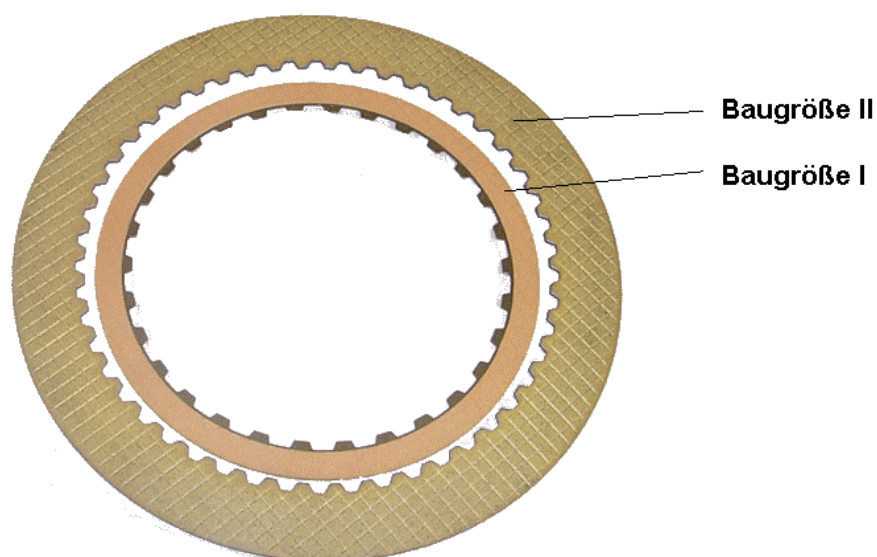


Bild 5: Bilder der eingesetzten Innenlamellen (Neuzustand)

4.3.2 Stahllamellen

Für die verschiedenen Reibbeläge (Papier oder Sinter) werden unterschiedliche Materialien und Werkstoffbehandlungen der Stahlgewindlamellen eingesetzt. Für den Reibbelag Papier werden die Stahllamellen aus kaltgewalztem Stahlblech (Ck60) gestanzt und durch Gleitschleifen endbearbeitet. Die Stahllamellen für die Paarung mit Sinterreibbelägen sind aus Ck60 gefertigt, auf die Vickershärte ca. 450HV30 vergütet und anschließend planiert (Bild 6).

In Tabelle 3 sind die verwendeten Stahllamellen mit jeweiliger Werkstoffbezeichnung aufgelistet.

Kurzbez.	Baugröße	Wärmebehandlung	Dicke	Werkstoff	Bemerkung
SL1	I	---	3 mm	Ck60	In Kombination mit organischen Reibbeläge (planare Ausführung)
SL2	II	vergütet	1,8 mm	Ck60	In Kombination mit sintermetallischen Reibbelägen(Sinus-Wellung)

Tabelle 3: Versuchsteile -Stahllamelle

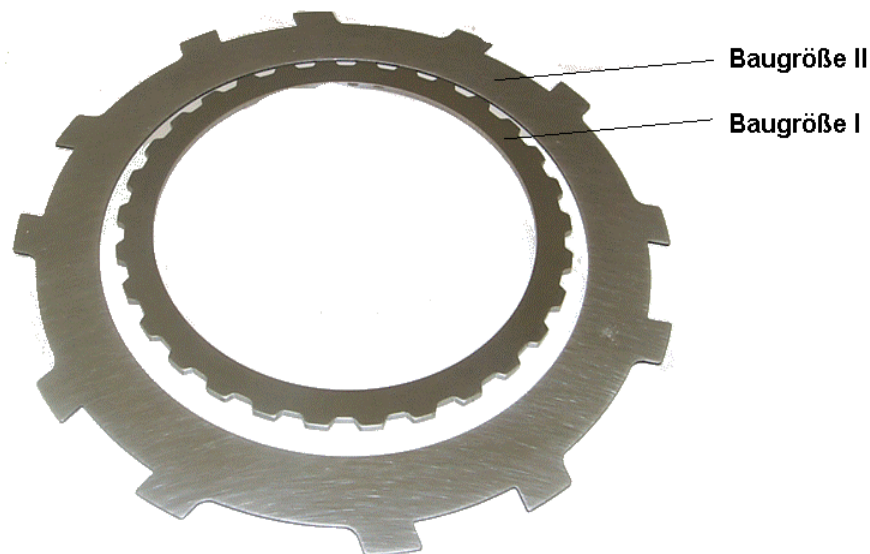


Bild 6: Bilder der eingesetzten Stahllamellen (Neuzustand)

4.3.3 Dokumentation der Versuchsteile

4.3.3.1 Teilemarkierung

Um eine nachvollziehbare Dokumentation der Reihenfolge des Einbaus und der Drehlage der Lamellen zu gewährleisten, wurden die Lamellen einzeln nach folgendem Schema gekennzeichnet. Jede Belaglamelle bzw. Stahllamelle wird mit römischen Ziffern (je nach Reibflächenanzahl) von I bis IV markiert. Die einzelnen Innenlamellen werden so montiert, dass sich die Beschriftungen jeweils auf einem Zahn der Belagverzahnung befinden und aus Richtung des Abdruckrings lesbar sind. Die Innenlamelle mit der Nummer I wird hierzu zuerst eingebaut (siehe Bild 7). Die Außenlamellen werden nach der Applikation der Thermoelemente am Umfang markiert, um somit ihre relative Drehlage zueinander zu definieren. Diese Markierung wird beim Einbau einer Gegenmarkierung auf dem Lamellenmitnehmer (Gegenverzahnung) zugeordnet.

4.3.3.2 Lamellendickenmessung (Lamellenbaugröße I)

Zur Dokumentation des Ausgangszustandes wird bei jedem eingebauten Lamellenpaket an den Belaglamellen die Lamellendicke im Neuzustand vermessen. Die Messung erfolgt an

vier über den Umfang verteilten Messpunkten, die jeweils in Reibflächenmitte angeordnet sind (siehe Bild 7). Weiter werden Dickenmessungen der Belaglamellen für die Dokumentation des Belagverschleißes bei Dauerschleifversuchen durchgeführt.

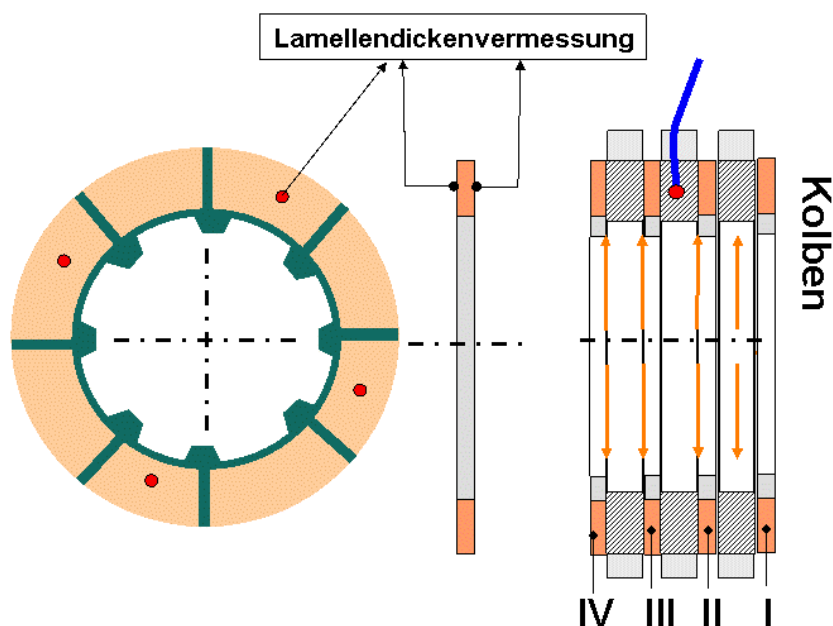


Bild 7: Messpunktlage zur Lamellendickenmessung und Einbaukonvention des Lamellenpaket

Bild 8 zeigt eine typische Auswertung der Lamellendickenabnahme der Innenlamellen nach der Untersuchung. Bei der Auswertung wird der Mittelwert der Lamellendicke und der Lamellendickenabnahme an jeweils vier Messpunkten gebildet.

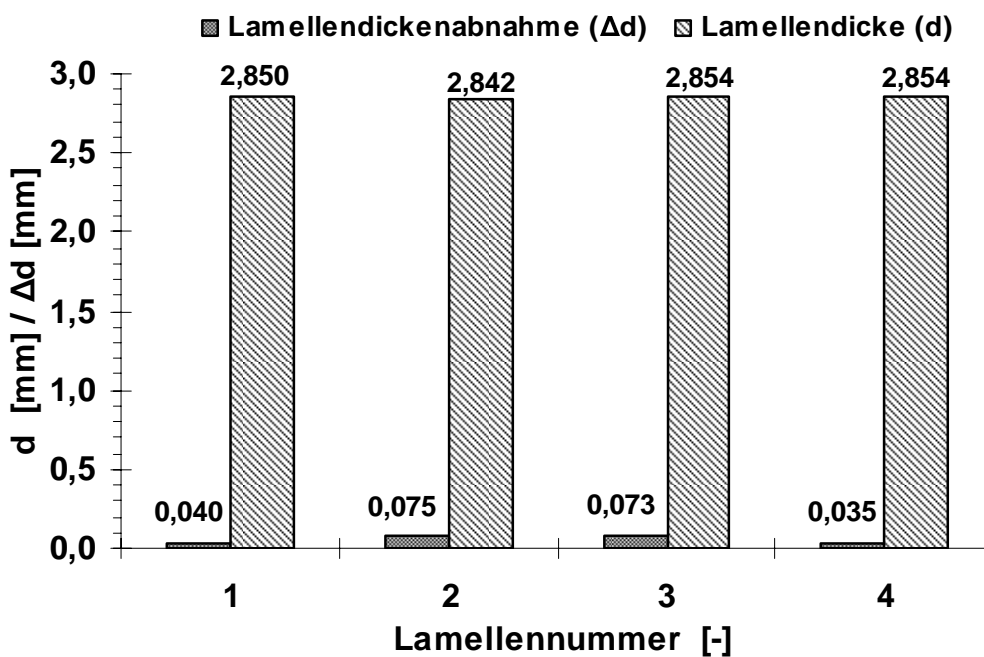


Bild 8: Exemplarische Verteilung der Lamellendickenabnahme für Lamellen der Baugröße I

Da die erste (Belag-)Lamelle (kolbenseitig) nur ein aktives Wirkflächenpaar mit einer Stahllamelle bildet, ist die Lamellendickenabnahme im Vergleich mit den anderen Lamellen ca. 50 % kleiner. Dies gilt in gleicher Weise für die aus kolbenseitiger Sicht letzte Stahllamelle. Hieraus können die Unterschiedlichen Einflüsse des Setzens und des Verschleißes auf die Lamellendickenabnahme bestimmt werden, da bei den äußeren Belaglamellen deutlich zwischen den Einflüssen des Setzens und des Verschleißes unterschieden werden kann.

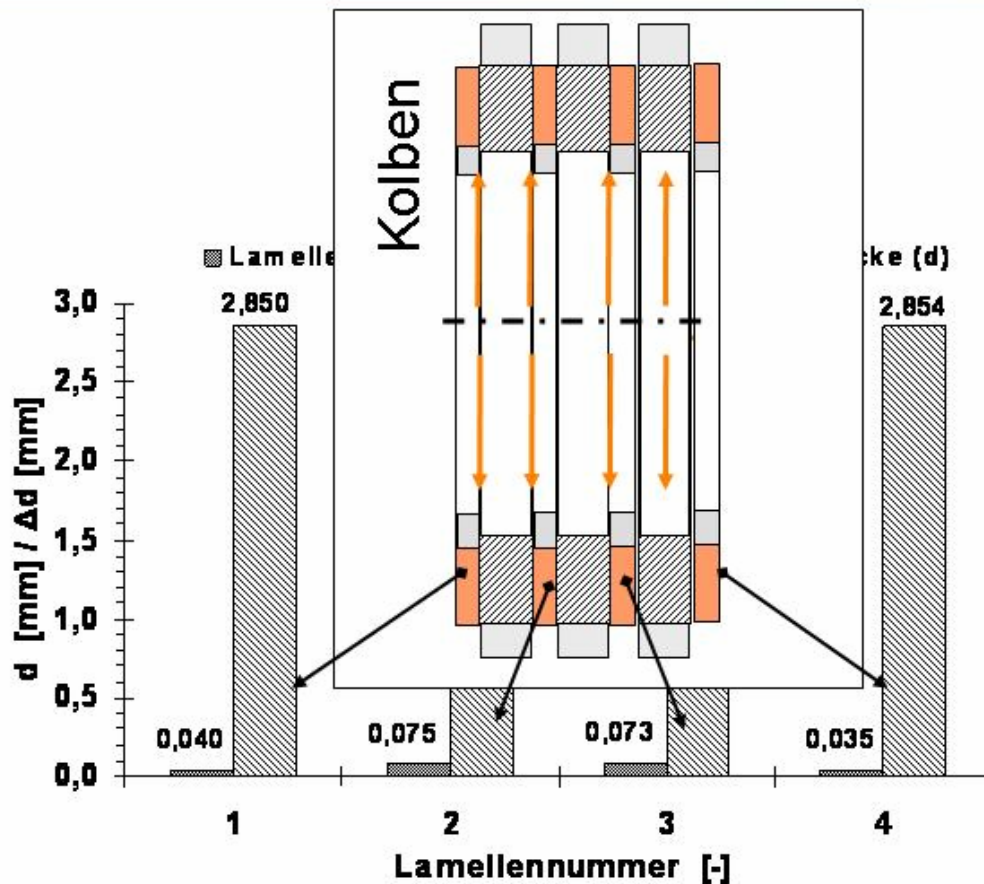


Bild 9: Zuordnung der Wirkflächenpaare zur jeweiligen Lamellendickenvermessung

4.3.3.3 Lamellendickenvermessung (Sinterbelag/Baugröße II)

Über den breiteren Stahllamellen der Lamellenbaugröße II wurde zusätzlich der Oberflächenverlauf an vier Stellen über 50 Punkte radial erfasst. Hiermit können vergleichende Aussagen über die Verformungen bzw. ungleichmäßiges Verschleißverhalten der Stahllamellen in Abhängigkeit der Belastungsgeschichte der Lamellen gewonnen werden.

Bild 10 zeigt eine vergleichende Auswertung der Stahllamellenvermessung im neuen und im eingelaufenen Zustand. In Bild 11 ist die Stahllamellendickenabnahme über den Radius aufgetragen.

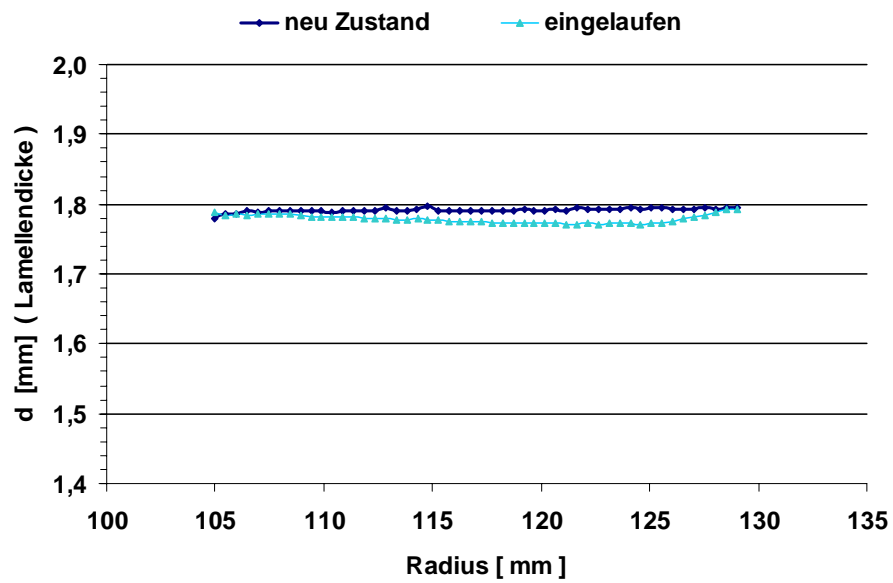


Bild 10: Beispiel für Lamellendickenvermessung an Lamellen der Baugröße II

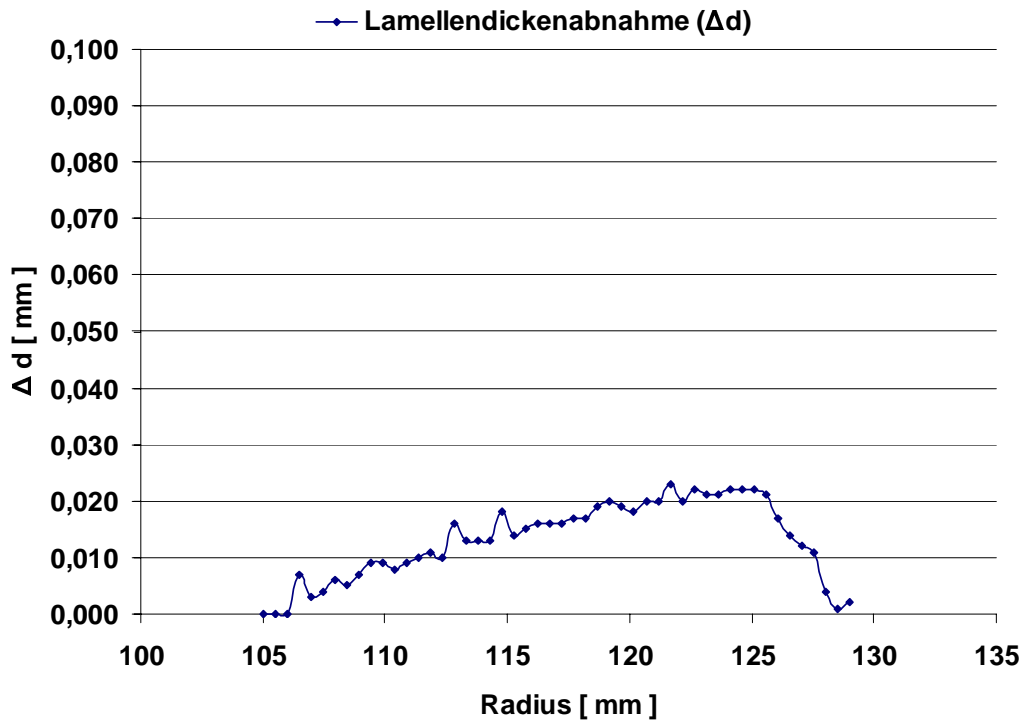


Bild 11: Beispiel für ungleichmäßige Lamellendickenabnahme an Lamellen der Baugröße II

4.3.3.4 Rauheitsmessung an den Reibflächen der Stahllamelle

In Vorversuchen wurde sowohl eine starke Änderung der Oberflächenstruktur der Stahllamellen in der Lamellenbaugröße I, als auch in Stahllamellen der Lamellenbaugröße II festgestellt. Um die Rauheitsstruktur der Stahllamellenoberflächen vor und nach den jeweiligen Prüfstandsversuchen bestimmen zu können, wurde ein Tastschnittverfahren (Messgerät Perthometer S 5P) eingesetzt. Die Stahllamellen des Kupplungspakets wurden im Neuzustand und nach dem Einlauf vermessen. In einem definierten Bereich an Vorder- und Rückseite der Stahllamellen wurde hierzu jeweils eine Messung senkrecht zur Reibrichtung durchgeführt. Das Rauheitsprofil der verwendeten Stahllamellen wurde gemessen und vergleichend dokumentiert. Bild 11 und Bild 12 zeigen exemplarisch die Rauheitsprofile und die Rauheitswerte einer neuen und einer eingelaufenen Stahllamelle.

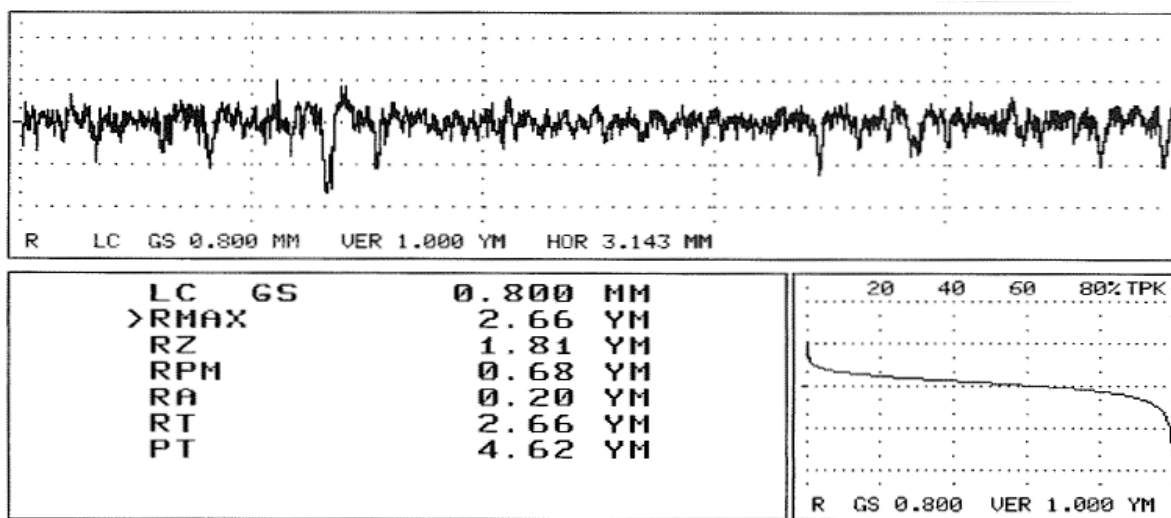


Bild 12: Rauheitsprofil einer neuen Stahllamelle vorgesehen für den Einsatz gegen sintermetallische Reibbeläge für die Lamellenbaugröße II

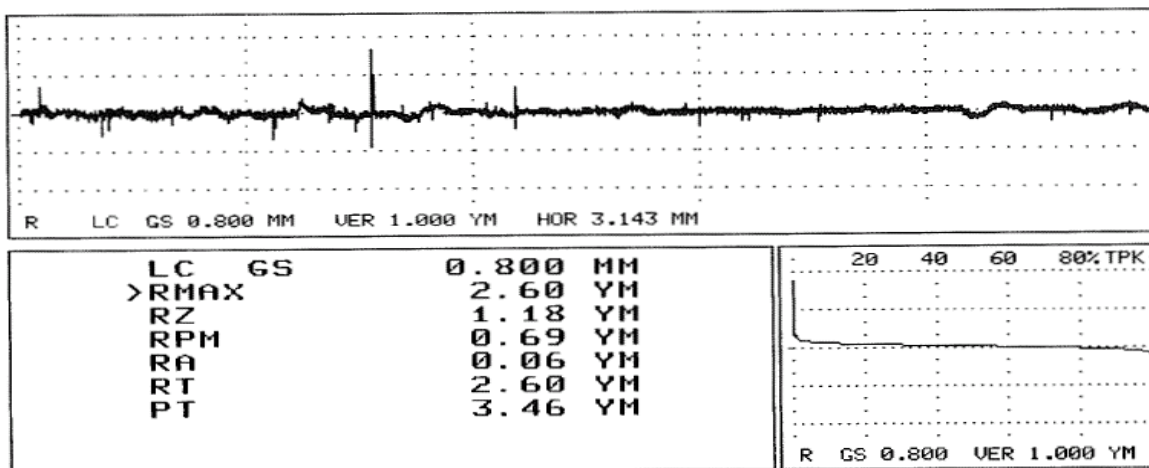


Bild 13: Rauheitsprofil einer gelaufenen Stahllamelle gegen einen sintermetallischen Reibbelag für die Lamellenbaugröße II

4.4 Kühlschmierstoffe

Die Untersuchungen werden an Serienlamellen für Pkw- und Industrieanwendung bei Innenschmierung, d.h. zentraler Zuführung des Schmierstoffes durchgeführt. Für Lamellenbaugröße I (Papierreibbeläge) wurden die Versuche mit einem handelsüblichen Schmierstoff ÖI_A (ATF) durchgeführt.

Das Versuchsöl ÖI_A (ATF), ist ein Getriebeöl für neuere Pkw-Automat-Getriebe. Es basiert auf synthetischen Grundölen und ist für die Lebensdauerschmierung von PKW-Automatikgetrieben⁴³. Das vorgesehene Öl zeichnet sich durch gutes Komfortverhalten wegen der einlegierten Additive aus. Das bedeutet für den Einsatz in einer Schaltkupplung ein weiches Schaltverhalten und konstantes Reibverhalten über die gesamte Lebensdauer des Getriebes⁴⁴.

In Stichversuchen wurde ein zweiter Schmierstoff ÖI_B (Plantomot) untersucht. Das ÖI_B (Plantomot) gehört zu den Motoren- und Mehrbereichsölen und besitzt neben den genannten Additiven des Getriebeöls noch zusätzlich metallische Detergentien und Dichtungsquellstoffe. Die Öle der Plantoserie von Fuchs gehören zu den biologisch schnell abbaubaren Schmierstoffen auf der Basis von Pflanzenölen und oleochemischen Estern. Tabelle 4 zeigt die wichtigsten Kennwerte der verwendeten Versuchsöle.

Kurzbez.	Schmierstoffbezeichnung	v [mm ² /s]		Dichte [kg/m ³]
		40°C	100°C	bei 15 °C
ÖI_A	Shell ATF 1375.4	26,8	5,6	840
ÖI_B	Planto Hydramot SL SAE 5W40	-	12,5 - 16,3	-

Tabelle 4: Eingesetzte Schmierstoffe

⁴³ Brügel / Thies / Naumann 1989

⁴⁴ Gemeinholzer 1985

5 Versuchsmethodik

5.1 Grundlage der experimentellen Untersuchungen

Bei nasslaufenden Lamellenkupplungen gibt es mehrere Kennwerte um die Leistungsgrenze zu bestimmen. Eine Leistungsgrenze liegt quantitativ dann vor, wenn starke Änderungen im Drehmoment zu verzeichnen sind, sich die Rutschzeit erhöht und sich gegen Schaltungsende eine hohe Drehmomentspitze zeigt. Ebenfalls maßgebend ist die Änderung zu übertragbaren Drehmoments sowie der Reibwertabfall, die Dickenabnahme der Lamellen und eine Erhöhung des Leerlaufmoments, aufgrund starker Verformung der Lamellen⁴⁵. Temperatur- und Drehmomentschwankungen können auch ein Abbruchkriterium und somit für den Anwendungsfall eine Leistungsgrenze, darstellen. Denn zu hohe Spitzentemperaturen und Drehmomentamplituden können zum Ausfall einer Kupplung bzw. Bremse führen. Damit zusammenhängend können auch Reibschwingungen ein Zustand der Grenzbelastung sein⁴⁶.

Die entscheidende Größe für die Ermittlung der Leistungsgrenze der nasslaufenden Lamellenkupplung im Dauerschlupfbetrieb ist die spezifische Reibleistung q_p . Sie beschreibt die thermische Beanspruchung.

Die spezifische Reibleistung q_p , d.h. die auf die Gesamtreibfläche ($A_{ges}=A_r \cdot z$) bezogene Reibleistung P_r , ist ein Maß für die Leistungsdichte im Schmierpalt.

$$q_p(t) = \frac{P_r(t)}{A_r \cdot z} \quad (1)$$

$$P_r = T_r(t) \cdot [n_{an}(t) - n_{ab}(t)] \cdot \frac{\pi}{30} \quad (2)$$

Durch variieren von Schlupf n_s und Reibmoment T_r bildet sich eine Hyperbel, die eine konstante spezifische Reibleistung charakterisiert (Bild 14). Bezogen auf die praktische Anwendung wurden die verschiedenen Betriebspunkte der nasslaufenden Lamellenkupplung abgedeckt. Dabei wurden drei Bereiche der Leistungshyperbel untersucht. Der linke Bereich in Bild 14 charakterisiert Betriebspunkt mit hohem Schlupf und niedriger Flächenpressung. Der Bereich mit höherer Flächenpressung und niedrigem Schlupf ist in Bild 14 rechts zu sehen. Weiterhin wurde der mittlere Bereich (mittlere Flächenpressung und mittlerem Schlupf) untersucht.

⁴⁵ Beisel 1983

⁴⁶ Höhn / Pflaum / Mosbach 2003

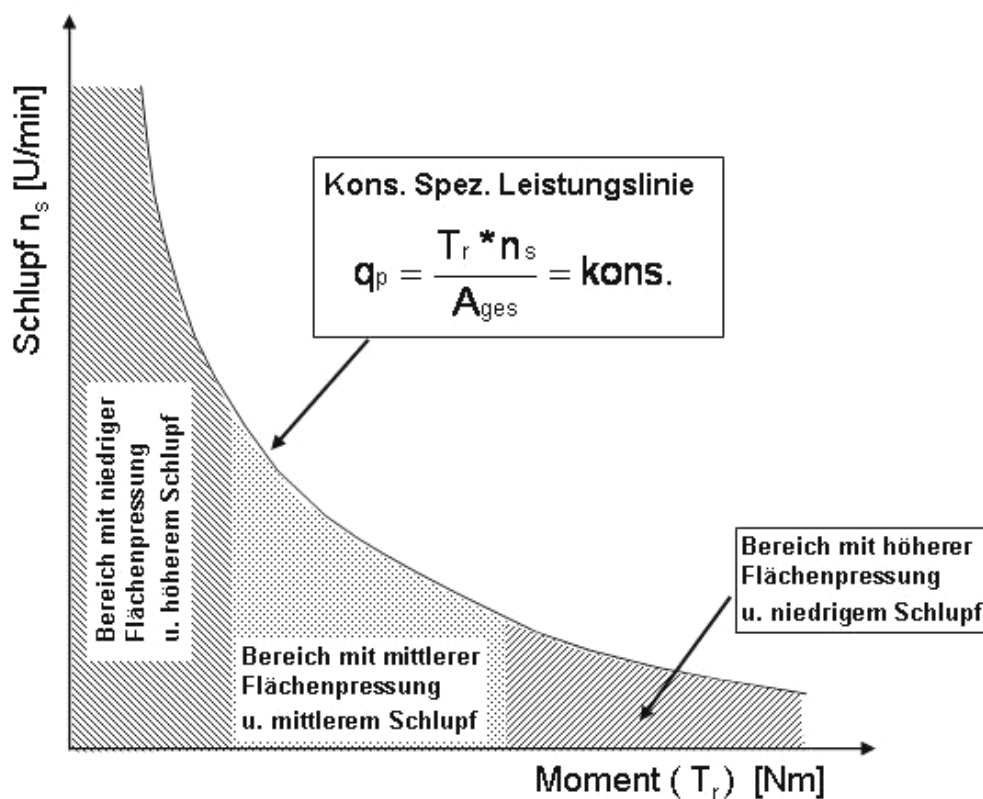


Bild 14: Versuchsablaufdiagramm „Konstante Leistungsgrenze“

5.2 Langzeitversuch

Während eines Schaltvorganges wird in der Kupplung durch Reibung Wärme erzeugt. Innerhalb einer praxisrelevanten Rutschzeit von etwa 0,5 s bis 2 s wird die Wärme in wesentlich in der Stahllamelle „gespeichert“ (bei Sinterlamellen auch Sinterlamelle) und dann nach dem Ende der Schaltung wieder an das Kühlöl abgegeben. Mit der Dicke der Stahllamellen steigt auch deren Wärmeaufnahmevermögen⁴⁷.

Durch die erzeugte Wärme werden die Stahllamellen kurz erwärmt, und wieder mit Hilfe des Schmierstoffes abgekühlt. Aufgrund der kurzen Rutschzeit bei den Schaltungen erreicht die Stahllamellentemperatur nicht den zu hohen thermischen Beharrungszustand. Beim Dauerschlupfbetrieb drehen sich dieser Randbedingungen. Nun wird kontinuierlich Wärme eingebracht und die Stahllamellen erwärmen sich bis ein thermisches Gleichgewicht zwischen zugeführte Reibungswärme und mit Kühlöl abgeführten Wärme erreicht ist.

Um die Zeit zum Erreichen des stationären Zustand zu ermitteln, wurden separate Langzeitversuche durchgeführt (Bild 15).

Das Ziel des Dauerversuchs war es, die nötige Versuchsdauer auf einer Laststufe zu bestimmen. Der Versuch zeigt, dass der Reibwert zunächst zunimmt, dann nach ca. einer

⁴⁷ Frey / Neumann 1993

Stunde abfällt und sich stabilisiert. Die Einlaufeffekte zu Beginn des Versuches wurden im Folgenden durch die Einlaufprozedur kompensiert.

Es zeigt sich, dass die Versuchsdauer auf einer Laststufe zwischen 20 min. und 35 min liegen sollte, um das Erreichen der Beharrungstemperatur zu gewährleisten. Der Reibwertverlauf zeigt, dass längere Versuchszeiten nicht erforderlich sind, um die Leistungsgrenzen im Dauerschleppbetrieb parameterabhängig zu definieren, da in den vorgesehenen Leistungsbereich keine größeren Veränderungen des Reibwertes mehr aufgetreten ist.

Bild 15 zeigt den Reibwert- und Temperaturverlauf eines Dauerschleppversuches über einen Zeitraum von 24 Stunden. Hierbei wurden die Versuchsparameter so gewählt, dass die spezifische Leistungsgrenze nicht überschritten wurde. Um eine Beschädigung der Messtechnik im Prüfkopf zu vermeiden (zu hohe Temperaturen), wurde der Versuch bei ca. 60% der spezifischen Leistungsgrenze durchgeführt. Mit dem Versuch wurde mit einem neuen Lamellenpaket direkt nach der Spülprozedur mit frischem Kühlöl ohne Einlaufprozedur begonnen. Für den Versuch wurden ein spezifischer Kühlölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ und eine spezifische Reibleistung von $0,067 \text{ W}/\text{mm}^2$ eingestellt. Der Versuch zeigt, dass sich ein nahezu höchster Reibwert eingestellt und das System – unter diesen Randbedingungen – sich im Dauerschleppbetrieb gefahren werden kann.

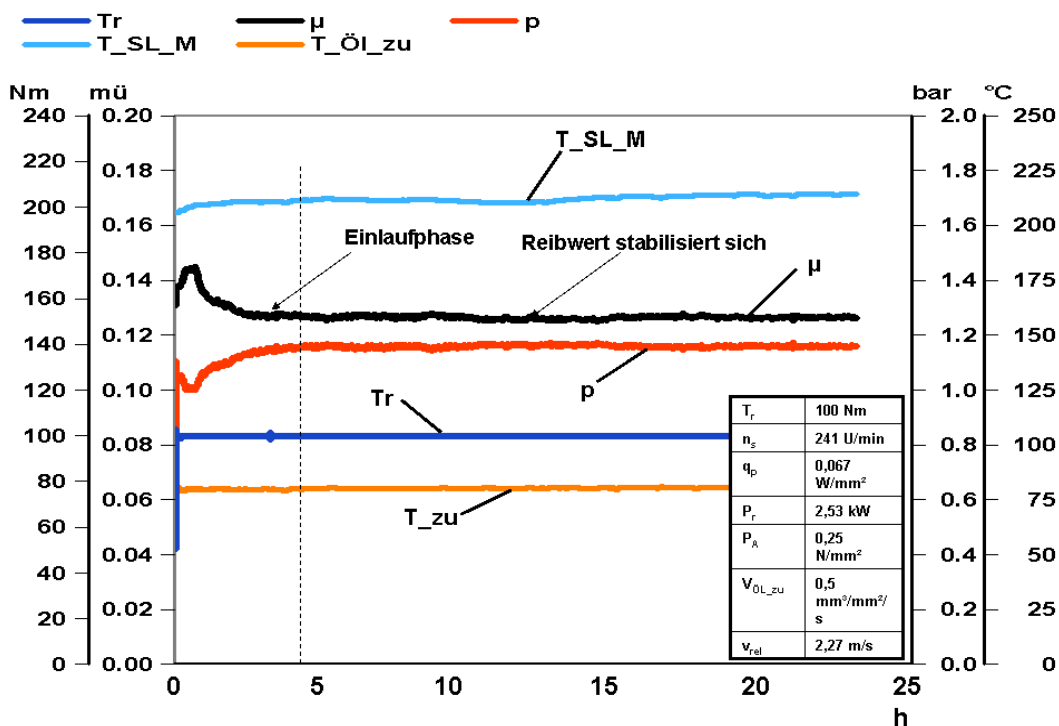


Bild 15: Dauerversuch / Untersuchung Reibwertverlauf unterhalb der Leistungsgrenze

5.3 Prinzipielle Vorgehensweise

Im Folgenden wird eine geeignete Versuchsmethodik dargestellt. Bild 16 zeigt hierbei die prinzipielle Vorgehensweise. Beginnend bei einer Linie konstanter, relativ niedriger Leistung wird der Punkt I⁴⁸ mit relativ geringem Drehmoment und relativ hohem Schlupf nach der in Kapitel 5.4 beschriebenen Versuchsführung angefahren. Anschließend werden die Punkte II⁴⁹ und III⁵⁰ auf dieser Linie (konstanter Leistung) angefahren. Hierbei wird jeweils der Schlupf reduziert und das Drehmoment erhöht. Durch ein wiederholtes Anfahren des Punktes I⁵¹ auf dieser Leistungslinie wird das Abbruchkriterium (Reibwertabfall größer als 10 %) gemäß Kapitel 6.1.1 überprüft. Wurde keines der (in Kapitel 6.1.1) beschriebenen Abbruchkriterien erreicht, wird ein Versuchspunkt mit einem relativ zu Versuchspunkt I.1 höherem Drehmoment und gleichem Schlupf, also höherer Reibleistung (Linie i+1 in Bild 16) angefahren. Analog wird die Versuchsreihe entlang dieser Linie erhöhter aber konstanter Leistung fortgeführt, bis durch weitere Erhöhung der Reibleistung die Leistungsgrenzlinie, d.h. eines der Abbruchkriterien, erreicht wird. Wird die so definierte Leistungsgrenzlinie erreicht, wird die Versuchsreihe abgebrochen, das vorgeschädigte Lamellenpaket wird ausgetauscht und das Kühlöl ersetzt.

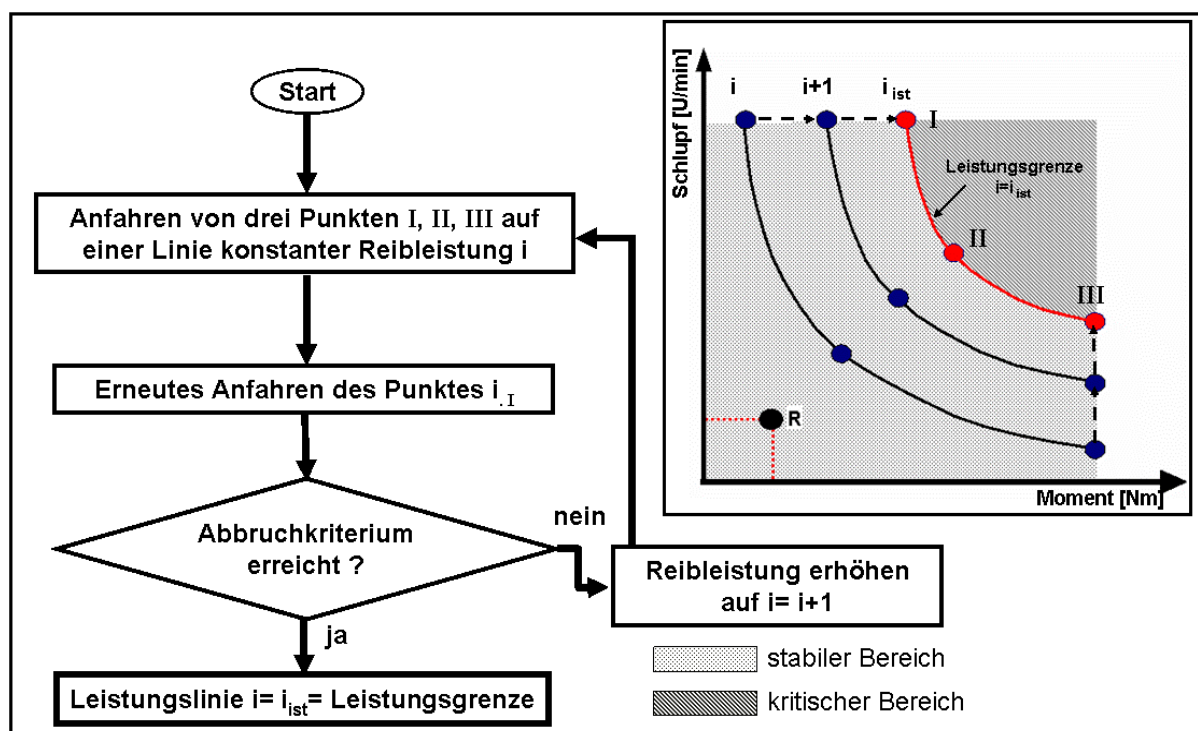


Bild 16: Versuchsablaufdiagramm bis zum Erreichen der Leistungsgrenze (Baugröße I)

⁴⁸ Entspricht in der Versuchsführung V1

⁴⁹ Entspricht in der Versuchsführung V2

⁵⁰ Entspricht in der Versuchsführung V3

⁵¹ Entspricht in der Versuchsführung V4

5.4 Versuchsdurchführung mit Papierreibbelägen in der Lamellenbaugröße I

Bei der eingeführten Versuchsmethodik (Lamellenbaugrößen I) werden die jeweiligen Einzelversuche (Versuchspunkte), wie nachfolgend beschrieben, durchgeführt:

Die Lamellen werden gekennzeichnet, vermessen und eingebaut. Daraufhin wird ein Spülvorgang durchgeführt. Zur Sicherstellung einer einheitlichen Belastungsvorgeschichte wird anschließend eine definierte Einlaufprozedur durchgeführt. Nach einem weiteren Spülvorgang wird mit der nachfolgend dargestellten Versuchsführung begonnen. Zur Bestimmung der Leistungsgrenze eines Lamellenpakets werden systematisch mehrere Linien konstanter Leistung nacheinander abgefahren (siehe Bild 16 rechts).

Hierbei wird wie in Bild 18 dargestellt, zunächst bei hohem und konstantem Schlupf das Drehmoment bis zum definierten Leistungswert erhöht. Auf diese Weise werden auf einer Linie konstanter Leistung jeweils die Versuch V1 (Punkt I) bis Versuch V3 (Punkt III) angefahren. Nach Abschluss des Anfahrens dieser Punkte (V1, V2, V3) wird V1 (entspricht Wiederholungsversuch V4) erneut angefahren. Ziel des wiederholten Anfahrens des Versuchspunktes (V4) ist es festzustellen, ob das definierte Abbruchkriterium (siehe Kapitel 6.1.1) erreicht ist. Diese kann mit Hilfe des Reibwertverlaufes (in Last- und Referenzniveau), das über den Druck bzw. die Axialkraft bestimmten wird, überprüft werden.

An jedem einzelnen Versuchspunkt (V1, V2, V3, V4) wird die Reibleistung, analog zur in Bild 17 dargestellten Stufungen, eingestellt. Um das Reibwert- Referenzniveau festzulegen, wird ein definiertes Referenzniveau (R) mit einer Dauer von 10 min. bei niedriger spezifischer Reibleistung angefahren (siehe Kapitel 6.1.2). Durch Erhöhung des Reibmoment T_r und dem Schlupf n_s wird das Lastniveau eingestellt. Die Versuchsdauer auf der Laststufe liegt zwischen 25 und 35 Minuten (siehe 5.2). Schließlich wird erneut der Referenz-Versuch (R) angefahren. Um sicher zu stellen, dass bei den Messungen Hystereseeffekte immer gleich berücksichtigt werden, wird auf dem Referenzniveau (R) das Reibmoment über den Druck kurzfristig (auf ein niedrigeres Niveau) abgesenkt und dann wieder auf das Nennniveau erhöht. So kann gewährleistet werden, dass Hysterese bedingte Fehler bei der Druckmessung sicher vermieden werden.

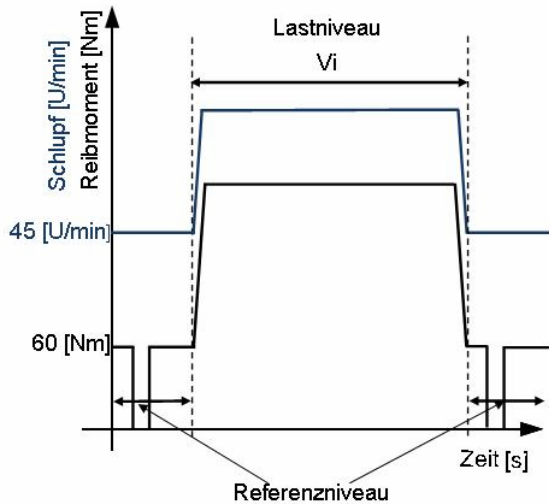


Bild 17: Zeitlicher Versuchsablauf im jeweiligen Leistungspunkt

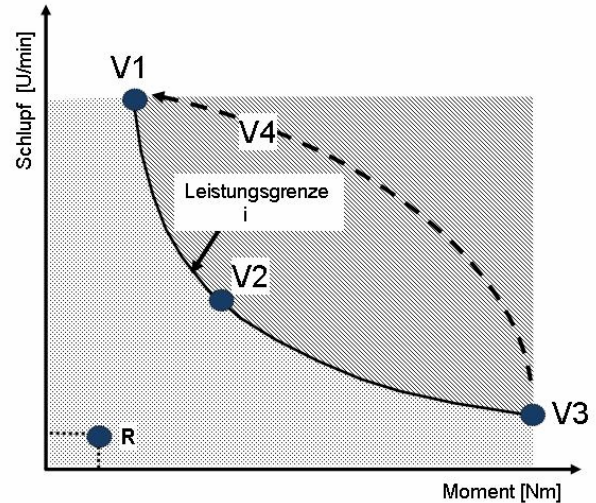
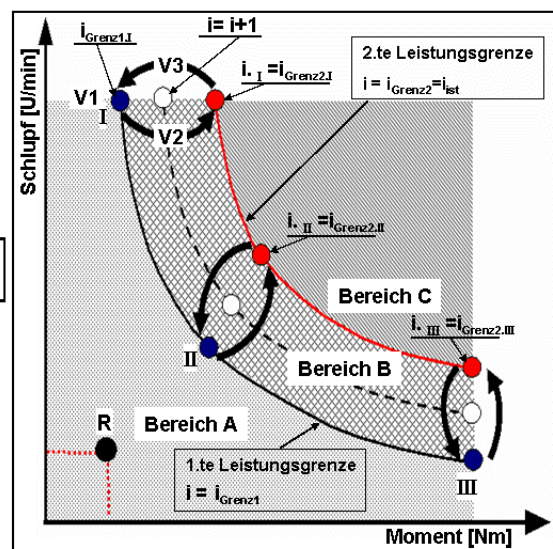
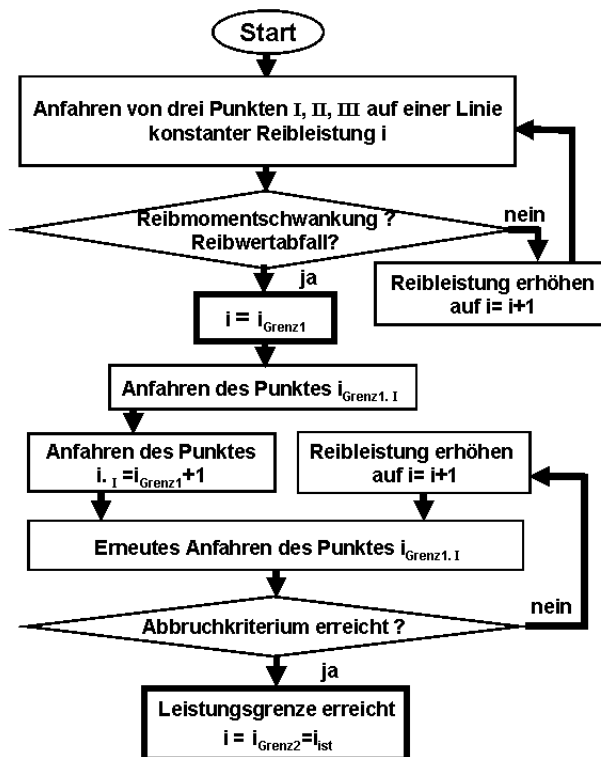


Bild 18: Versuchsführung entlang einer Leistungslinie

Durch diese Art der Versuchsführung wird die Leistungsgrenze systematisch für ein bestimmtes Parameterfeld angefahren. Mit dem Wiederholungsversuch (V4) nach abfahren einer Leistungslinie kann geprüft werden, ob die Leistungsgrenze erreicht oder überschritten wurde.

5.5 Versuchsdurchführung mit Sinterreibbelägen in der Lamellenbaugröße II



- stabiler Bereich
- Quasi-stabiler Bereich
- kritischer Bereich

Bild 19: Versuchsablaufdiagramm bis zum Erreichen der Leistungsgrenze (Baugröße II-Sinter)

Nach der Auswertung erster Vorversuche mit Sintermetallreibbelägen in der Baugröße II, wurde die Versuchsführung erweitert, um den spezifischen Eigenschaften dieses tribologischen Systems gerecht zu werden, und sich zu erfassen.

Bild 19 stellt die erweiterte Versuchsführung schematisch dar. In Bild 19 rechts ist das Leistungshyperbel-Diagramm dargestellt. Im Leistungshyperbel-Diagramm sind drei Bereiche durch verschiedene Schraffuren gekennzeichnet. Der Bereich A (stabiler Bereich) wird durch die dargestellte Leistungslinie im oberen Bereich begrenzt. In diesem Bereich werden keine Temperatur- und Drehmomentschwankungen und kein Reibwertabfall beobachtet. (Beispiel siehe Versuchsergebnisse Bild 40). Der Bereich B (quasi-stabiler Bereich) liegt zwischen dem stabilen Bereich A und dem instabilen Bereich C. Dieser quasi-stabile Bereich ist gekennzeichnet durch Temperatur- und Drehmomentschwankungen, sowie sporadischen bzw. relativ geringen Reibwertabfall (kleiner als die des definierten Abbruchkriteriums, Beispiel: siehe Versuchsergebnisse in Bild 41) Im Bereich B werden also die definierten Abbruchkriterien noch nicht erreicht. Es ist jedoch mit Einschränkungen im Betrieb durch die auftretenden Reibwertschwankungen zu rechnen. Im Bereich C (instabiler Bereich) werden die Abbruchkriterien erreicht bzw. überschritten. Darüber hinaus treten hier sehr starke Reibmoment- und Reibwertschwankungen und schnelle Temperaturänderungen (Erhöhung) auf. In diesem kritischen Bereich kann das Reibsystem nicht mehr sicher betrieben werden (Beispiel siehe Versuchsergebnisse Bild 42).

Die in Kapitel 5.3 bereits vorgestellte Versuchsmethodik wurde, um die Bereiche A bis C sicher identifizieren zu können, erweitert. Im Bereich A werden auf den Linien konstanter Leistung jeweils drei Versuchspunkte angefahren. Durch die systematische Variation von Schlupf und Drehmoment werden die verschiedenen Betriebszustände abgebildet. Hier zeigen sich noch keine Reibwert-, Momenten- bzw. Temperaturschwankungen. Ein nennenswerter Reibwertabfall ist nicht zu beobachten.

Wird der Bereich B in der Versuchsführung erreicht, zeigen sich Temperatur- und Reibmomentschwankungen mit einer Schwingbreite von ca. 10 °C bzw. ca. 1 % vom maximalen eingestellten Reibmoment im gesamten Bereich einer Linie konstanter Leistung. Eine sinnvolle Aussage des Reibwertverlaufs ist nicht möglich. Daher wird jetzt ausgehend von der Grenzlinie des Bereiches A jeweils für einen Versuchspunkt, durch Erhöhung der Leistung (Schlupf bzw. Drehmoment), in den Bereich B hinein gefahren (z.B. auf Punkt 2.I vom Ausgangspunkt 1.I in Bild 19). Anschließend wird erneut der Ausgangspunkt an der Bereichsgrenze A angefahren und ermittelt, ob sich ein Reibwertabfall ergeben hat. Sind die Abbruchkriterien noch nicht erfüllt, wird anschließend die Leistung weiter gesteigert, bis die Grenzlinie zum instabilen Bereich C erreicht wird.

Der Beginn des kritischen Bereiches ist gekennzeichnet durch das Erreichen der Abbruchkriterien gemäß der Definition in Kapitel 6.1.1.

5.6 Dauerschleif Betriebsarten

5.6.1 Kupplungsbetrieb (KB)

Im Kupplungsbetrieb (siehe Bild 20) wird die Drehzahl des Innenlamellenträgers – also der Belagslamelle – auf einen definierten Wert eingestellt. In den hier durchgeführten Versuchen sind dies 400 bzw. 800 U/min. Der Schlupf wird durch eine Absenkung der Drehzahl der sich anfänglich mit der gleichen Drehzahl drehenden Abtriebsseite (Außenlamelle) erzeugt.

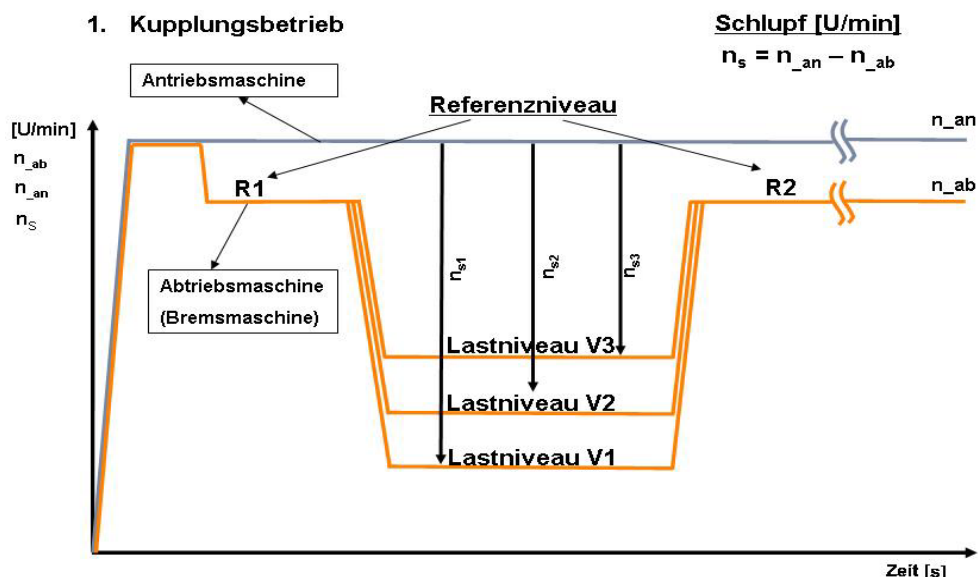


Bild 20: Schlupfregelung im Kupplungsbetrieb (KB)

5.6.2 Bremsbetrieb (BB)

Hier werden die abtriebsseitigen Außenlamellen (Stahllamellen) über die Bremsmaschine auf Drehzahl 0 U/min geregelt (Stillstand). Der Schlupf wird über die Antriebsmaschine und damit über die Belagslamellen (Innenlamellen) eingestellt (Bild 21).

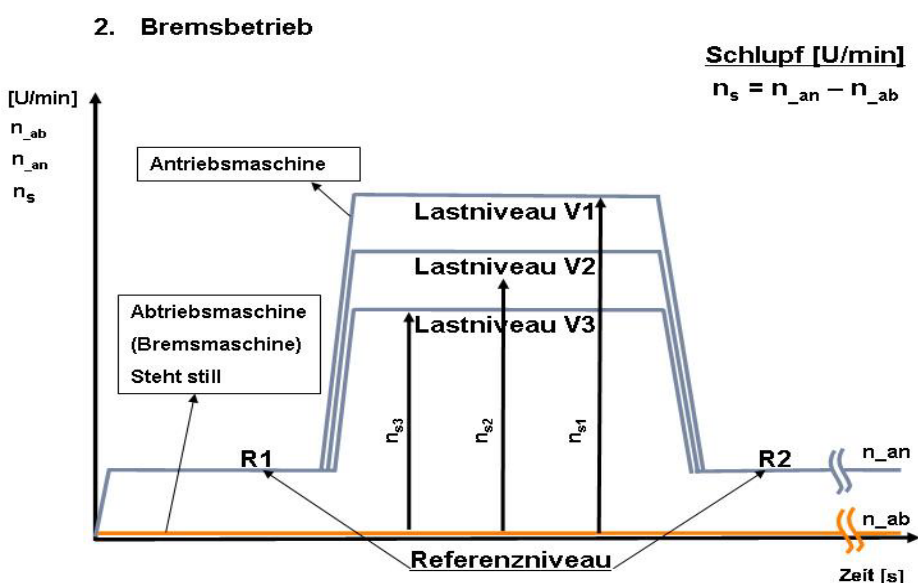


Bild 21: Schlupfregelung im Bremsbetrieb (BB)

6 Versuchsauswertung

6.1 Versuchsauswertung Papierbelag

6.1.1 Definition der Abbruchkriterien

Für das tribologische System der nassslaufenden Lamellenkupplungen ist eine starke Änderung des Drehmoment- und des Reibwertverlaufes maßgebend für das Erreichen der Leistungsgrenze. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Kriterien festgelegt:

- Reibmomentschwankungen mit einer Schwingbreite von ca. 10 % von Sollwert
- Abfall des Reibwert $\Delta\mu$ um 10% auf Lastniveau zwischen V1 und V4
- Abfall des Reibwerts $\Delta\mu$ um 10% auf Referenzniveau zwischen V1 und V4

Die maximal zulässige Reibwertdifferenz ($\Delta\mu$, Reibwertabfall) wurde bei Papier- und bei sintermetallischen Reibbelägen auf 10 %, entsprechend der folgenden Gleichung festgelegt:

$$\Delta\mu = \left| \frac{\mu_1 - \mu_4}{\mu_1} \right| \leq 0,1 \quad (3)$$

μ_1 : Reibwert bei dem Versuch V1 (siehe Bild 26)

μ_4 : Reibwert bei dem Versuch Wiederholungsversuch V4 (siehe Bild 26)

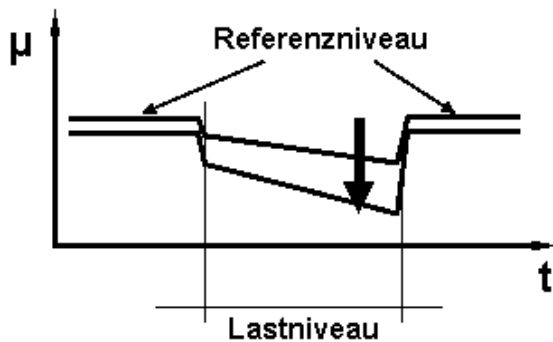


Bild 22: Reibwertabfall auf Lastniveau

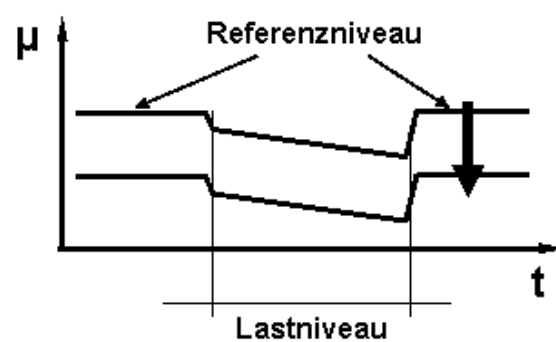


Bild 23: Reibwertabfall auf Referenzniveau

Der Reibwert, die maximale auftretende Reibleistung P_R , die spezifische Reibleistung q_p und die mittlere Gleitgeschwindigkeit wurden über folgende Zusammenhänge ermittelt:

$$\mu = \frac{|T_r|}{F_a \cdot r_m \cdot z} \quad (4)$$

$$r_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \quad (5)$$

$$P_r = T_r(t) \cdot [n_{an}(t) - n_{ab}(t)] \cdot \frac{\pi}{30} \quad (6)$$

$$q_p(t) = \frac{P_r(t)}{A_r \cdot z} \quad (7)$$

$$v_{gl} = \frac{\pi}{30} \cdot [n_{an} - n_{ab}] \cdot r_m \quad (8)$$

6.1.2 Versuchsablauf

Referenzversuchsbedingung

Für alle Versuchsreihen wurde ein Referenzniveau R festgelegt. Ziel dieser Festlegung ist es, das Reibwertverhalten unter konstanten Betriebsbedingungen zu beobachten bzw. auf diese zu beziehen. Hiermit wird ein Bezugspunkt für die Beurteilung der Veränderungen des Reibverhaltens definiert.

Auf Referenzniveau werden folgende Parameter für die Lamellenbaugröße I eingestellt:

- $n_s = 45$ U/min
- $T_r = 60$ Nm

Bei allen Versuchen wurde die Einspritztemperatur auf $T_{\text{Öl, zu}} = 80$ °C geregelt.

Kühlölspülung und Einlaufprozedur

Neu eingebaute Lamellenpakete wurden im Prüfstand zuerst mit einer auf 80 °C geregelten Vorlauftemperatur des Kühlöls über den Zeitraum von einer Stunde gespült. Um das eingespritzte Öl gleichmäßig auf die Lamellen zu verteilen, wird während der Spülprozedur das offene Kupplungspaket mit einer Drehzahl (Innenlamellen und Außenlamellen) von $n = 10$ U/min bewegt. Zur Schaffung konstanter Ausgangsbedingung für jeden Versuch, wird das eingebaute Lamellenpaket einer Einlaufprozedur unterzogen. Die Einlaufprozedur umfasst 100 Schaltungen bei einer spezifischen Reibleistung von jeweils 1 W/mm² und einer spezifischen Reibarbeit von jeweils $0,5$ J/mm².

6.1.3 Typisches Reibwertverhalten an der Leistungsgrenze

Bild 24 zeigt einen typischen Reibwert- und Temperaturverlauf eines Versuchs V1 an der parameterspezifischen Leistungsgrenze. Für den Versuch wurde ein Papierreibbelag mit gruppenparallelem Nutbild eingesetzt. Der spezifische Kühlölvolumenstrom wurde auf 1 mm³/mm²/s eingestellt. Der Reibwert auf dem Referenzniveau vor der Laststufe ist stabil. Mit der Erhöhung der spezifischen Leistungsparameter auf die Laststufe fällt der Reibwert ab. Nach ca. 20 min. sinkt der Reibwert um ca. 11 % ab. Bei erneutem Einstellen der spezifischen Leistungsparameter auf Referenzniveau stabilisiert sich der Reibwert auf deutlich erhöhtem Niveau.

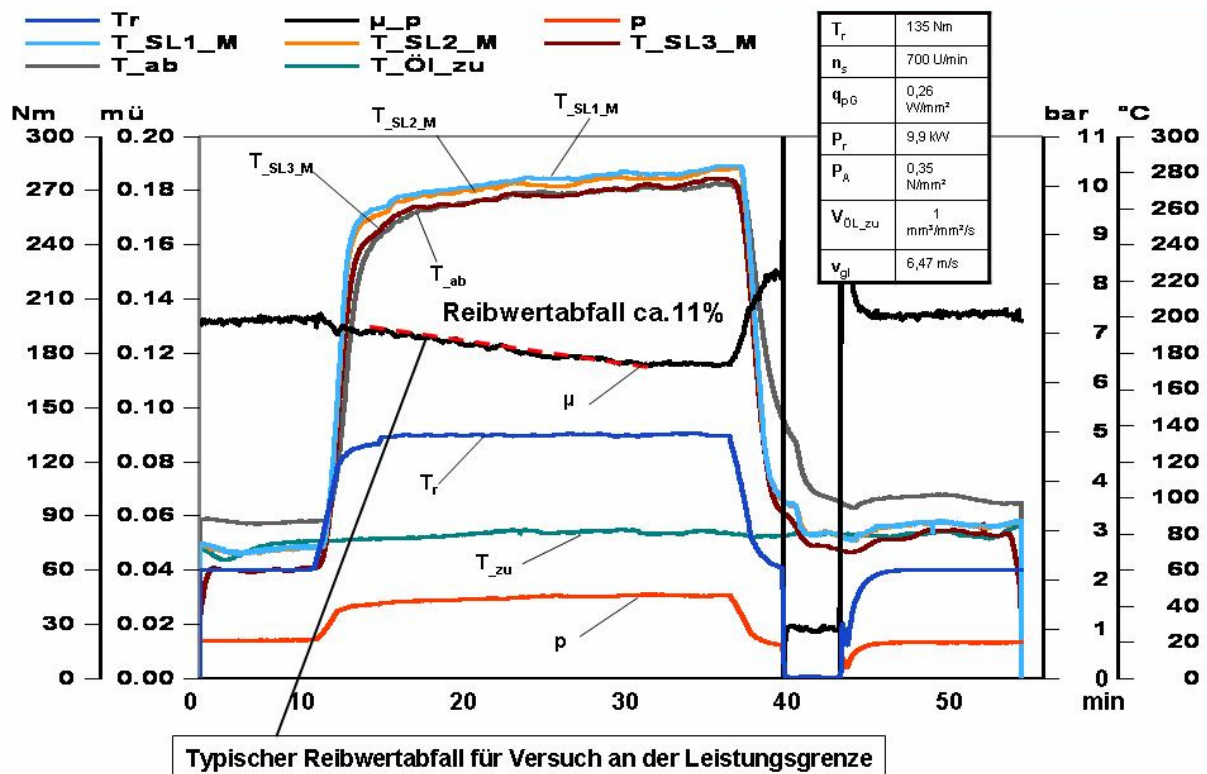


Bild 24: Reibwert- und Temperaturverlauf an der Leistungsgrenze im Versuch V1 (exemplarisch)

Gemäß der vorgestellten Versuchsmethodik werden dem im Bild 24 gezeigten Versuch nachfolgend, die Versuche V2 und V3 entlang der Linie konstanter Leistung abgefahren. Schließlich wird der Wiederholungsversuch V4 durchgeführt. Im Bild 25 werden der Reibwert- und der Temperaturverlauf während des Wiederholversuchs V4 dargestellt. Der Reibwert fällt hier innerhalb der Laststufe deutlich weniger ab, das aber insgesamt deutlich niedriger als in Versuch V1. Der Reibwert im V4 fällt nicht so stark ab, als im Vergleich mit dem V1. Der Reibbelag wird geglättet (man spricht hier von Verglasen des Papierbelags) und dadurch kommt es zu einem verschlechterten Reibwert bei V4. An Hand der beiden Versuche V1 und des Wiederholungsversuch V4 wurden hier die Abbruchkriterien überprüft. Hierzu wird der Reibwert innerhalb der letzten 20 % der Versuchsdauer in der Laststufe vergleichend ausgewertet (Bild 26). Mit diesem Lamellenpaket (B3_KB) wurde somit eine spezifische Leistungsgrenze von $q_{pG} = 0,27 \text{ W/mm}^2$ ermittelt. Da diese Abbruchkriterin bei dieser Leistung in den gezeigten Versuch (Bild 24-Bild 26) erreicht werden.

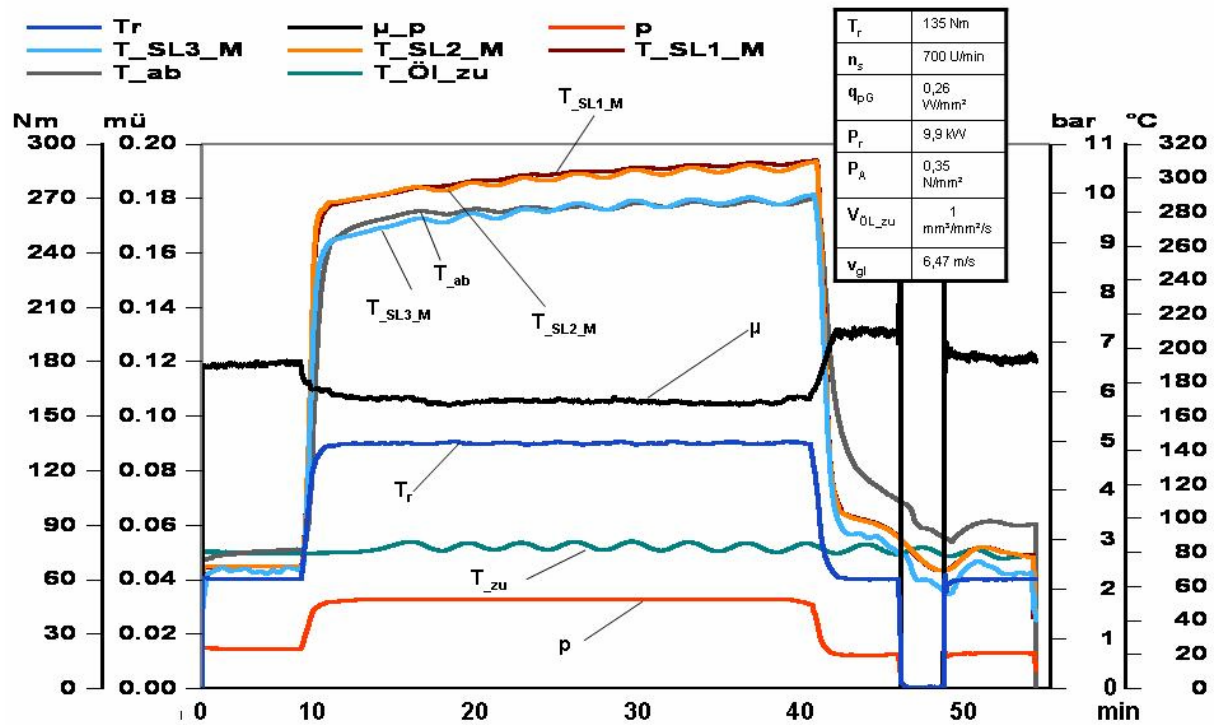


Bild 25: Reibwert- und Temperaturverlauf an der Leistungsgrenze im Versuch V4 (exemplarisch)

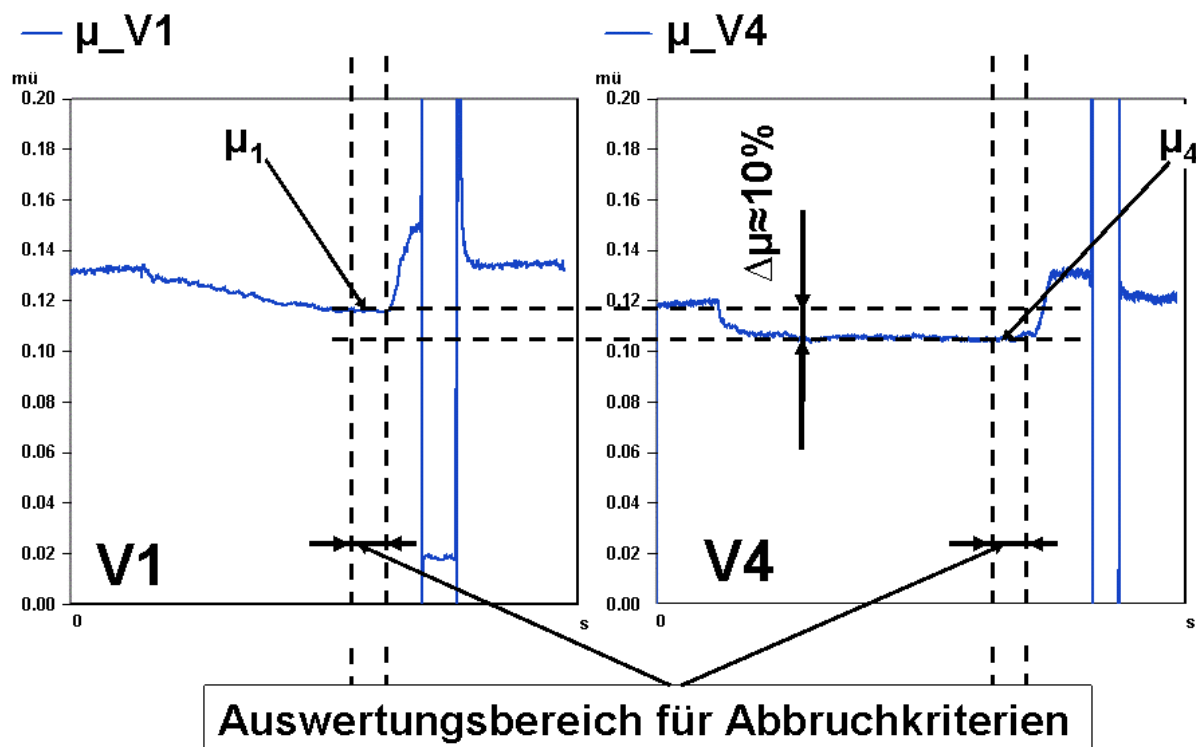


Bild 26: Vergleichende Auswertung des Reibwert zwischen V1 und V4

Bild 27 zeigt das in dem oben beschriebenen Versuch eingesetzte Lamellenpaket. Es sind sowohl die Stahl- als auch die Innenlamellen abgebildet. Links im Bild sieht man die

kolbenseitig zuerst eingebauten Innenlamellen, die erste Reibfläche ist hierbei einbaubedingt nicht aktiv.

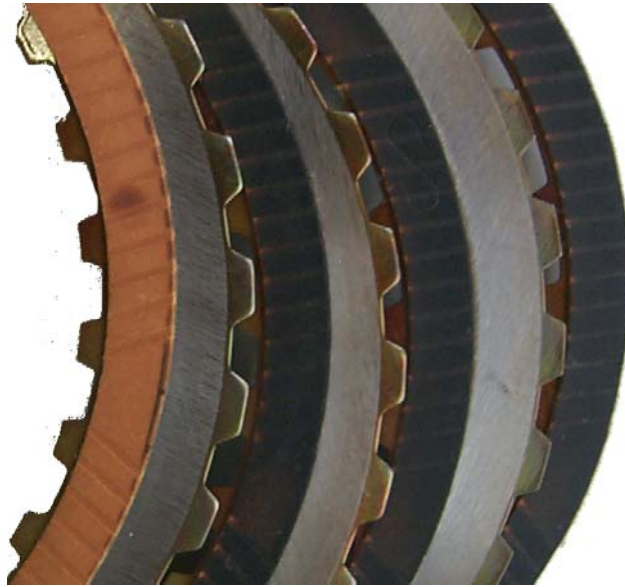


Bild 27: An der Leistungsgrenze betriebenes Lamellenpaket

6.1.4 Typisches Reibwertverhalten oberhalb der Leistungsgrenze

Um den Reibwertverlauf oberhalb der spezifischen Leistungsgrenze beobachten zu können, wurden auch Versuche oberhalb der spezifischen Leistungsgrenze durchgeführt. Im Bild 29 ist ein solcher typischer Versuch dargestellt. Für diesen Versuch V1 wurde ein Papierreibbelag mit gruppenparalleler Nutung eingesetzt. Der spezifische Kühllölvolumenstrom wurde auf $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt. Bei diesem Versuch wurde eine spezifische Reibleistung von $q_p = 0,321 \text{ W}/\text{mm}^2$ gefahren, das sind etwa 20% mehr als es der Leistungsgrenze unter dieser Randbedingungen entspricht.

Bild 29 zeigt den charakteristischen Verlauf des Reibwerts bei einer überschrittenen Reibleistungsgrenze. Der Reibwert fällt innerhalb der relativ kurzen Zeitspanne von ca. einer Minute in der Laststufe um 12 % ab. Nach einer kurzen Phase (ca. drei Minuten) schwingt das System mit der Amplitude ca. 7 Nm. Die Temperatur auf den Stahllamellen steigt innerhalb von 70 s von ca. $300 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $640 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Lamellenpaket wurde nach der Untersuchung ausgebaut und begutachtet. Es wurde ein höherer Verschleiß beobachtet, als bei den Lamellen die unterhalb der Leistungsgrenze betrieben wurden. Die Ablauftemperatur, die direkt unter dem Lamellenpaket erfasst wird, sinkt rasch ab. Ein großer Anteil der Wärme wurde vom Öl durch Verdampfung aufgenommen. Weiterhin wurde ein sehr starker Önebel im Bereich des Prüfkopfes beobachtet. Die Oberfläche des Reibbelags ist geglättet. Es zeigen sich Risse und beginnende Ausbröckelungen in der Struktur des organischen Materials. Eine Erhärtung und verminderte Ölaufnahmefähigkeit des Belags bewirken ein verändertes Reibverhalten. Die Lamellen wurden innerhalb der kurzen Zeit stark beschädigt (siehe Bild 28).



Bild 28: Durchgebrannten Lamellen nach thermischer Überlastung „Oberhalb der Leistungsgrenze“

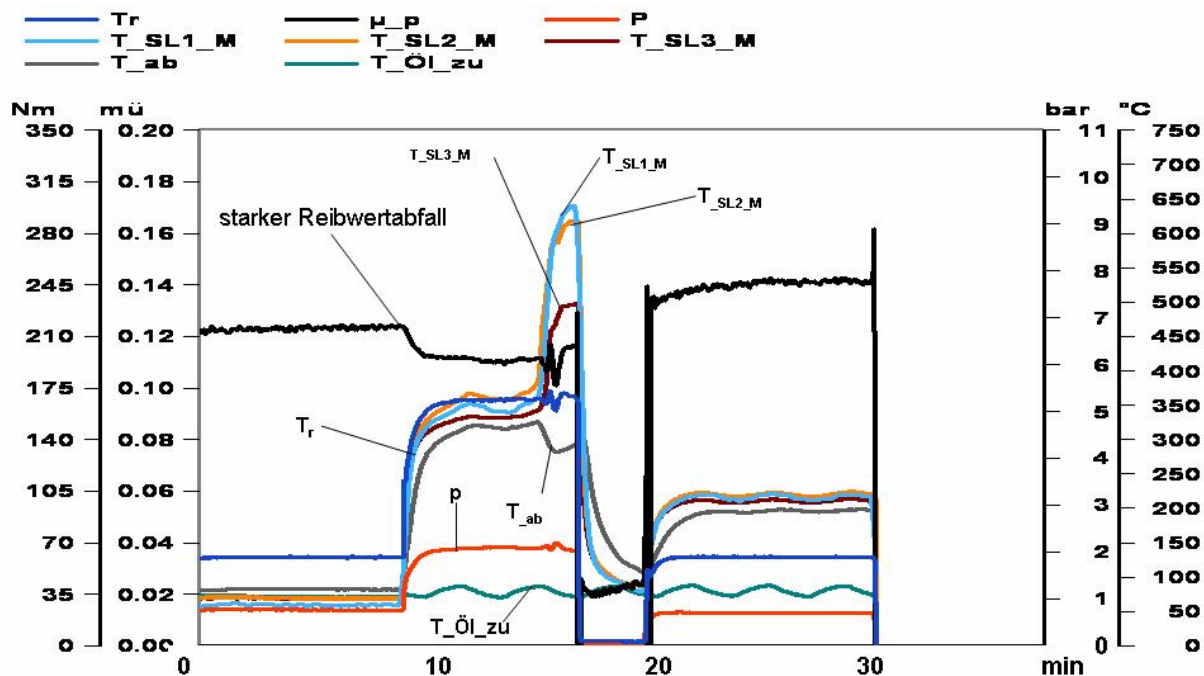


Bild 29: Reibwert- und Temperaturverlauf oberhalb der Leistungsgrenze im Versuch V1

6.1.5 Typisches Reibwertverhalten unterhalb der Leistungsgrenze

Bild 30 stellt die charakteristischen Reibwert- und Temperaturverläufe eines Lamellenpakets unterhalb der Leistungsgrenze bei V3 dar. Für den Versuch V3 wurde ein Papierreibbelag mit gruppenparalleler Nutung eingesetzt. Der spezifische Kühllölvolumenstrom wurde auf $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt. Bei dem Versuch wurde eine spezifische Reibleistung $q_p = 0,247 \text{ W}/\text{mm}^2$ gefahren, das ist ca. 8 % unterhalb der spezifischen Leistungsgrenze.

Der Reibwertverlauf in der Laststufe sinkt innerhalb der ersten 13 min um 4 % und stabilisiert sich danach. Der stabilisierte Reibwertverlauf lässt vermuten, dass das tribologische System nicht geschädigt wurde. Eine spätere Untersuchung der Lamellen bestätigte dies (siehe

Bild 31). Weiterhin wurden parallel zur geregelten Einspritztemperaturschwankung (T_{zu}) leichte Stahllamellentemperaturschwankungen beobachtet.

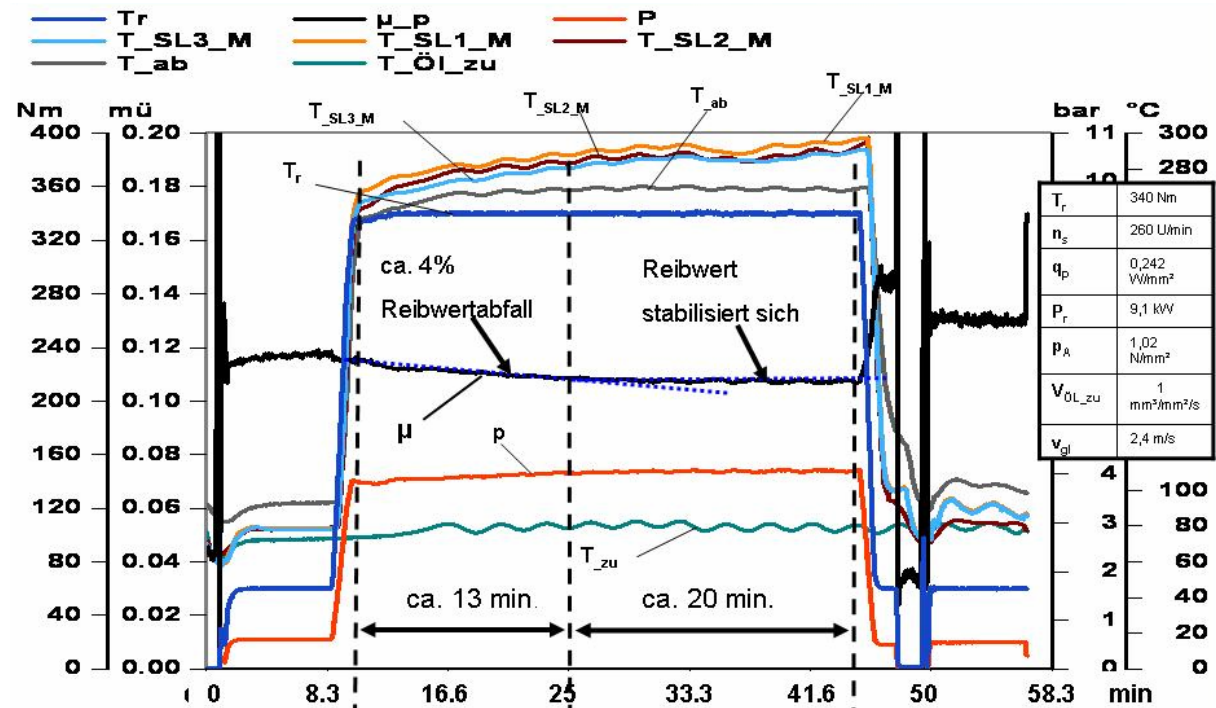


Bild 30: Reibwert- und Temperaturverlauf unterhalb der Leistungsgrenze im Versuch V3



Bild 31: unterhalb der Leistungsgrenze beanspruchtes Lamellenpaket im Versuch V3

6.1.6 Typische Veränderung der Oberflächentopographie bei Überschreitung der Leistungsgrenze (Papierreibbeläge)

Durch die Kooperation mit den Herstellern der Lamellen (BorgWarner) und des Öles (ÖI_AI) war es möglich, von den Herstellern selbst eine Begutachtung zweier Lamellenpakete (BW1, BW2) mit dem Nutbild Radial und den dazugehörigen Ölproben durchführen zu lassen. Bei den Versuchen wurde ein spezifischer Kühlölstrom von 0,5 mm³/mm²/s eingestellt. Bei BW1 wurde mit einer spezifischen Leistungsgrenze von maximal $q_p = 0,15$ W/mm² d.h. unterhalb der spezifischen Leistungsgrenze und bei BW2 mit einer spezifischen Reibleistung von 0,2 W/mm² gefahren. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Begutachtung

Zusammengestellt. Die beiden begutachteten Lamellenpakete zeigten ein unterschiedliches thermisches und mechanisches Beanspruchungsbild. Bild 32 zeigt eine stereomikroskopische Aufnahme⁵² (SMA) der Reibbelagoberflächen. Hier ist eine unterhalb der Leistungsgrenze belastete Reibbelaglamelle einer überlasteten Reiblamelle (BW2) gegenübergestellt. Bild 33 (rechts) zeigt da durch die hohe thermische Belastung eine geglättete Oberfläche, man spricht vom „Verglasen“. Dabei wird die Belagoberfläche durch unterschiedliche Substanzen (aus Öl, Belagabrieb, etc.) zugesetzt. Auf Grund nicht ausreichender mechanischer Festigkeit des Belages oder Belagdichteschwankungen treten Materialermüdung und Belagausbrüchen auf. Es wurde bei diesen Belaglamellen ein sehr hoher Verschleiß beobachtet. Bild 32 (links) zeigt eine nicht beeinträchtigte Belagoberfläche aus dem Versuch BW1 unterhalb der spezifischen Leistungsgrenze.

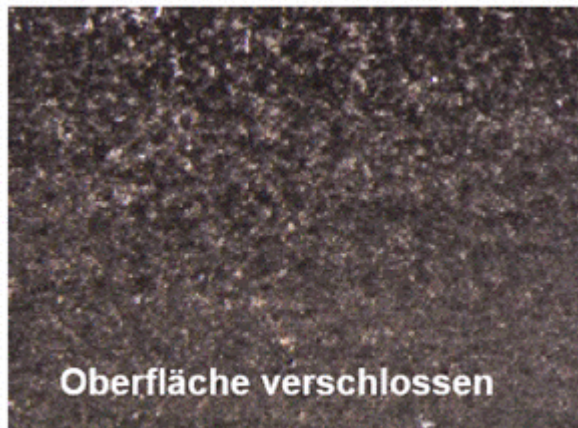
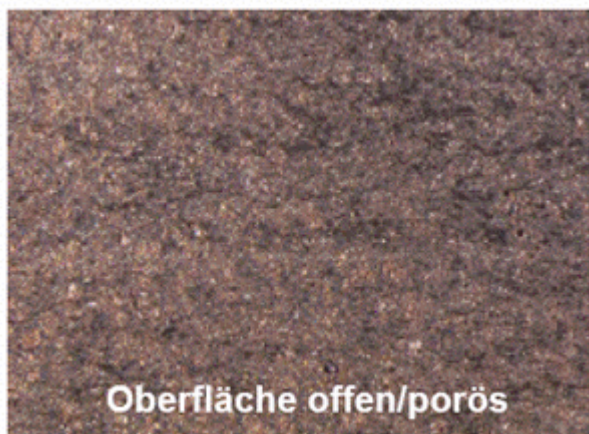
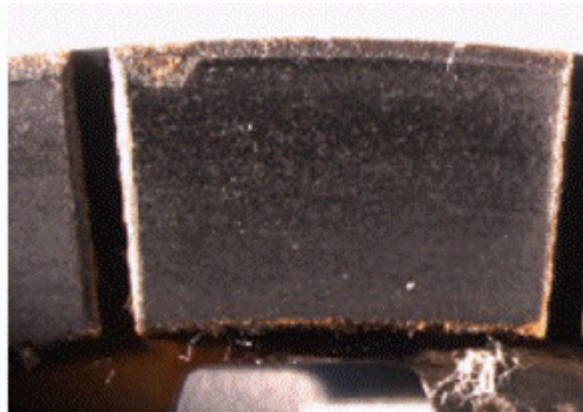
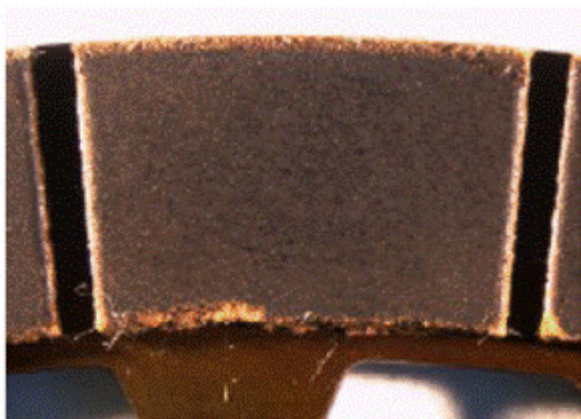


Bild 32: SMA Aufnahme_ Leistungsgrenze nicht überschritten (BW1)

Bild 33: SMA Aufnahme_ Leistungsgrenze überschritten (BW2)

Um die Porosität der untersuchten Lamellen zu überprüfen, wurde das Ölabsorptionsverhalten durch einen Öltropfentest⁵³ vergleichend untersucht. Bild 34 zeigt, dass das Probenöl der Lamellen, welche oberhalb der Leistungsgrenze betrieben wurden,

⁵² BorgWarner Transmission Systems GmbH.

⁵³ BorgWarner Transmission Systems GmbH 2004

langsamer absorbiert wird, als das Öl der Lamellen, welche nach der hier zu Grunde liegenden Definition in einem Bereich unterhalb der Leistungsgrenze betrieben wurden. Eine Erklärung hierfür ist der Verschluss der Poren im Reibbelag durch verkoktes Öl.

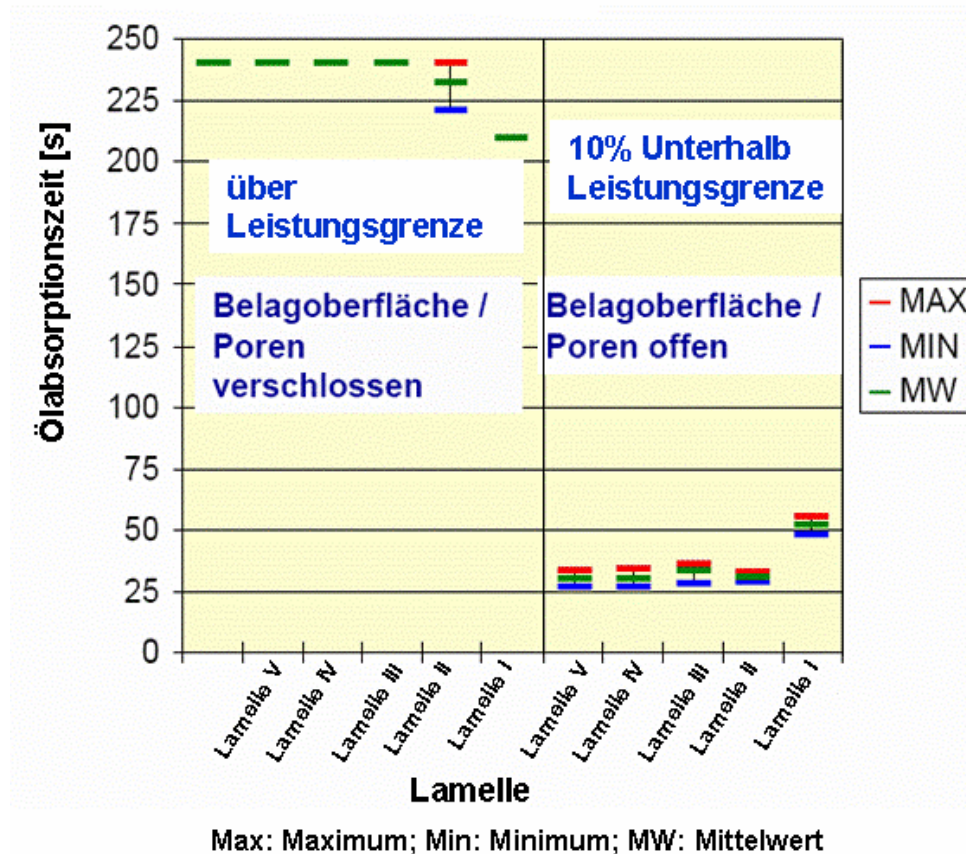


Bild 34: Absorptionsverhalten das BW1 und BW2 (Öltropfentest)⁵⁴

6.1.7 Typische Temperaturmessungen an der Stahllamelle für Baugröße I

Die reibflächennahe Temperaturmessung wird über 0,5 mm starke Mantelthermoelemente, welche radial von außen in die Stahllamelle eingebracht werden, realisiert (siehe Bild 35). Die Messung erfolgt hierbei auf Höhe des mittleren Reibradius. Weiterhin werden die Mantelthermoelemente direkt unter der Reibfläche (0,1mm) eingebettet, so wird gewährleistet, dass die Ansprechzeit bei der Temperaturerfassung so kurz wie möglich ist. Es wurde jeweils von der Kolbenseite aus gesehenen die erste, die mittlere und die letzte Stahllamelle appliziert.

Die Thermoelemente wurden um 120° voneinander versetzt eingebaut. Weitere Temperaturmessungen werden direkt an dem aus dem Lamellenpaket abfließenden Öl, am Zu- und Ablauf des Schmieröls, sowie am Zulauf zur Ölbrause vorgenommen.

⁵⁴ BorgWarner Transmission Systems GmbH 2004

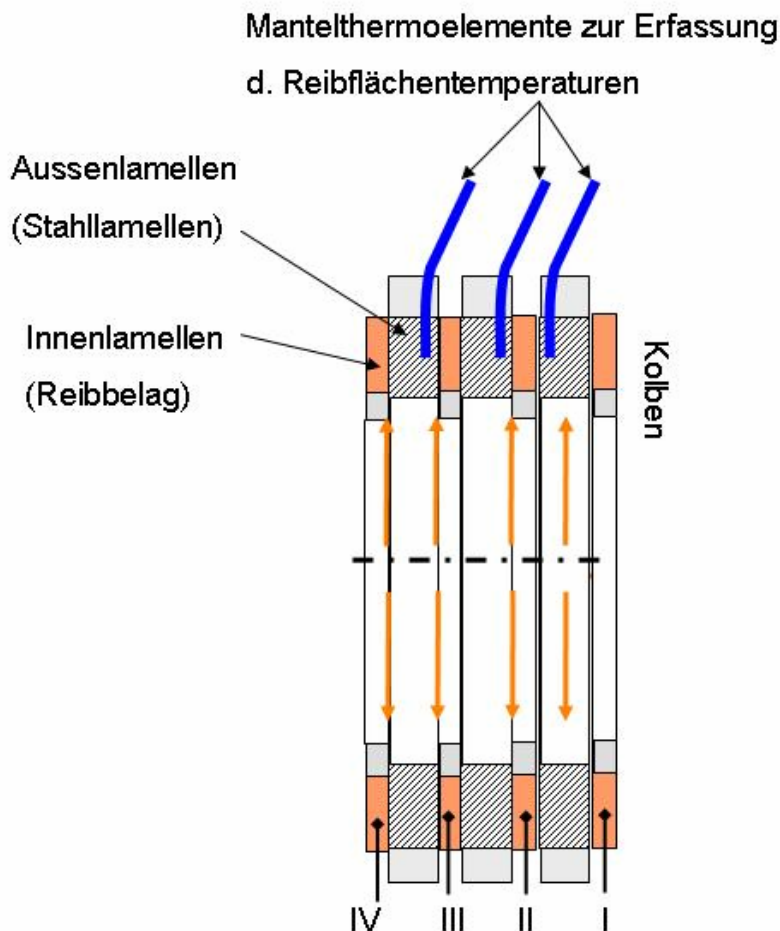


Bild 35: Applikation der Thermoelemente in den Lamellen

Die Auswertung der erfassten Stahllamellentemperaturen erfolgt in der Laststufe (Beharrungstemperatur) nach 90% der Versuchsdauer (siehe Bild 37) durch Mittelwertbildung der drei Temperatursignale.

Bild 36 zeigt eine typische Temperatursauswertung dreier Lamellenpakete entlang der Leistungsgrenze. Unter Angabe der jeweils ermittelten Flächenpressung wird die Temperatur für jedes Lamellenpaket der vier Versuche V1, V2, V3 und dem Wiederholungsversuch V4 entlang der Leistungsgrenze über den variierten Einflussparameter (z.B. Ölvolumenstrom, Nutbild, Reifflächenanzahl) aufgetragen. In Bild 36 ist die Temperatur über dem Ölvolumenstrom und der mittleren Gleitgeschwindigkeit aufgetragen, wobei hier z. B. die spezifischen Ölvolumenströme $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$, $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ und $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt wurden.

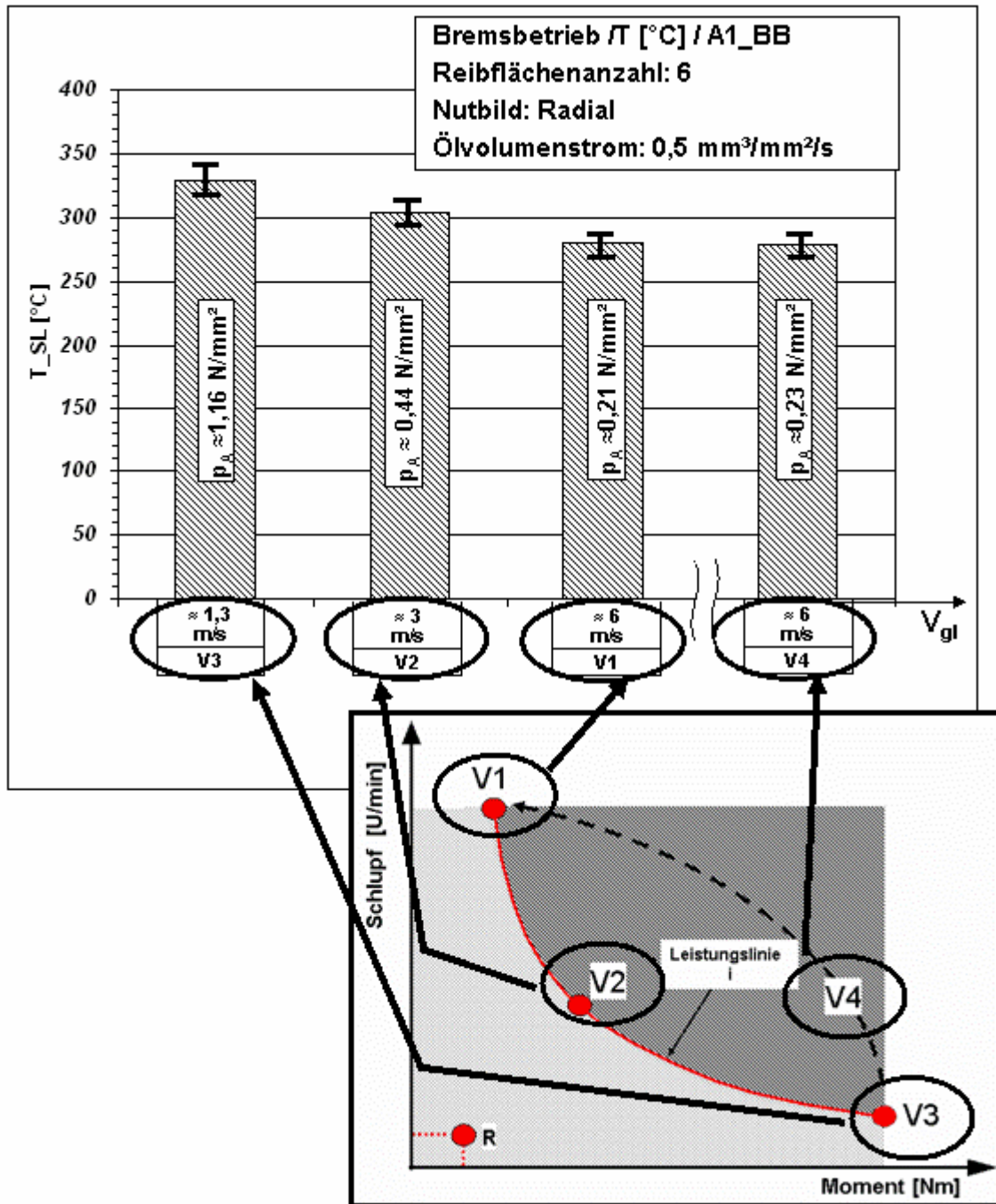


Bild 36: Typische Stahllamellentemperaturen eines Lamellenpakets an der Leistungsgrenze

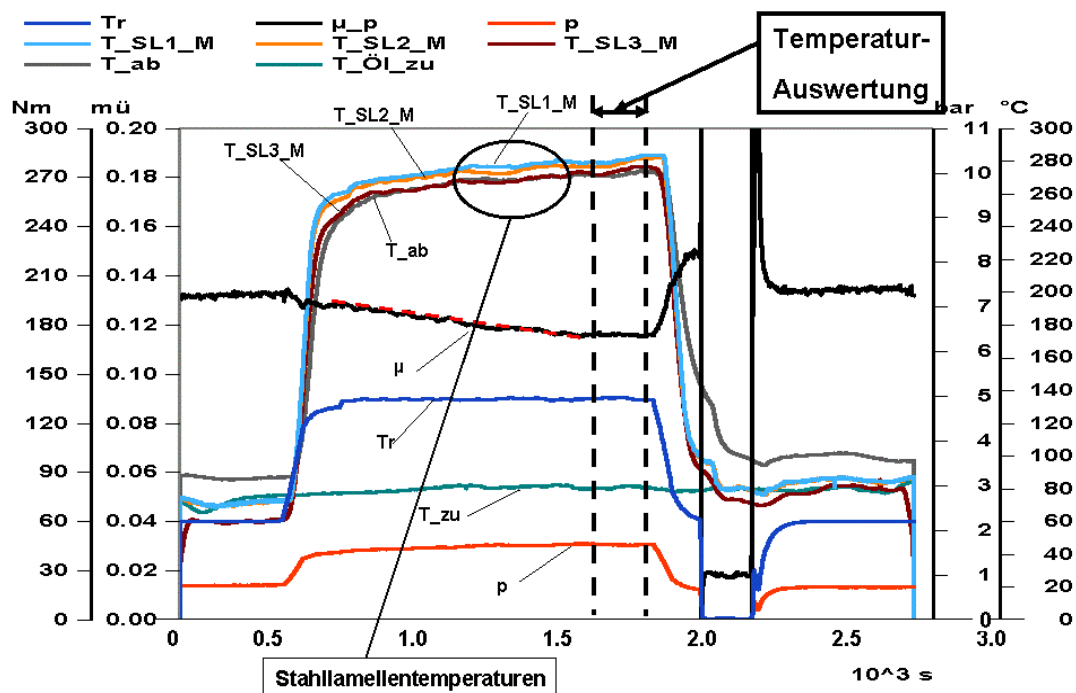


Bild 37: Auswertung der Stahllamellentemperaturen eines Lamellenpakets

6.2 Versuchsauswertung Sinterbelag

6.2.1 Definition der Abbruchkriterien

- Reibmomentschwankungen mit einer Schwingbreite von ca. 10 % von Sollwert
- Abfall des Reibwert um 10% auf Lastniveau zwischen V1 und V3
- Abfall des Reibwerts um 10% auf Referenzniveau zwischen V1 und V3 (siehe Bild 22 und Bild 23)

6.2.2 Versuchsablauf

Referenzversuchsbedingung

Für alle Versuchsreihen wurde ein Referenzniveau R festgelegt. Auf Referenzniveau werden für die Lamellenbaugröße II folgende Parameter eingestellt:

- $n_s = 35$ U/min
- $T_r = 135$ Nm

Bei allen Versuchen wurde die Einspritztemperatur auf $T_{\text{Öl_zu}} = 80^\circ\text{C}$ geregelt.

Einlaufprozedur

Bei einem im Prüfstand neu eingebauten Lamellenpaket wird zuerst das Lamellenpaket mit einer geregelten Einspritztemperatur von 80°C für die Dauer von 30 Minuten gespült. Um das eingespritzte Öl gleichmäßig auf die Lamellen zu verteilen, wird während der Spülprozedur eine Drehzahl (Innenlamellen und Außenlamellen) von $n = 10$ U/min eingestellt. Zur Schaffung konstanter Ausgangsbedingungen wird vor jedem Versuch das eingebaute

Lamellenpaket einer Einlaufprozedur unterzogen. Die Einlaufprozedur umfasst 150 Schaltungen bei der spezifischen Reibleistung von $0,16 \text{ W/mm}^2$ und einer spezifischen Reibarbeit von $0,8 \text{ J/mm}^2$.

6.2.3 Typische Temperaturmessung im Kupplungspaket, Messort und typische Ergebnisse für Sinterbeläge (Baugröße II)

Ein Sinterlamellenpaket (Baugröße II) besteht hier typischerweise aus zwei Stahllamellen (Außenlamellen) und drei Sinterlamellen (Innenlamellen). Hierdurch wird gewährleistet, dass die mittlere Innenlamelle von beiden Seiten gleichmäßig thermisch beansprucht wird.

Die Temperaturmessung erfolgt durch die Mantelthermoelemente die in die Stahllamellen eingebettet sind. In Vorversuchen wurde die Temperatur in beiden Stahllamellen gemessen, hierbei wurde kein Temperaturunterschied beobachtet. Deshalb wurde zum Vergleich die Temperatur in der dem Kolben zugewandte Stahllamelle (Index 1) in drei verschiedenen radialen Tiefen ca. $0,1 \text{ mm}$ unterhalb der Reibfläche erfasst (Bild 38). Die Temperaturmessung in drei verschiedenen Tiefen hat gezeigt, dass das Temperaturverhalten und der Temperaturverlauf jeweils unterschiedlich sind. Um diesen Effekt genau zu beobachten, wurden für Baugröße II ausschließlich diese drei Temperaturen in drei verschiedenen Tiefen erfasst.

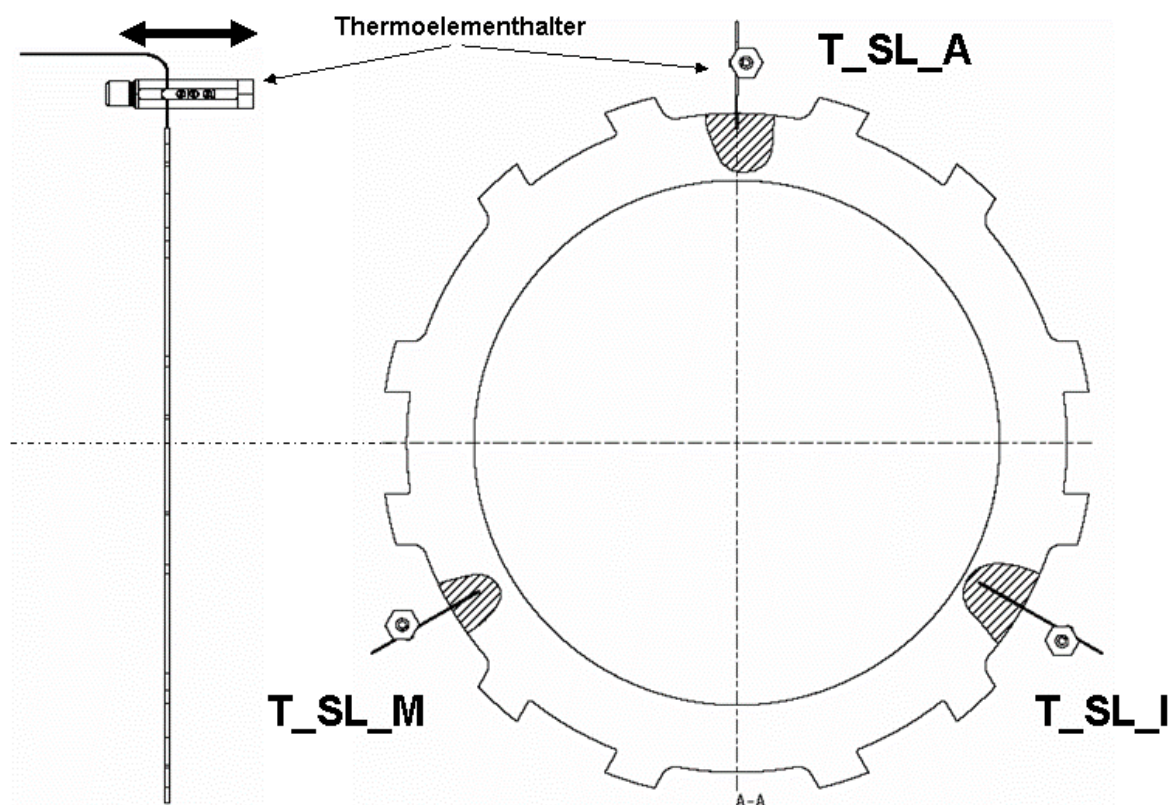


Bild 38: gebohrte Stahllamelle für Temperaturmessung Sinterbelag (Baugröße II)

Die radiale Bohrtiefe wurde für die drei Temperaturmessstellen, die jeweils um 120° gegeneinander versetzt sind, ausgehend vom Außendurchmesser, wie folgt abgestuft: Außentemperatur (T_{SL_A}) in 6 mm , die mittlere Temperatur (T_{SL_M}) in 13 mm und die

Innentemperatur (T_{SL_I}) in 20 mm Tiefe. Die Messstelle des jeweiligen Thermoelements wird hierbei in die Bohrung eingeführt und mit einer dafür entwickelten, axial beweglichen Befestigungsvorrichtung fixiert.

Die Auswertung der erfassten Stahllamellentemperaturen erfolgt in der Laststufe (Beharrungstemperatur) nach 90% der Versuchsdauer (siehe Bild 37) durch Mittelwertbildung der drei (T_{SL_A} ; T_{SL_M} ; T_{SL_I}) Temperatursignale.

6.2.4 Reibwertverhalten unterhalb der Leistungsgrenze (Bereich A und B)

Gemäß der erweiterten Versuchsmethodik für Sinterbeläge BL5 (siehe Bild 18) werden drei Bereiche bei der Untersuchung ermittelt. Der Bereich A (reibwertstabil) und der Bereich B (quasi reibwertstabil) liegen unterhalb der spezifisch maximal ertragbaren Reibleistung q_{pG} gemäß den definierten Abbruchkriterien. Im Bereich A bleibt das System stabil, d.h. in diesem Bereich fällt der Reibwert nicht ab, und es treten keine Reibmoment- und Temperaturschwankungen auf. Im Bereich B sinkt der Reibwert leicht ab und es tritt eine Temperaturschwankung mit nahezu konstanter Amplitude auf. Bereich C wurde als kritischer Bereich bezeichnet, da hier starke Schwankungen des Reibwertes und der Temperatur, sowie ein starker Reibwertabfall beobachtet werden können. Die definierte Leistungsgrenze trennt die beiden Bereiche B und C.

Um den Reibwert-, Reibmoment- und Temperaturverlauf innerhalb der drei Bereiche exemplarisch dargestellt zu können werden, wurden gezielt drei Versuche „A“, „B“ und „C“ jeweils den Bereichen durchgeführt (Bild 39). Die drei Versuche wurden im Kupplungsbetrieb (KB) mit einem waffelgenuteten Reibbelag und einer Innenlamellendrehzahl von $n_{an} = 400$ U/min durchgeführt. Der spezifische Kühlölvolumenstrom betrug dabei $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$. Im folgenden sollen die Versuchsergebnisse kurz erläutert werden.

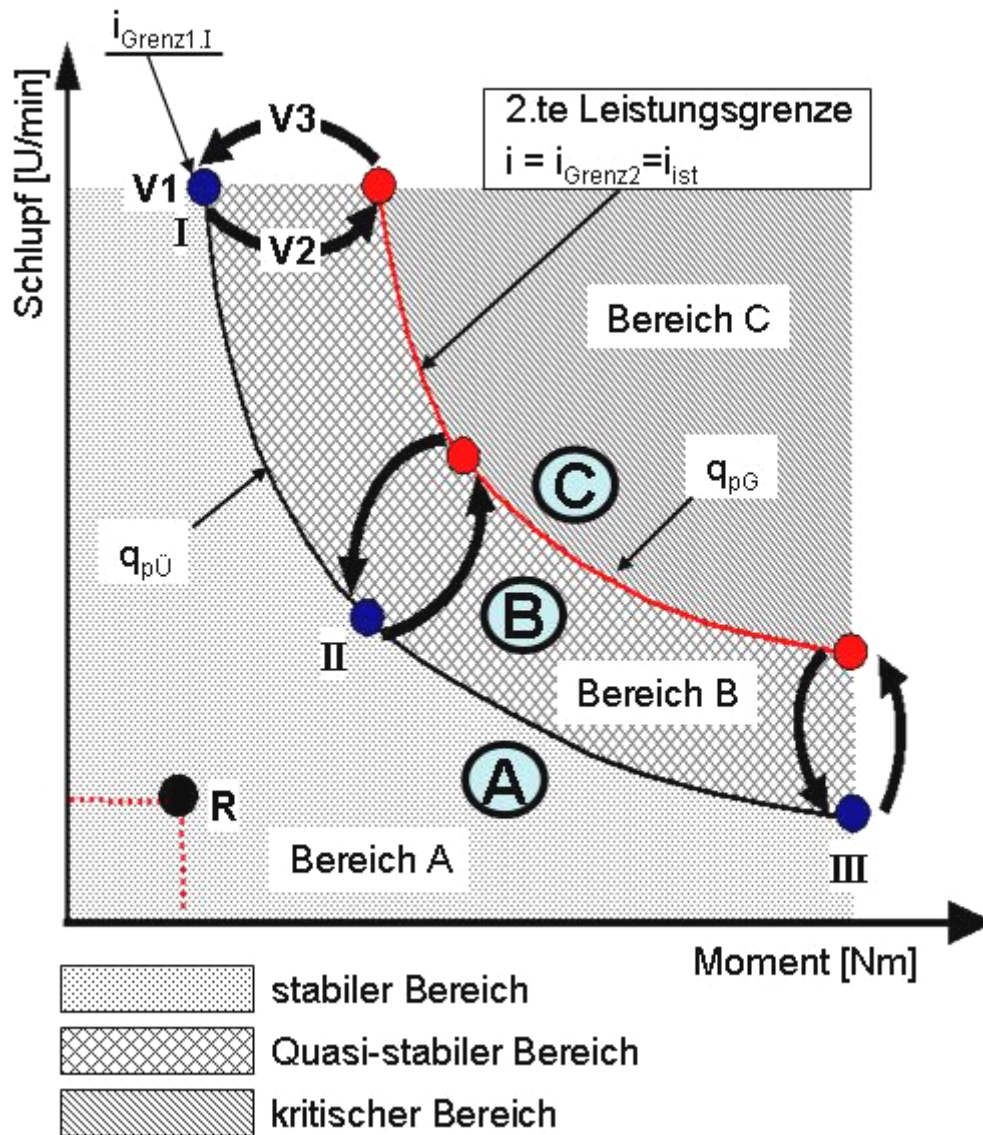


Bild 39: Versuche A, Versuch B und Versuch C (exemplarisch)

6.2.4.1 Reibwertverhalten im Bereich A

In Bild 40 werden die Temperaturen der Stahllamelle, der Reibwert und das Reibmoment dargestellt. Der Reibwert bleibt in der Laststufe konstant, wie auch die Temperatur und das Reibmoment. Die innere Temperatur (T_{SL_I}) zeigt im Vergleich mit der mittleren und der äußeren Temperatur relativ niedrige Werte. Das System kann stabil in Dauerschlepp betrieben werden.

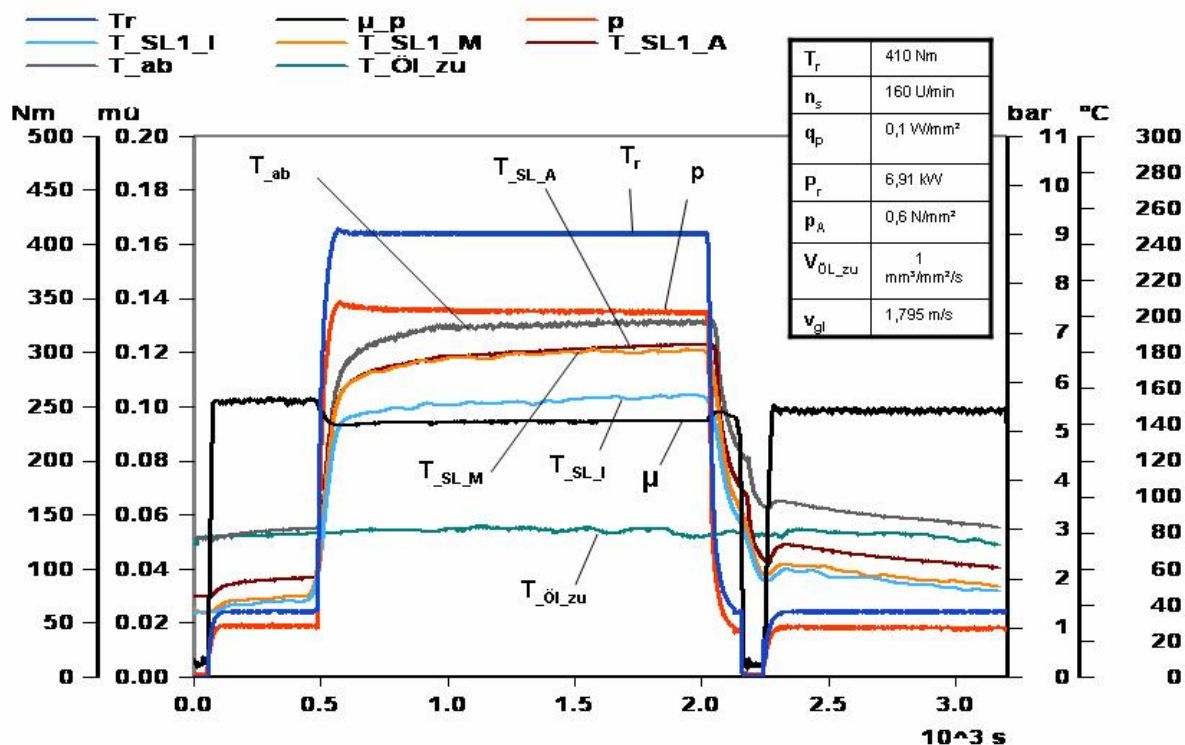


Bild 40: Messsignalverlauf in dem stabilem Bereich (Bereich A)

6.2.4.2 Reibwertverhalten im Bereich B

Das Durchmesser Verhältnis der Lamellenbaugröße II ist relativ groß im Vergleich mit der Lamellenbaugröße I. Durch die Reibung im Lamellenpaket entstehen bei höherer spezifischer Reibleistung hohe Temperaturen. Ein Teil der Wärme wird, im Gegensatz zum Papierbelag, auf die Sinterlamellen (Innenlamellen) übertragen und der Rest in die Stahllamellen.

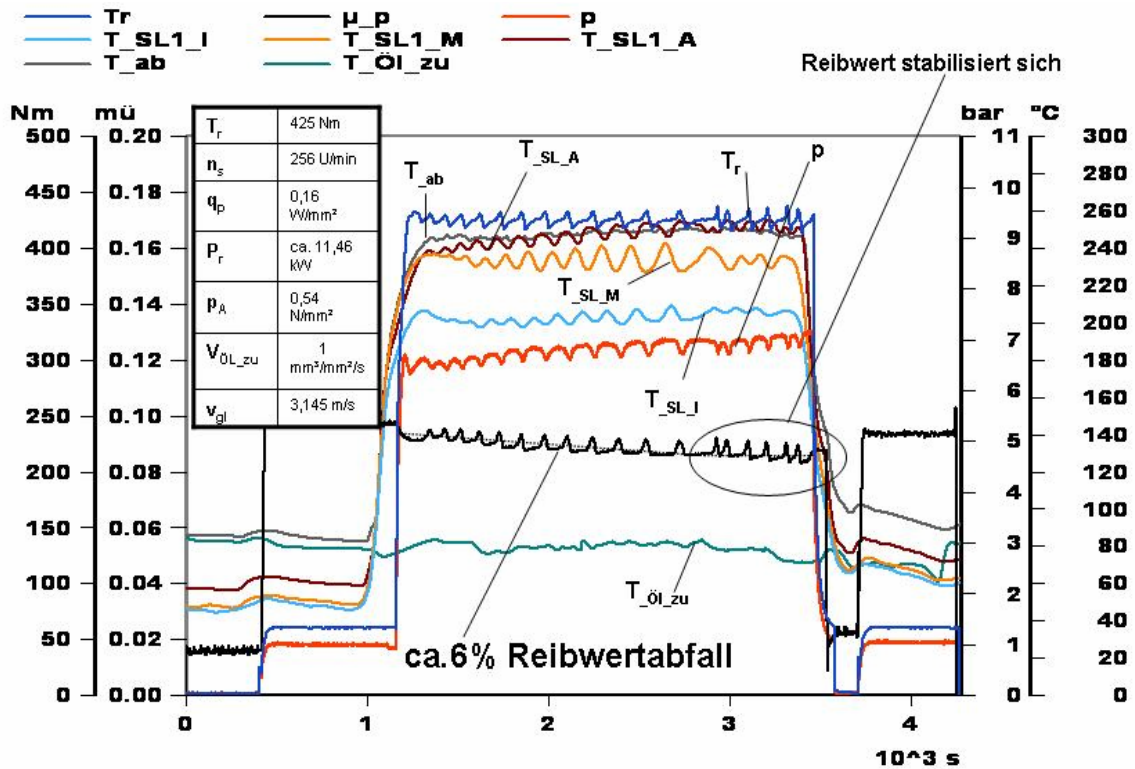


Bild 41: Messsignalverlauf in dem quasi stabilem Bereich (Bereich B)

Bild 41 zeigt einen charakteristischen Verlauf des Reibmomentes T_r , des Reibwertes und der Temperaturen der Stahl lamellen in der Laststufe des Versuchs „B“. Das System schwingt in dieser Laststufe mit einer nahezu konstanten Amplitude von ca. 7 Nm. Beobachtet man das mit den Temperaturen gemessene Moment, stellt man fest, dass der Momentverlauf mit der Temperaturkurve am äußeren Radius in Phase schwingt. Das bedeutet, dass wahrscheinlich der mittlere Reibradius der Reibpaarung sich ebenfalls periodisch verändert. Weiterhin fällt der Reibwert in dieser Laststufe kontinuierlich um ca. 6% ab, stabilisiert sich am Ende der Laststufe und bleibt dann konstant. Für den Versuch wurde eine spezifische Reibleistung von 0,16 W/mm² eingestellt.

6.2.5 Reibwertverhalten oberhalb der Leistungsgrenze (Bereich C)

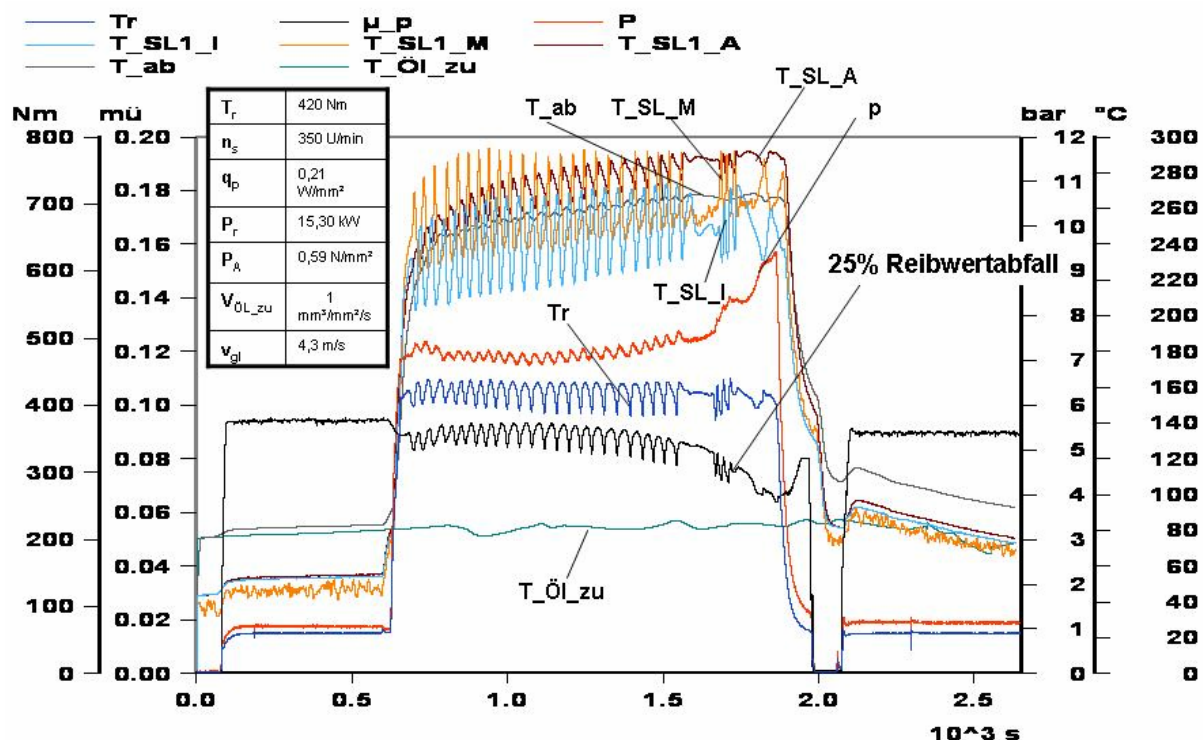


Bild 42: Messsignalverlauf im kritischen Bereich (Bereich C)

Bild 42 zeigt einen charakteristischen Verlauf des Reibmomentes, der Temperatur in den Stahlmellen sowie des Reibwertes mit starken Reibwertschwankungen in der Laststufe des Versuches „C“. Der Reibmomentenverlauf T_r in dieser Laststufe weist eine maximale Amplitude der Reibmomentenschwankung von etwa 20 Nm auf. Die Stahlmellentemperaturen schwingen in dieser Laststufe mit der Amplitude von ca. 35°C. Der periodisch schwankende Reibwert steigt am Anfang der Laststufe leicht an, gegen Ende der Laststufe sinkt der Reibwert innerhalb von fünf Minuten rasch um 25 % ab. Der Versuch wurde ca. 7% oberhalb der Leistungsgrenze im Bereich C mit $q_{pG} = 0.21 \text{ W/mm}^2$ durchgeführt.

7 Versuchsprogramm

Im Rahmen dieser Arbeit werden hauptsächlich zwei Reibbeläge untersucht, nämlich der organische Reibbelag (OB) mit der Lamellenbaugröße I und der Sinterbelag (SB) mit der Lamellenbaugröße II. Bezogen auf die praktische Anwendung werden für die Versuche mit dem organischen Reibbelag (OB) 6 aktive Reib- Wirkflächenpaare (drei Stahllamellen und vier Innenlamellen) eingesetzt. Eine Ausnahme bilden die Versuche, wo die Reibflächenanzahl variiert. Für Sinterbelag (SB) werden 4 aktive Reibflächen (zwei Stahllamellen und drei Innenlamellen) untersucht, da die vom Prüfstand dargestellten Reibmomente eine größere Reibflächenzahl nicht zulassen.

Im Bild 43 werden die einzelnen Einflussparameter, welche die zulässige Reibleistung P_r im Dauerschlupfbetrieb beeinflussen, dargestellt. Es wurde ein ausführliches Versuchsprogramm erstellt, welches in fünf Versuchsblöcke (A bis E) unterteilt wurde. Für jedes Lamellenpaket (Satz) wird eine Kurzbezeichnung unter Anlehnung an den jeweiligen Versuchsblock eingeführt (z.B. A_i , B_i $i = 1,2,3..$). Ebenso wurde eine Kurzbezeichnung für die Betriebsart festgelegt: Kupplungsbetrieb KB und Bremsbetrieb BB. So lautet z.B. die Abkürzung für einen Versuch aus Versuchsblock A im Kupplungsbetrieb A_i_KB .

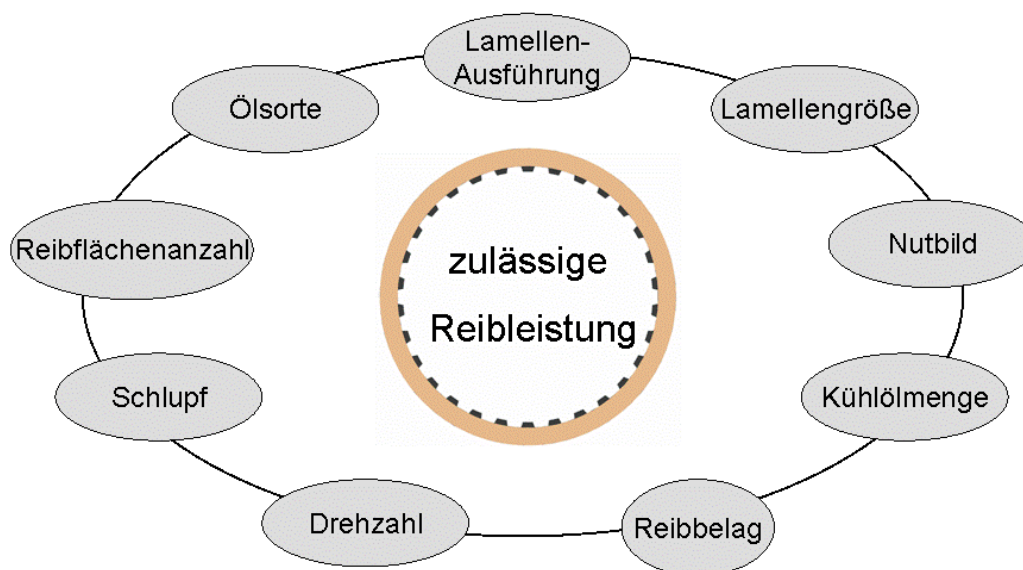


Bild 43: Untersuchte Einflussparameter

7.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Absolutdrehzahl (Innenlamellendrehzahl) und der Kühlölmenge

Bei Reibvorgängen, die sich über längere Zeit (d.h. Dauerschlupfbetrieb) erstrecken (z.B. Modulationskupplungen), spielt der Einfluß der Kühlölmenge und der Absolutdrehzahl (Innenlamellendrehzahl) n_{an} eine entscheidende Rolle. Die eingebrachte Wärmemenge muß über das Kühlöl abgeführt werden. Es stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein.

Um den Einfluss der Absolutdrehzahl n_{an} (Innenlamellendrehzahl) und der eingestellten spezifischen Kühlmenge im Dauerschlupfbetrieb auf die Leistungsgrenzen im Dauerschlupf zu ermitteln, werden die folgenden Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 5).

Für die Versuche, die im Versuchsblock A dargestellt ist, werden die drei spezifischen Kühlmengen $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$, $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ und $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt. Weiterhin wird die Ölsorte ÖL_A und der Belag BL1 (Papierbelag) für die Baugröße I eingesetzt. Für die Versuche im Versuchsblock A kommen plane Lamellen mit Radialnutung zum Einsatz. In Tabelle 5 sind die eingestellten Parameter aufgelistet. Hier werden beide Betriebsarten, Kupplungsbetrieb (KB) und Bremsbetrieb (BB) untersucht. Weiterhin wird die Differenzdrehzahl für beide Betriebsarten durch die drei Versuchspunkte V1, V2 und V3 variiert. Der maximale, eingestellte Schlupf $n_{s,max}$ im Kupplungsbetrieb (bei V1) beträgt 700 U/min bei einer Absolutdrehzahl von 800 U/min (Innenlamellendrehzahl, n_{an}). Im Bremsbetrieb (BB) wird ein maximale Schlupf von $n_{s,max} = 700 \text{ U/min}$ bei $n_{ab} = 0 \text{ U/min}$ (Außenlamellendrehzahl) eingestellt.

1. Versuchsblock A												
Kurzbezeichnung	$n_{an,max}$ [1/min]	$n_{ab,min}$ [1/min]	$n_{s,max}$ [1/min]	Kühllölvolumenstrom [$\text{mm}^3/\text{mm}^2\cdot\text{s}$]	Baugröße	Ölmenge im Tank [Liter]	Anzahl Innenlamellen	Anzahl Stahl- lamellen	Ölsorte	Lamellen- ausführung	Nutbild	Reibbelag
A1_BB	700	0	700	0,5	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
A2_KB	800	100	700	0,5	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
A4_BB	700	0	700	1	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
A5_KB	800	100	700	1	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
A7_BB	700	0	700	3	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
A8_KB	800	100	700	3	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier

vollfaktorielle Versuchsführung

Tabelle 5: Versuche zum Einfluss der Absolutdrehzahl n_{an} und der Kühlmenge

7.2 Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Nutbildes

Im Versuchsblock B wird der Einfluss des Nutbildes im Dauerschlupfbetrieb auf die die Leistungsgrenzen im Dauerschlupf untersucht. Tabelle 6 zeigt für die durchgeführten Versuche die eingestellten Parameter. Für die drei untersuchten Nutbilder Radial-, Kamm/Gruppenparallel-, sowie Waffelmuster wird ein spezifischer Kühllölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt. Das Schmieröl wird am Innendurchmesser drucklos zugeführt und über die Zentrifugalkraft der rotierenden Teile durch die Nutung in den Belaglamellen nach außen befördert. Im durchgeführten Kupplungsbetrieb (KB) wird ein maximaler Schlupf von $n_{s,max} = 700 \text{ U/min}$ bei dem Versuchspunkt V1 über die Bremsmaschine (Außenlamellendrehzahl, n_{ab}) eingestellt. Die maximale, eingeregelter Absolutdrehzahl (Innenlamellendrehzahl) n_{an} beträgt 800 U/min. Für den untersuchten Belag OB1 (Radialnutbild), Belag OB2 (Gruppenparallel) und Belag OB3 (Waffelmuster) wird die plane Lamellenausführung und die Ölsorte ÖL_A eingesetzt.

2. Versuchsblock B												
Kurzbezeichnung	$n_{an,max}$ [1/min]	$n_{ab,min}$ [1/min]	$n_{s,max}$ [1/min]	Kühlölvolumenstrom [mm ³ /mm ² ·s]	Baugröße	Ölmenge im Tank [Liter]	Anzahl Innenlamellen	Anzahl Stahl-lamellen	Ölsorte	Lamellen-ausführung	Nutbild	Reibbelag
B1_KB	800	100	700	1	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
B2_KB	800	100	700	1	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Waffel-muster	Papier
B3_KB	800	100	700	1	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Gruppen-parallel	Papier
vollfaktorielle Versuchsführung												

Tabelle 6: Versuche zum Einfluss des Nutbildes

7.3 Versuche zum Einfluss der Lamellenausführung (sinus / plan)

In der Praxis werden häufig Sinuslamellen verwendet. Im Gegensatz zu planen Lamellen gewährleisten die gewellten Sinuslamellen eine komfortable Schaltung, insbesondere beim Öffnen der Kupplung. Weiterhin wird bei der geöffneten Kupplung das erzeugte Schleppmoment durch Sinuswellung vermindert. Um den Einfluss der Lamellenausführung (sinus/plan) im Dauerschlupfbetrieb auf die Leistungsgrenzen im Dauerschlupf zu ermitteln, wurden für zwei Lamellenausführungen mit dem Belag OB1 (plan) und Belag OB4 (sinus) die in Tabelle 7 dargestellten Parameter in Versuchen gefahren. Bei den unterschiedlich ausgeführten Lamellen handelt es sich hier um Belaglamellen (Innenlamellen). Beide Lamellenausführungen werden bei spezifischen Kühlölvolumenströmen von 0,5 mm³/mm²/s und die 3 mm³/mm²/s untersucht. Der maximale, eingestellte Schlupf $n_{s,max}$ bei V1 für den Kupplungsbetrieb (KB) bei einer konstanten Absolutdrehzahl (Innenlamellendrehzahl) von $n_{an} = 800$ U/min beträgt 700 U/min.

3. Versuchsblock C												
Kurzbezeichnung	$n_{an,max}$ [1/min]	$n_{ab,min}$ [1/min]	$n_{s,max}$ [1/min]	Kühlölvolumenstrom [mm ³ /mm ² ·s]	Baugröße	Ölmenge im Tank [Liter]	Anzahl Innenlamellen	Anzahl Stahl-lamellen	Ölsorte	Lamellen-ausführung	Nutbild	Reibbelag
C1_KB	800	100	700	0,5	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
C2_KB	800	100	700	0,5	I	8	4	3	ÖL_A	sinus	Radial	Papier
C3_KB	800	100	700	3	I	8	4	3	ÖL_A	plan	Radial	Papier
C4_KB	800	100	700	3	I	8	4	3	ÖL_A	sinus	Radial	Papier
vollfaktorielle Versuchsführung												

Tabelle 7: Versuche zum Einfluss der Lamellenausführung (sinus/plan)

7.4 Versuche zum Einfluss der Reibflächenanzahl und des Schmierstoffes

Im Versuchsblock D wurden der Einfluss der Reibflächenzahl sowie der Ölsorten im Dauerschlupfbetrieb auf die Leistungsgrenzen im Dauerschlupf untersucht. Für den Belag OB1 (Papierbelag) in planer Lamellenausführung wird der spezifische Kühlölvolumenstrom mit 1 mm³/mm²/s eingestellt. Für jeweils 4, 6, 8 und 10 aktive Wirkflächenpaare wird die Ölsorte ÖL_A eingesetzt. Um den Einfluss der Ölsorte auf die spezifische Reibleistung zu untersuchen, kommt bei 6 und 8 aktiven Wirkflächenpaaren die Ölsorte ÖL_B zum Einsatz. Tabelle 8 zeigt die eingestellten Parameter. Der maximale, eingestellte Schlupf $n_{s,max}$ bei V1 für den Kupplungsbetrieb (KB) beträgt 700 U/min bei einer für alle Versuche eingestellten Innenlamellendrehzahl von $n_{an} = 800$ U/min. Um die Flächenpressungsverteilung bzw. die

Reibmomentverteilung sowie den Verschleiß im Lamellenpakt zu beobachten, werden Stichversuche durchgeführt.

4. Versuchsblock D												
Kurzbezeichnung	$n_{an,max}$ [1/min]	$n_{ab,min}$ [1/min]	n_s,max [1/min]	Kühlölvolumenstrom [mm ³ /mm ² ·s]	Baugröße	Ölmenge im Tank [Liter]	Anzahl Innen- lamellen	Anzahl Stahl- lamellen	Ölsorte	Lamellen- ausführung	Nutbild	Reibbelag
D1_KB	800	100	700	1	I	8	3	2	ÖI_A	plan	Radial	Papier
D2_KB	800	100	700	1	I	8	4	3	ÖI_A	plan	Radial	Papier
D3_KB	800	100	700	1	I	8	5	4	ÖI_A	plan	Radial	Papier
D4_KB	800	100	700	1	I	8	6	5	ÖI_A	plan	Radial	Papier
D5_KB	800	100	700	1	I	8	4	3	ÖI_B	plan	Radial	Papier
D6_KB	800	100	700	1	I	8	5	4	ÖI_B	plan	Radial	Papier

teiffaktorielle Versuchsführung

Tabelle 8: Versuche zum Einfluss der Reibflächenanzahl und der Ölsorte

7.5 Versuche zum Einfluss der Reibpaarung

Bisher wurde ausschließlich die Reibpaarung (Papierbelag/Stahllamellen) in der Baugröße I betrachtet.

Im Versuchsblock E wird die Reibpaarung (Sinter/Stahllamellen) in der Baugröße II untersucht. Um den Einfluss der Reibpaarung, der Baugröße, des Kühlöls sowie der Absolutendrehzahl n_{an} (Innenlamellendrehzahl) auf die Leistungsgrenzen im Dauerschlupf zu ermitteln, werden die eingestellten Parameter (Tabelle 9) in den Versuchen untersucht. Die eingesetzten Sinus-Stahllamellen (Außenlamellen) werden mit planen Innenlamellen (Sinterbelag) SB kombiniert. Für den Kupplungsbetrieb (KB) werden zwei Absolutendrehzahlen n_{an} (Innenlamellendrehzahlen) von 400 U/min. und 800 U/min eingestellt. Der maximale, eingestellte Schlupf bei V1 für beide Betriebspunkte ist in Tabelle 9 dargestellt. Weiterhin wird der Einfluss der Betriebsart „Bremsbetrieb“ untersucht. Für die Versuche beider Betriebsarten werden drei spezifische Kühlölvolumenströme von 0,5 mm³/mm²/s, 1 mm³/mm²/s und 3 mm³/mm²/s eingestellt. Alle Versuche in diesem Versuchsblock werden mit Sinterbelägen (SB) mit Waffelmuster-Nutbild und der Ölsorte ÖI_B durchgeführt.

5. Versuchsblock E												
Kurzbezeichnung	$n_{an,max}$ [1/min]	$n_{ab,min}$ [1/min]	$n_{s,max}$ [1/min]	Kühlölvolumenstrom [mm ³ /mm ³ ·s]	Baugröße	Ölmenge im Tank [Liter]	Anzahl Innen- lamellen	Anzahl Stahl- lamellen	Ölsorte	Lamellen- ausführung	Nutbild	Reibbelag
E1_BB	300	0	300	0,5	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E2_KB	400	100	300	0,5	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E3_KB	800	300	500	0,5	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E4_BB	300	0	300	1	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E5_KB	400	100	300	1	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E6_KB	800	300	500	1	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E7_BB	300	0	300	3	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E8_KB	400	100	300	3	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
E9_KB	800	300	500	3	II	50	3	2	ÖL_B	sinus	Waffelmuster	Sinter
vollfaktorielle Versuchsführung												

Tabelle 9: Versuche zum Einfluss der Reibpaarung, der Baugröße, der Kühlölmenge und der Absolutendrehzahl (Innenlamellen) für Sinterbelag (SB)

8 Ergebnisse der Untersuchungen

8.1 Versuche mit Papierreibbelägen in der Baugröße I

Zunächst wird der organische Belag (OB) in der Baugröße I untersucht. Bezogen auf die praktische Anwendung werden der organische Belag mit dem maximalen Moment T_r von 340 Nm und dem maximalem Schlupf n_s 700 U/min beansprucht. Ein weiterer Einflussparameter auf die Lebensdauer, sowie die Auslegung von nasslaufenden Lamellenkupplungen, ist die Absolutdrehzahl. Die maximale eingestellte Absolutdrehzahl für die Versuche mit dem organischen Belag beträgt 800 U/min.

8.1.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Kühlmenge

Die Schmierölmenge ist ein entscheidender Einflussparameter für die nasslaufende Lamellenkupplung. Zum Aufbau eines brauchbaren Reibwertes ist eine ausreichende Benetzung der Oberflächen der Reibpartner mit Kühlöl sicherzustellen. Eine Angabe für den Reibwertaufbau erforderlichen Ölmenge unter Dauerschlupf ist bisher nicht bekannt

8.1.1.1 Bremsbetrieb

Im Bremsbetrieb (BB) steht die Abtriebswelle und die Antriebsmaschine stellt den Schlupf ein, wohingegen beim Kupplungsbetrieb (KB) die Antriebswelle mit der Absolutdrehzahl (800 U/min) dreht, während die Abtriebsmaschine den Schlupf erzeugt (siehe Bild 21).

Bild 44 stellt das Grenzbelastbarkeitsdiagramm unter Dauerschlupf für den organischen Belag (OB1) im Bremsbetrieb dar. Das Grenzbelastbarkeitsdiagramm zeigt die spezifische Leistungsgrenze q_{pG} in Abhängigkeit des eingestellten spezifischen Ölvolumenstroms (0,5 mm³/mm²/s; 1 mm³/mm²/s; 3 mm³/mm²/s) (siehe Tabelle 5). Hier wurde an Hand der durchgeführten Versuche bei den drei Lamellenpaketen A1_BB, A4_BB und A7_BB im Bremsbetrieb (BB) festgestellt, dass durch die Erhöhung des Ölvolumenstroms die spezifische Leistungsgrenze q_{pG} für die Reibpaarung OB1 deutlich erhöht werden kann. Wie bereits erklärt wurde, wird für jeden spezifischen Kühlmölvolumenstrom für jeweils ein Lamellenpaket A1_BB die Leistungsgrenze ermittelt. Die spezifische Reibleistungsgrenze wird durch die festgelegten Abbruchkriterien, welche in den Vorversuchen festgelegt wurden (siehe Kapitel 6.1.1), ermittelt. Im Grenzbelastbarkeitsdiagramm (siehe Bild 44) werden die zwei schraffierten Bereiche durch ein schmales Band getrennt, welches in den Versuchen Ermittelt die spezifische Leistungsgrenze darstellt. Die Breite des spezifischen Leistungsgrenzbereichs entsteht durch die Streuung des Reibwertabfalls bei der Auswertung von 9% bis 11% zwischen V1 und dem Wiederholungsversuch V4 (siehe Bild 16). Die Wiederholungsgenauigkeitsmessung zur Bestimmung der Leistungsgrenze ist daher sehr gut.

Die Versuchsergebnisse für den organischen Belag (OB1) im Bremsbetrieb zeigen, dass für die kleinste Kühlmölmeng (Versuch A1_BB) nur eine geringe Wärmeabführung möglich ist (niedrige spezifische Reibleistungsgrenze).

Im Gegensatz zeigt der Versuch A7_BB das mit einer Kühlmenge $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ mehr Wärme abgeführt kann, weil mehr Kühlöl zur Verfügung steht und auch der Wärmeübergangskoeffizient von der zugeführten Kühlmenge abhängig ist und sich mit steigendem Volumenstrom vergrößert⁵⁵. Die spezifische Reibleistungsgrenze steigt um ca. 38%.

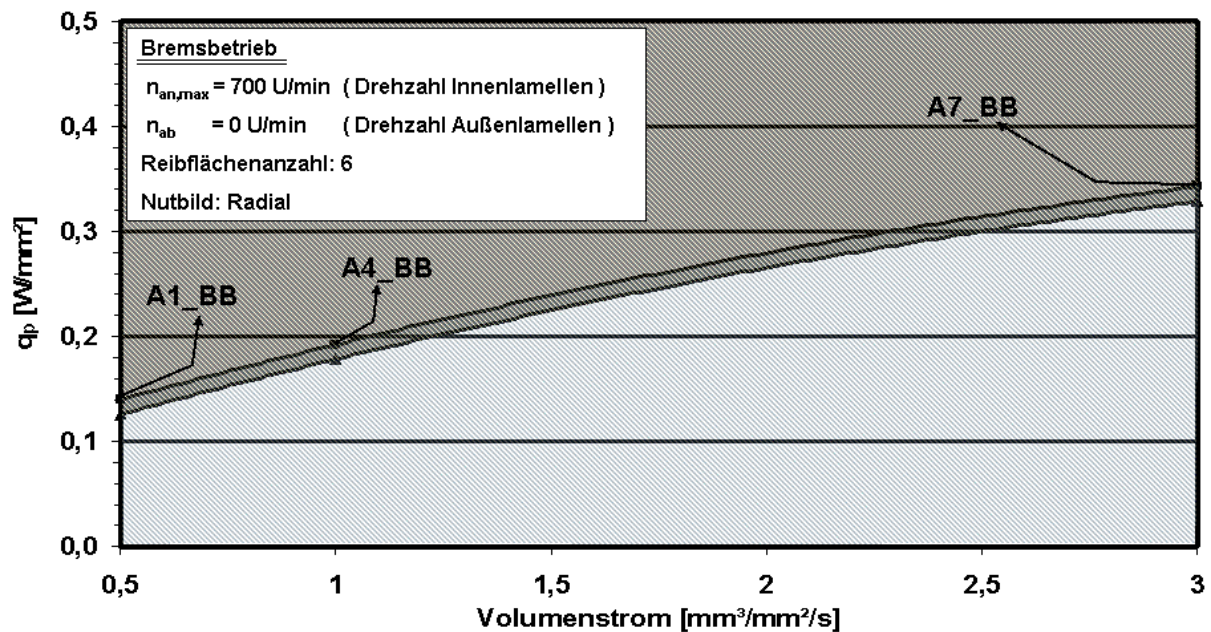


Bild 44: Einfluss Kühlmenge auf die spezifische Reibleistungsgrenze für Bremsbetrieb (BB) bei Dauerschleupf

Stahllamellentemperaturverteilung der Lamellenpaketen A1_BB, A4_BB, und A7_BB an der Leistungsgrenze

Die zulässige spezifische Dauerschleupfleistung bestimmt sich aus der noch zu ertragenden Stahllamellentemperatur⁵⁶. Bei hoher Stahllamellentemperatur wird der Reibwert stark beeinträchtigt. Die Oberfläche des Reibbelags wird durch hohe Temperaturen geglättet, man spricht vom „Verglasen“. Dabei wird die Belagoberfläche (Porosität) durch unterschiedliche Substanzen (aus Öl, Belagabrieb, etc.) zugesetzt.

Bild 46 stellt die Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete A1_BB, A4_BB und A7_BB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze bei den Versuchen V1, V2, V3 und V4 dar (siehe Bild 17). Insgesamt wurde festgestellt, dass sich trotz der sehr stark variierten Parameter die Leistungsgrenze im Dauerschleupfbetrieb unter der hier definierten Randbedingungen immer in etwa der selbe Temperaturbereich eingestellt. D.h. die Temperatur im Wirkflächenpaar ist die entscheidende Größe für die Leistungsgrenze. Die Stahllamellentemperaturverteilung zeigt einen leichten Anstieg der ermittelten Temperatur im Versuch V3 (niedriger Schleupf) bei einem spezifischen Kühlmölvolumenstrom von 3

⁵⁵ Rohm / Reißer 2004

⁵⁶ Hausdorf / Spensberger 2003

mm³/mm²/s gegenüber dem äquivalenten Versuch mit einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s. Bei den Versuchen V1 und V4 (hoher Schlupf) sinkt die Stahllamellentemperatur im Gegensatz zu V3 bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 3 mm³/mm²/s gegenüber den äquivalenten Versuchen mit einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s. Weiterhin sinkt das Temperaturniveau der Stahllamellen von V3 (niedriger Schlupf) mit ca. 340°C über V2 zu V1 (hoher Schlupf) auf ca. 280°C ab.

Betrachtet man die stationäre Energieabgabe des Kupplungspaketes im Dauerschlupfbetrieb, so ist eine Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen den Kühlöl und Lamellen, dem Ölvolumenstrom, der Wärmeübergangszahl Lamellen-Kühlöl und der wärmeübertragenden Fläche auf die Wärmeabführung im Dauerschlupfbetrieb gegeben. Der zeitliche Verlauf der Stahllamellenbeharrungstemperatur wird zum einem von der Wärmeabgabe an das Kühlöl und zum anderem von der Wärmeübertragung an die Belagslamellen beeinflusst. Deswegen ist bei geschlossener Kupplung bei Papier/Stahlpaarungen zusätzlich noch die Wärmeleitfähigkeit des Reibbelags bedeutend.

Aufgrund der um 1/100 kleineren Temperaturleitzahl von Papier im Vergleich zum Stahl nimmt das Kühlöl in den Nutkanälen hauptsächlich die Wärme von den Stahllamellen auf. Die gute Wärmeleitfähigkeit des Sinterbelags ermöglicht die Wärmeaufnahme des Kühlöls bei Sinter/Stahlpaarungen in den Nutenkanälen auf beiden Seiten⁵⁷.

Um die Wärmeabgabe an das Kühlöl in den Belagsnuten und die Wärmeleitfähigkeit des ölgetränkten Papierbelags in der Kupplung beschreiben zu können, benötigt man die Wärmeübergangszahl. Die Wärmeübergangszahl wird durch Temperaturmessungen ermittelt⁵⁸.

Für die Bestimmung der Erwärmung des durchströmenden Kühlöls bei einer vollflächigen Ölbedeckung der Stahllamellenoberfläche $A_{n,K}$ benötigt man die folgende Differentialgleichung⁵⁹.

$$\alpha \cdot A_{N,K} \cdot [T_{SL} - T_{\dot{O}l}(y)] = \rho_{\dot{O}l} \cdot w_{\dot{O}l} \cdot A_Q \cdot c_{\dot{O}l} \cdot \frac{dT_{\dot{O}l}(y)}{dy} \quad (9)$$

α = Wärmeübergangskoeffizient

y = Koordinaten in Nutrichtung

$w_{\dot{O}l}$ = Strömungsgeschwindigkeit in der Nut

A_Q = Strömungsquerschnitt im Nutkanal

$A_{N,K}$ = Ölbedeckte Fläche der Stahllamelle im Nutkanal

⁵⁷ Hämmerl 1994

⁵⁸ Hasselgruber 1953

⁵⁹ Hasselgruber 1953

Mit den Randbedingungen:

$$T_{\text{Öl}}(y=0) = T_{\text{Öl_zu}} \text{ und } T_{\text{Öl}}(y=(dA-dl)/2) = T_{\text{ab}}$$

Daraus folgt Gleichung 10 für die Ermittlung der Wärmeübergangszahl in der Nutung:

$$\alpha = -\ln\left(\frac{T_{\text{ab}} - T_{\text{SL}}}{T_{\text{Öl_zu}} - T_{\text{SL}}}\right) \cdot \frac{w_{\text{Öl}} \cdot A_{\text{Q}} \cdot \rho_{\text{Öl}} \cdot c_{\text{Öl}}}{A_{\text{N,K}}} \quad (10)$$

Im Dauerschlupf ist die Temperatur T_{SL} ist Stahllamellenbeharrungstemperatur. Die Temperatur. Die Temperatur T_{ab} ist die Temperatur des Kühllöls, die direkt am Austritt des Öls aus den Lamellen bestimmt wird. $T_{\text{Öl_zu}}$ ist die Einspritztemperatur des Kühllöls.

Durch den Nutquerschnitt A_{Q} und den Ölvolumenstrom $V_{\text{Öl_zu}}$ kann die Strömungsgeschwindigkeit $w_{\text{Öl}}$, des Kühlmediums für die verwendete Belagsnutung bestimmt werden. der Ölvolumenstrom ist nach ⁶⁰ einer Funktion der Differenzdrehzahl n_{s} und der Antriebsdrehzahl n_{an} .

Der Temperaturniveauunterschied der verschiedenen Schlupf Differenzdrehzahlen in V1; V2 und V3 sowie der verschiedenen Kühllölmengen ist nach ⁶¹ damit zu erklären, dass die Wärmeübergangszahl von der Differenzdrehzahl und der Ölmenge abhängig ist (siehe Bild 45). Mit zunehmendem Schlupf steigt die Wärmeübergangszahl an. Für hohe Ölvolumenstrom (z.B. 3 mm³/mm²/s) und niedrige Gleitgeschwindigkeit z.B. V3 verringert sich die Wärmeübergangszahl. Nähere Untersuchungen zum Wärmeübergang zeigen einen Anstieg des Wärmeübergangskoeffizienten bei niedriger Kühllölmenge (z.B. 1mm³/mm²/s). Die Stahllamellentemperaturen im Versuch V1 und dem Wiederholungsversuch V4 sind vergleichbar.

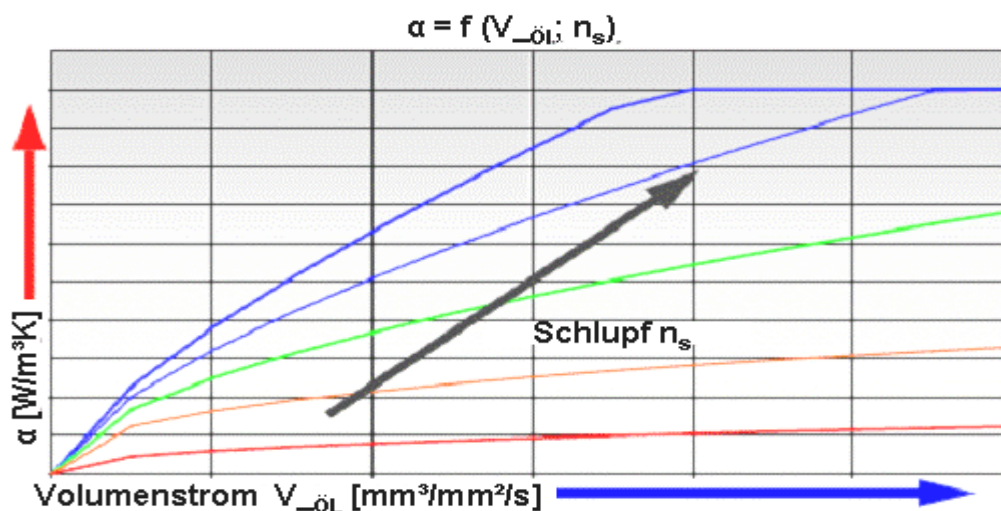


Bild 45: Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = f(\text{Differenzdrehzahl "Schlupf", Volumenstrom})$ ⁶²

⁶⁰ Rohm / Reißer 2004

⁶¹ Rohm / Reißer 2004

⁶² Rohm / Reißer 2004

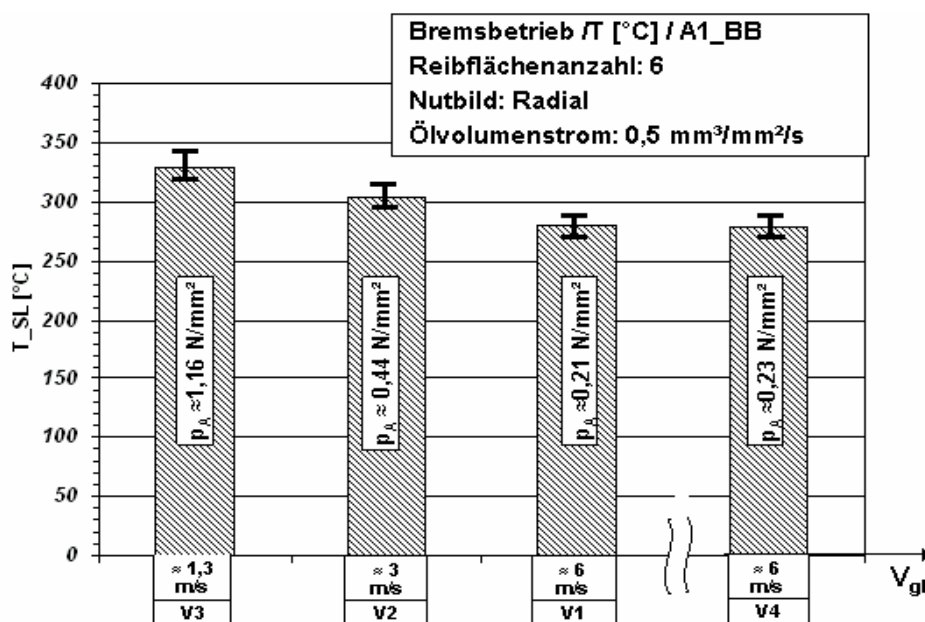


Bild 46: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes A1_BB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

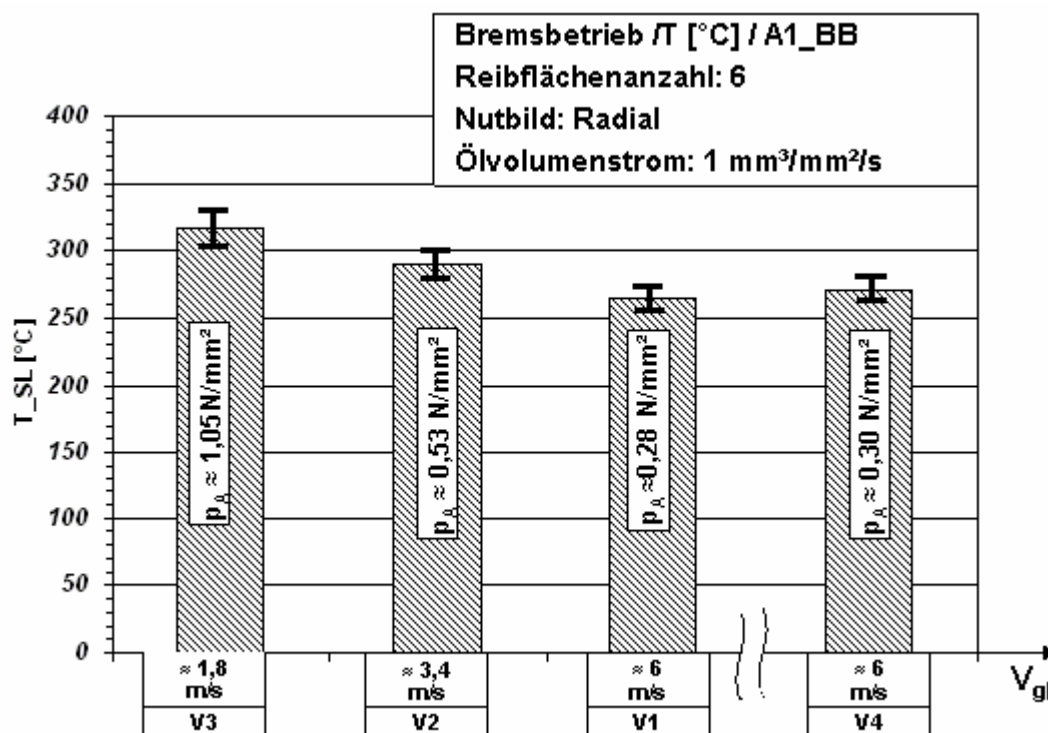


Bild 47: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes A4_BB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

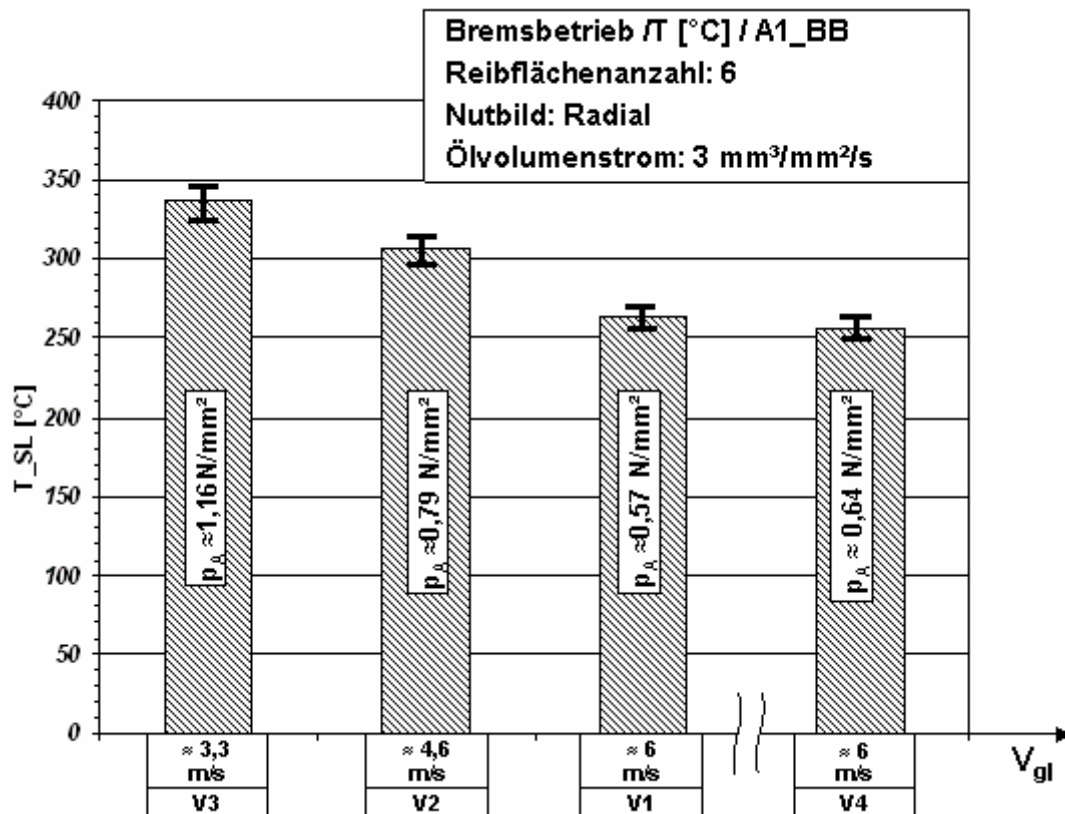


Bild 48: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes A7_BB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

Bei organischen Belägen (Papierbeläge) ist immer mit Verschleiß zu rechnen, der sich jedoch im Normalbetrieb in Grenzen hält. Bei zu hoher Belastung kann es jedoch zu einem erhöhten Verschleiß kommen. Die dadurch zunehmende reduzierte Belastung führt zu einer reduzierten Kühlung und einer weiteren Zunahme des Verschleißes⁶³.

A.1, A.2 und A.3 zeigen die Lamellendickenabnahme der drei Lamellenpakete an ihrer spezifischen Leistungsgrenze (siehe Anhang). Die Lamellendickenabnahme ist bei A1_BB (spez. Ölvolumentrom $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$) und A7_BB (spez. Ölvolumentrom $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$) größer als bei A4_BB (spez. Ölvolumentrom $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$). Die Temperaturverteilung in den drei Lamellenpaketen weisen auf eine Abhängigkeit zwischen Reibflächentemperatur (Stahllamellentemperatur) und dem Verschleiß hin. Bei Betrachtung jeder einzelnen Lamelle eines Lamellenpaketes (z.B. A1_BB) stellt man fest, dass die Lamellendickenabnahme der zweiten Lamelle (2) von der Kolbenseite aus gesehen – wesentlich höher ist als die der dritten Lamelle (3). Dies wird durch eine nicht gleichmäßige Axialkraft im Lamellenpaket verursacht, die durch Reibung an der Verzahnung erzeugt wird (Bild 115). Aufgrund der nicht aktiven Reibfläche der jeweils äußeren Lamelle entspricht die Lamellendickenabnahme der

⁶³ Weinhold 1998

ersten Lamellen (1) und der letzten Lamelle (4) etwa der Hälfte der Lamellendickenabnahme der zweiten (2) und der dritten (3) Lamelle (siehe Bild 9).

Die Eigenschaften des Gegenkörpers (Stahllamelle) im Reibsystem hat einen großen Einfluss. Entscheidende Rolle auf dem Reibwertaufbau, Reibwertverlauf, sowie Wärmeabführung. Der Einfluss dieser Eigenschaften, z.B. unterschiedliche Stahllamellen-Endbearbeitung und Oberflächenhärte- sowie Beschichtungsverfahren wurde in der Dissertation von Pflieger^{64,65} genau untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in den Vorversuchen die Stahllamellendicke vermessen. Im Gegenteil zu den Belaglamellen (Innenlamellen) wurde in den Stahllamellen kaum Verschleiß beobachtet. In weiteren Beobachtungen (Rauigkeitsmessungen) der Stahllamellenoberfläche wurde festgestellt, dass die Stahllamellenoberflächen nach der Untersuchung geglättet sind. In B.1 bis B.6 ist die Rauigkeitsmessung der Stahllamellen vor und nach der Untersuchung dargestellt (siehe Anhang)

8.1.1.2 Kupplungsbetrieb

Um den Energieeintrag und die anderen Effekte (Temperaturverteilung, Verschleiß, Oberflächenrauigkeit,..) der nasslaufenden Lamellenkupplung bei den verschiedenen Betriebsarten zu untersuchen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Betriebsart (Kupplungsbetrieb) untersucht. Im Gegensatz zum Bremsbetrieb drehen die Innenlamellen (Belaglamellen) im Kupplungsbetrieb mit konstanter Drehzahl (800 U/min). Der Schlupf wird durch die Stahllamellendrehzahl von der Bremsmaschine eingestellt.

Eine typische Anwendung für den Kupplungsbetrieb mit den organischen Belägen ist die neu entwickelte Doppelkupplung⁶⁶.

Bild 49 stellt das Grenzbelastbarkeitsdiagramm unter Dauerschlupf für den organischen Belag (OB1) im Kupplungsbetrieb dar. Das Grenzbelastbarkeitsdiagramm zeigt die spezifische Leistungsgrenze q_{pG} in Abhängigkeit des eingestellten spezifischen Ölvolumenstroms (0,5 mm³/mm²/s; 1 mm³/mm²/s; 3 mm³/mm²/s) (siehe Tabelle 5).

Wie bereits im Bremsbetrieb beobachtet, ist mit den Versuchen an den drei Lamellenpaketen A2_KB, A5_KB und A8_KB im Kupplungsbetrieb (KB) festzustellen, dass durch die Erhöhung des Ölvolumenstroms die spezifische Leistungsgrenze q_{pG} für den Belag OB1 deutlich erhöht werden kann.

Aufgrund der schlechteren Wärmeabführung hat der Kupplungsbetrieb im Vergleich mit dem Bremsbetrieb eine niedrige spezifische Leistungsgrenze. Die untersuchten Belaglamellen für beide Betriebsarten haben ein radiales Nutbild. Wie bereits oben erwähnt wurde, drehen sich die Belaglamellen im Kupplungsbetrieb mit 800 U/min. Im Bremsbetrieb drehen sich die

⁶⁴ Habig / Evers / Chatterjee-Fischer 1978

⁶⁵ Pflieger 1998

⁶⁶ Rohm / Reißer 2004

Belaglamellen mit verschiedenen Drehzahlen. Durch höhere Drehzahlen der Belaglamellen im Kupplungsbetrieb, wird das Schmieröl mit einer höheren Strömungsgeschwindigkeit in den Nuten nach Außen befördert. Das Kühlöl hat somit nicht genügend Zeit, um die erzeugte Wärme aus dem Kupplungspaket abzuführen.

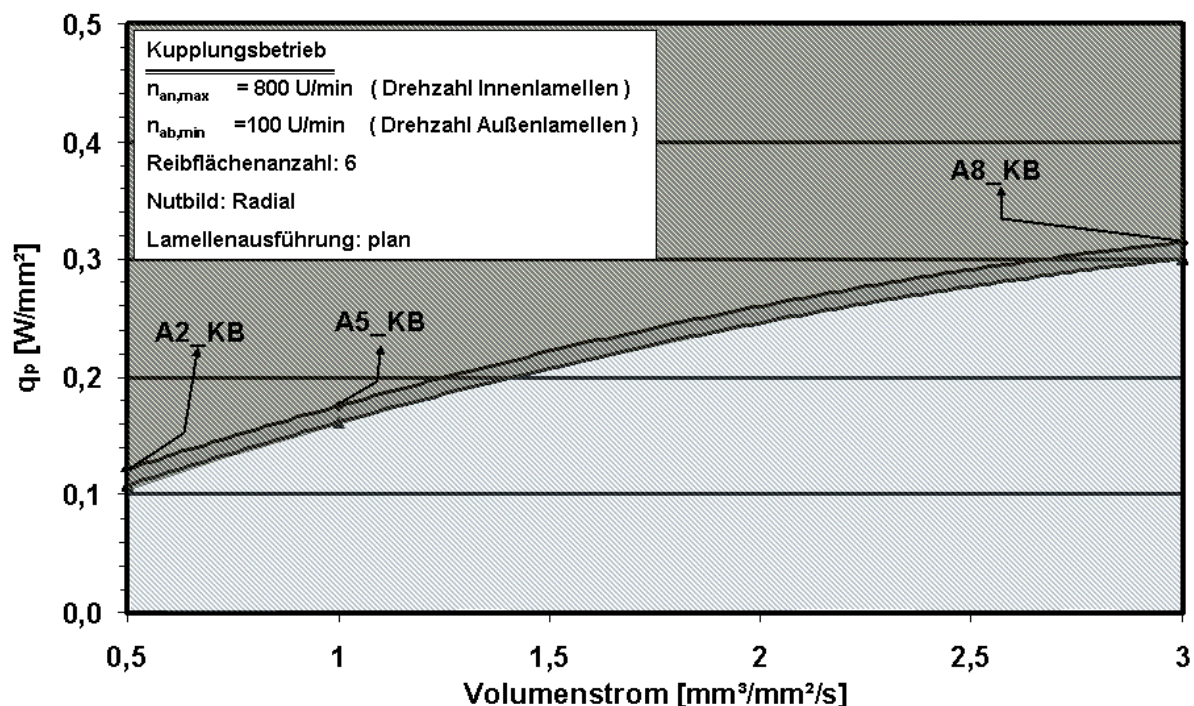


Bild 49: Einfluss der Kühllölmenge auf die spezifische Reibleistungsgrenze für Kupplungsbetrieb (KB)

Stahllamellentemperaturverteilung der Lamellenpaketen A2_KB, A5_KB, und A8_KB an der Leistungsgrenze

Bild 50 zeigt die Stahllamellentemperaturverteilung an den drei Lamellenpaketen A2_KB, A5_KB, und A8_KB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze in den Versuchen V1, V2, V3 und V4. Es ergibt sich eine etwas höhere Stahllamellentemperatur im Versuch V3 (niedriger Schlupf) bei den spezifischen Ölvolumenströmen $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ und $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ gegenüber $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$. Wieder sinkt das Temperaturniveau der Stahllamellen von V3 (niedriger Schlupf) über V2 zu V1 (hoher Schlupf) ab (siehe Bremsbetrieb). Die Stahllamellentemperaturen im Versuch V1 und dem Wiederholungsversuch V4 sind vergleichbar.

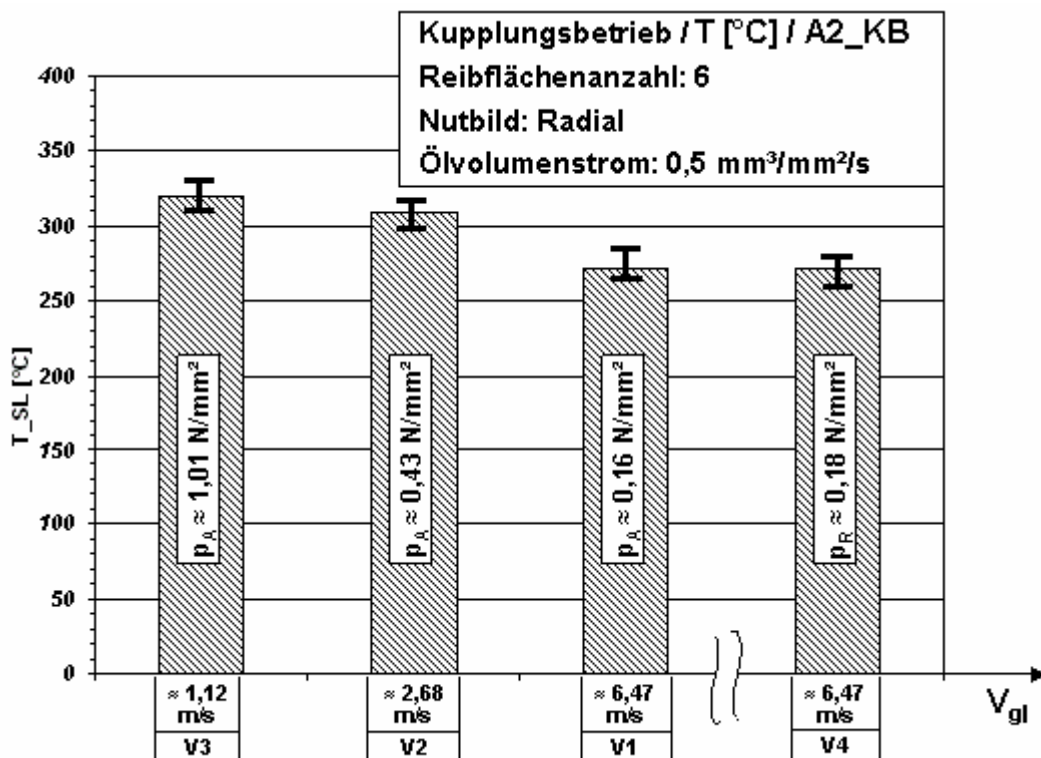


Bild 50: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes A2_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

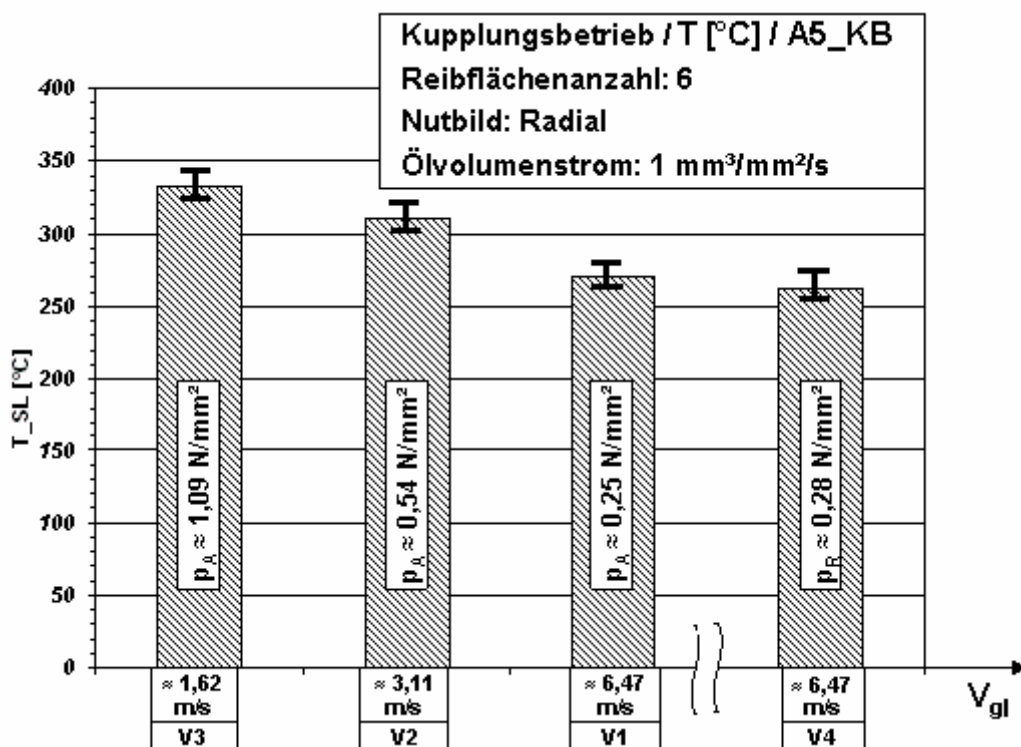


Bild 51: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes A5_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

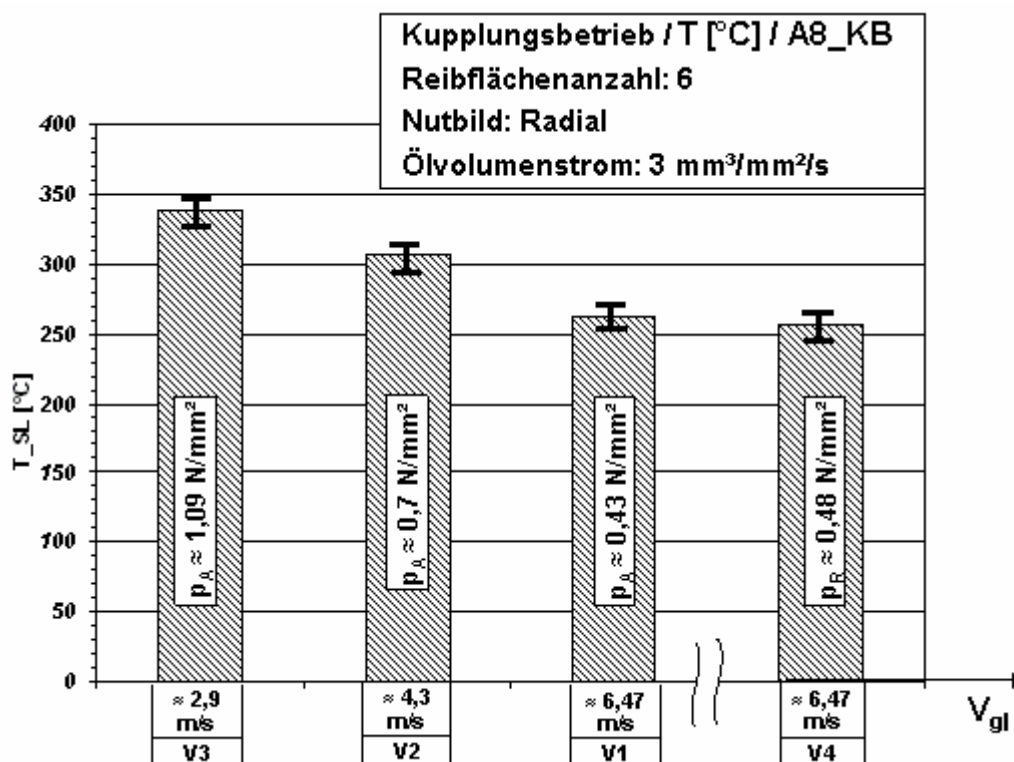


Bild 52: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes A8_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

Verbunden mit der oben dargestellten Temperaturverteilung im Lamellenpaket wurde eine Lamellendickenabnahme beobachtet. (siehe Anhang A.1, A.4, A.6).

In B.7 bis B.12 ist die Rauigkeitsmessung der Stahllamellen vor und nach der Untersuchung dargestellt. Wie auch im Bremsbetrieb, liegen nach den Untersuchungen geglättete Lamellenoberflächen vor. Bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von 1 mm³/mm²/s (siehe Anhang) tritt im Vergleich zu den spezifischen Ölvolumenströmen von 0,5 und 3 mm³/mm²/s eine etwas stärkere Glättung auf.

8.1.2 Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Nutbildes

Das Nutbild hat einen entscheidenden Einfluss auf das Reibverhalten sowie die spezifische Reibleistung der nasslaufenden Lamellenkupplung. Durch die verschiedenen Nutgeometrien wird der Kühllöhdurchsatz durch das Lamellenpaket bestimmt und somit die Abführung der thermischen Energie. Der Reibbelag ist auf der Innenlamelle angeordnet.

Um den Einfluss des Nutbildes auf die spezifische Reibleistungsgrenze für den Kupplungsbetrieb (KB) zu ermitteln, wurden drei Nutbilder untersucht: Radialnutbild, Kamm/Gruppenparallelnutbild und Waffelmuster. Für die drei Lamellenpakete B1_KB (Radialnutbild), B2_KB (Waffelmusternutbild) und B3_KB (Kamm/Gruppenparallel) wurde ein spezifischer Ölvolumenstrom von 1 mm³/mm²/s eingestellt (siehe Tabelle 6).

Bild 53 stellt das Grenzbelastbarkeitsdiagramm unter Dauerschleupf für den organischen Belag (OB1) im Kupplungsbetrieb dar. Das Grenzbelastbarkeitsdiagramm zeigt die

spezifische Leistungsgrenze q_{pG} in Abhängigkeit der drei Nutbilder. Das Waffelmusternutbild zeigt im Vergleich zum Radialnutbild eine höhere spezifische Reibleistungsgrenze. Die spezifische Reibleistungsgrenze des Kamm/ Gruppenparallelnutbildes liegt zwischen der des Radialnutbildes und des Waffelmusters.

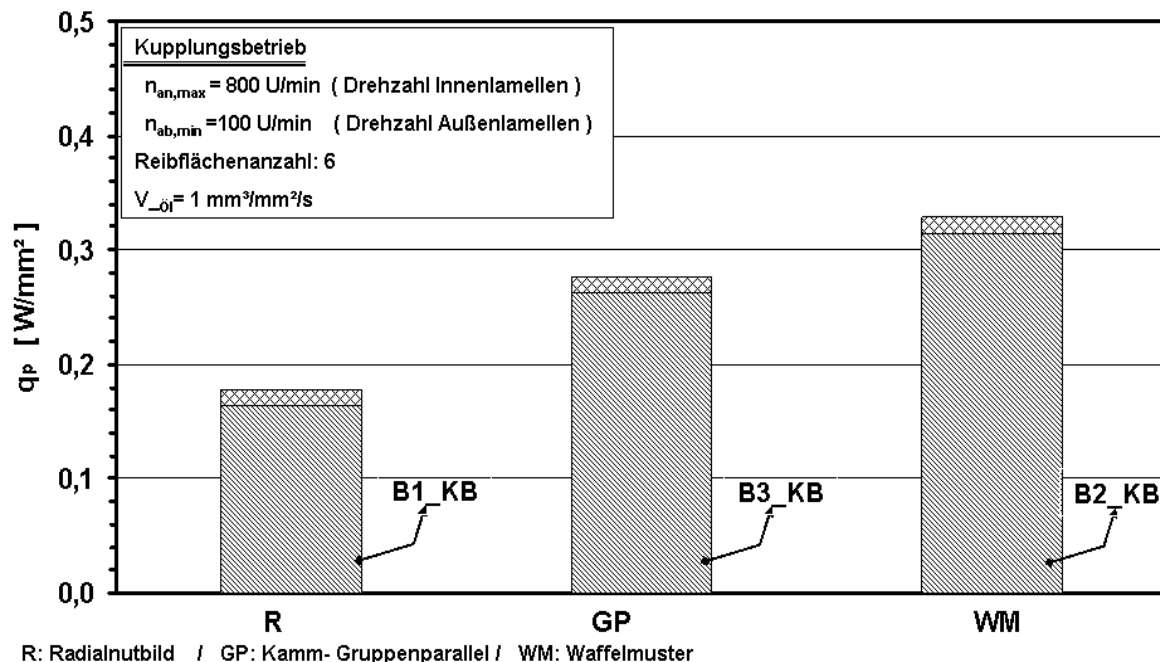


Bild 53: Einfluss des Nutbildes auf die spezifische Reibleistungsgrenze für Kupplungsbetrieb (KB)

Die Ursache für die gute Belastbarkeit der Waffelnuten liegt darin, dass das Waffelmuster das Kühlöl nicht zu schnell durch das geschlossene Lamellenpaket fließen lässt⁶⁷, dadurch wird eine sehr gute Kühlung des Lamellenpakets erreicht. Waffelnuten weisen ein hohes Nutdurchflussvermögen auf und werden in Schaltversuchen mit einem spezifischen Volumenstrom von $2,3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ betrieben^{68,69}. Dabei ist die Ölverdrängungszeit beim Waffelmuster am geringsten im Vergleich zum Gruppenparallelnutbild. Auch im geöffneten Zustand der Kupplung erweist sich das Waffelmuster als vorteilhaft, weil es das Kühlöl am Besten nach außen befördert⁷⁰. Betrachtet man die Nutquerschnittsflächen der einzelnen Nutbilder, so hat das Gruppenparallelnutbild den geringsten Nutquerschnitt und den größten die Radialnuten. Das Waffelmuster liegt dazwischen. Die Nutquerschnittsfläche hat einen großen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit und den Volumenstrom. Die Strömungsgeschwindigkeit und der Volumenstrom in Abhängigkeit des Kanalquerschnitts ist in Bild 54 wiedergegeben.

Die Ursache für die gute Belastbarkeit der Waffelnuten liegt darin, dass der Strömungsmechanismus des fließenden Schmieröls bei den drei Nutbildern unterschiedlich

⁶⁷ Beisel 1983

⁶⁸ Perponcher 1998

⁶⁹ Appelhoff / Brinkmann 1986

⁷⁰ Oerleke / Funk 2003

ist; z.B. erreicht man durch eine sehr schnelle Strömung des Kühllöls durch das geschlossene Lamellenpaket nicht immer eine gute Kühlwirkung⁷¹. Weiterhin hat das Nutbild einen deutlichen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten (Bild 45).

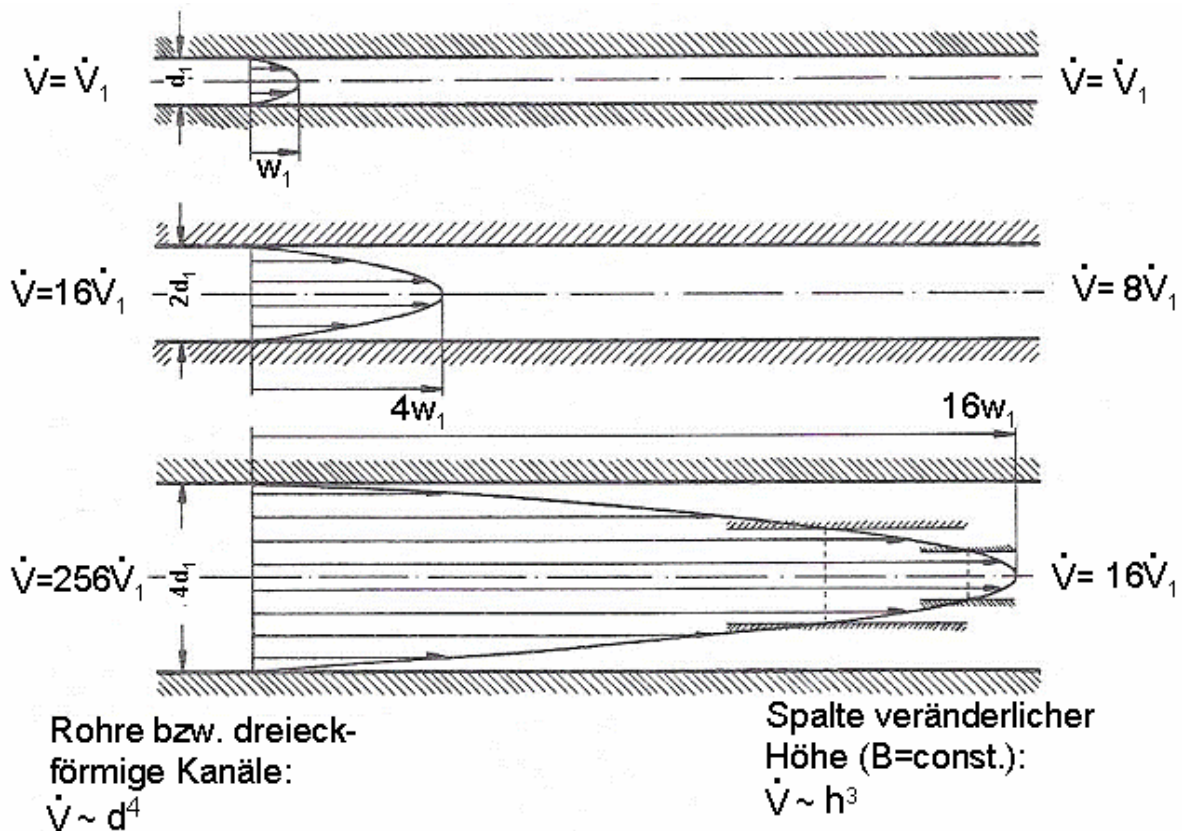


Bild 54: Einfluss des Kanalquerschnitts auf die Strömungsgeschwindigkeit und den Volumenstrom⁷²

Bei Vergrößerung der Nutquerschnittshöhe und gleich bleibender Nutbreite steigt der Kühllölvolumenstrom mit der 3. Potenz an. Bei den Radialnuten sind die Nuten radial in Umfangsrichtung verteilt und bis auf das Trägerblech gestanzt. Sie weisen den größten Nutquerschnitt auf, was eine Vergrößerung des Volumenstroms und der Strömungsgeschwindigkeit bewirkt. Durch die vorhandenen großen Fliehkräfte und den vergrößerten Kanalquerschnitts wird das Kühllöl zu schnell durch das Lamellenpaket befördert, was den Abtransport der thermischen Energie, die beim Dauerschlupf entsteht, verschlechtert. Der Belag ist starken thermischen Belastungen ausgesetzt und somit ist die erreichbare spezifische Reibleistung auch nicht so hoch wie beim Gruppenparallel oder Waffelmuster. Die Gruppenparallelnuten liegen leicht schräg in Umfangsrichtung verteilt. Die Nut ist durchgehend, aber durch die schräge Lage der Nuten und die geringere Nuttiefe und Nutquerschnittsfläche wird das Kühllöl nicht so schnell durch die Lamellen befördert und kann somit mehr thermische Energie beim durchlaufen der Kupplung aufnehmen. Betrachtet man

⁷¹ Pfettscher 1995

den Verschleiß und die Flächenpressung so stellt man fest, dass der höchste Verschleiß beim Waffelmuster vorliegt. Der Belag wird aufgrund der hohen spezifischen Reibleistungen und dem hohen Anpressdruck stärker beansprucht. Zudem ist der Nettoreibflächenanteil bei dem Waffelmuster am kleinsten. Der geringste Verschleiß ergibt sich mit Gruppenparallelnuten, da hier auch der Anpressdruck am geringsten ist. Der Reibflächenanteil ist bei den Gruppenparallelnuten zwischen dem der Waffelmuster und den Radialnuten. Das Radial Nutbild erreichte im Versuch die geringste spezifische Leistungsgrenze q_{pG} .

Stahllamellentemperaturverteilung der Lamellenpaketen B1_KB, B2_KB, und B3_KB an der Leistungsgrenze

Bild 58 bis Bild 60 zeigen die Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete B1_KB, B2_KB, und B3_KB an ihren spezifischen Reibleistungsgrenzen bei den Versuchen V1, V2, V3 und V4. Obwohl das Lamellenpaket B2_KB mit dem Nutbild Waffelmuster eine höhere spezifische Reibleistung aufweist (Bild 53), zeigen die Temperaturverteilungen bei den Versuche V1, V2, V3 ein relativ niedrigeres Temperaturniveau als die anderen Lamellenpakete mit dem Radialnutbild und Gruppenparallel. Waffelnuten weisen ein hohes Nutdurchflussvermögen auf. Weiterhin zeigt das Temperaturniveau des Nutbildes Waffelmuster bei den verschiedenen Differenzdrehzahlen (V1, V2; V3) kaum unterschiede. Des Weiteren ist das Temperaturniveau der Lamellenpakete B1_KB (Radialnutbild) und B3_KB (Gruppenparallelnutbild) bei V3 (niedriger Schlupf) höher als bei V1 und V4 (hoher Schlupf).

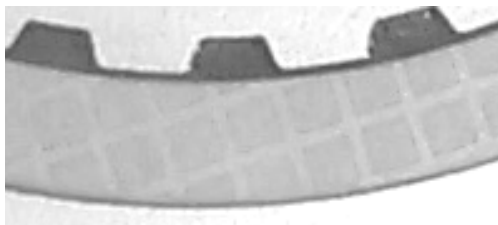


Bild 55: Nutbild Waffelmuster

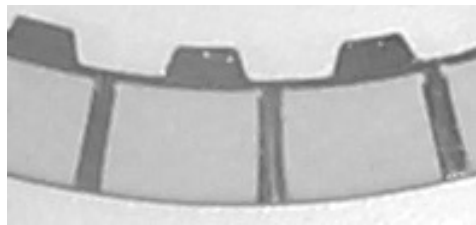


Bild 56: Nutbild Radial

Nach⁷³ hat der Wärmeübergangskoeffizient einen entscheidenden Einfluss auf die ertragbare Wärmemenge.

Hier wurden Abhängigkeiten des Wärmeübergangskoeffizient , z.B. von dem Kühlölmassenstrom, der Absolutdrehzahl n_e [U/m], dem Schlupf n_s [min⁻¹], dem Zustand der Kupplung (geschlossen / offen), der Nutform der Beläge (Radial, Waffel, Spiral, ...), der Art der Nuteinbringung (gepresst / geschliffen), der Nuttiefe t_{Nut} [mm], sowie der Nutbreite b_{Nut} [mm] aufgezeigt. Überdies sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren möglich.

⁷² Beisel 1983

⁷³ Rohm / Reißer 2004

Betrachtet man die Kanallänge des Nutbilds Waffelmuster und die Nutverteilung auf der Reibfläche so stellt man fest, dass die Reibflächensegmente zwischen den Nutkanälen im Vergleich mit dem Nutbild Gruppenparallel und dem Radialnutbild klein ist (Bild 55 und Bild 57). Das gewährleistet, dass die gesamte Reibfläche an dem Wärmeübergang teilnehmen kann, da genügend Fläche mit Öl überstrichen werden. Weiterhin wird durch die kurzen Kanäle, die Quer zur Strömungsrichtung liegen, Turbulenzströmungen erzeugt.

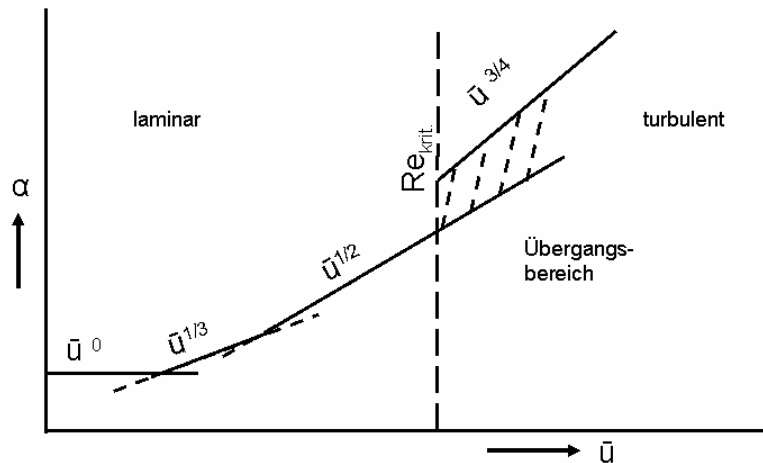


Bild 57: Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von Strömungsgeschwindigkeit bei laminarer und turbulenter Strömung⁷⁴

Durch die kleinen Reibflächensegmente und die erzeugte Turbulenzströmung wird der Wärmeübergangskoeffizient erhöht, und somit die erzeugte Wärme besser auf das Kühlöl übertragen⁷⁵. Daher ist das Waffelmuster für die verschiedenen Schlupfdrehzahlen (V1, V2, V3) besser geeignet und es ergeben sich kaum Unterschiede im Temperaturniveau bei den verschiedenen Versuchspunkten (V1, V2; V3) (Gleichmäßige Wärmeübertragung).

⁷⁴ Schlünder / Martin 1955

⁷⁵ Schlünder / Martin 1955

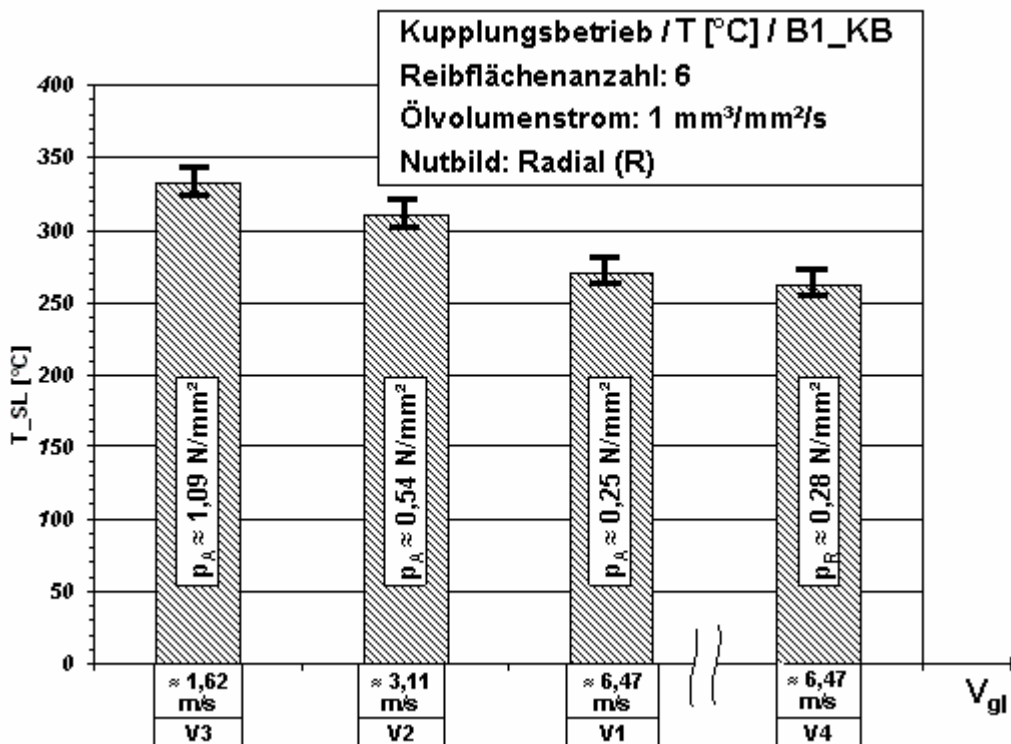


Bild 58: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakets B1_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

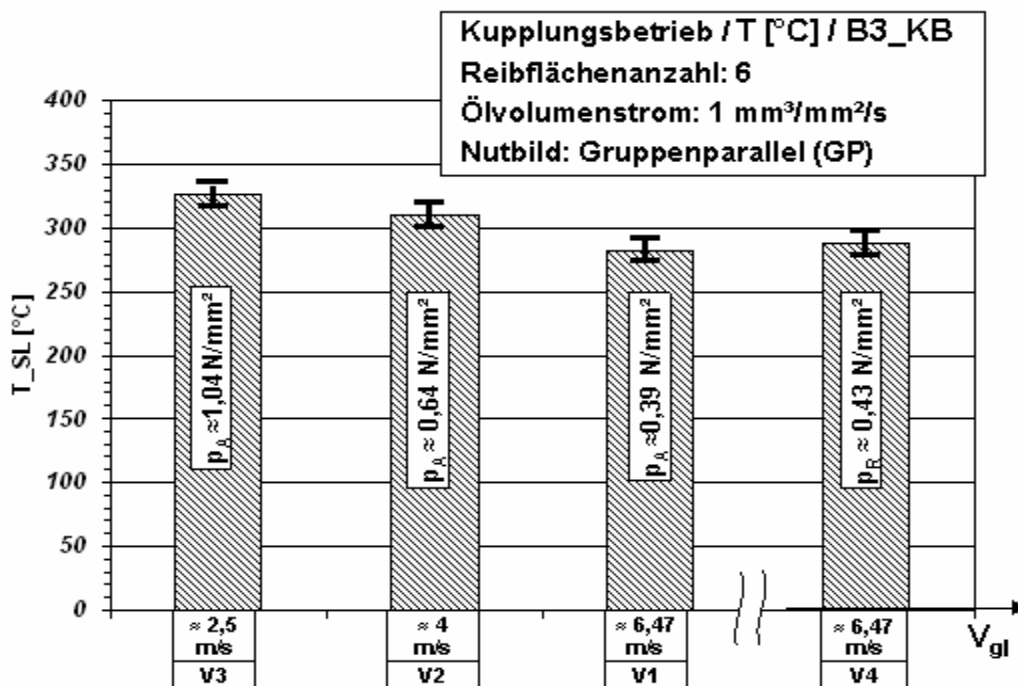


Bild 59: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakets B3_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

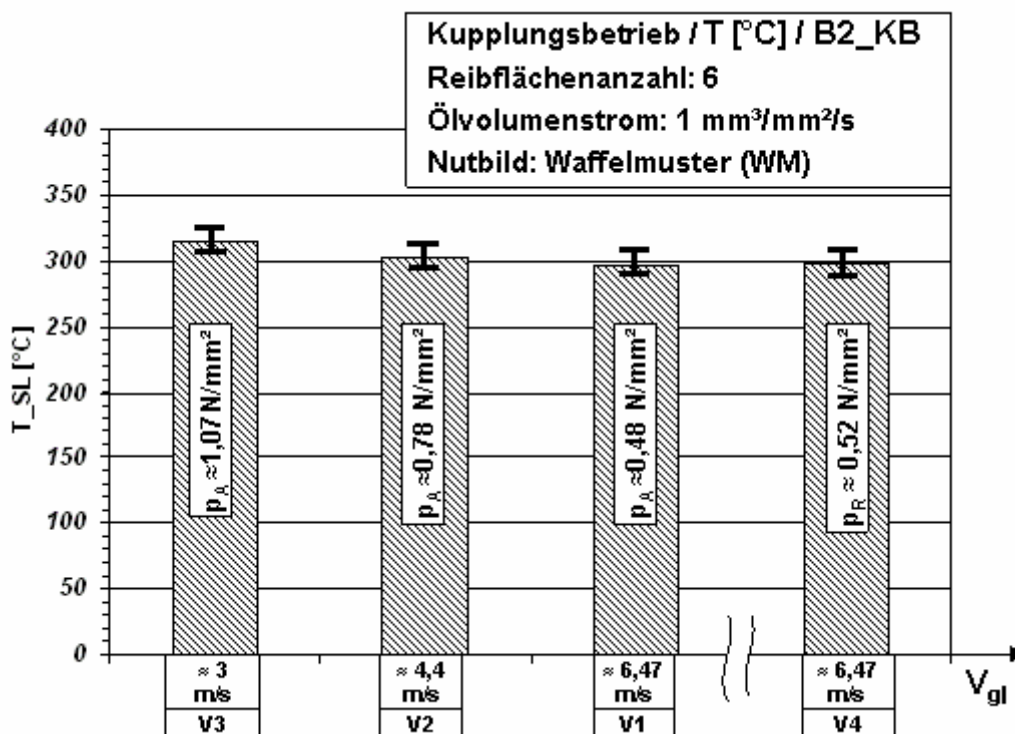


Bild 60: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakets B2_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

Eine weitere Beobachtung der drei Nutbilder ist die Lamellendickenabnahme. A. 7, A. 8 und A. 9 zeigen die Lamellendickenabnahme der drei Lamellenpakete B1_KB, B3_KB, und B2_KB an ihren Leistungsgrenzen (siehe Anhang). Die Untersuchungsergebnisse zeigen dass, die Lamellendickenabnahme des Lamellenpaketes B3_KB (gruppenparallele Nutung) kleiner als bei den Lamellenpaketen B1_KB (Radialnutbild) und B2_KB (Waffelmusternutbild) ist.

Die Rauigkeitsmessung der Stahllamellen der drei Nutbilder gruppenparallele Nutung (B3_KB), Radialnutbild (B1_KB) und Waffelmusternutbild (B2_KB) zeigen eindeutige Glättung nach der Untersuchung (B.13 bis B.18). Aufgrund der höheren erreichten spezifischen Leistungsgrenze bei dem Waffelmusternutbild zeigt sich eine stärkere Glättung im Vergleich zum Radialnutbild und zum gruppenparallelen Nutbild (s. Anhang).

8.1.3 Versuche zum Einfluss der Lamellenausführung (sinus/plan)

Um den Einfluss der Lamellenausführung (sinusförmig oder plane Belaglamellen) auf die spezifisch ertragbare Reibleistungsgrenze zu ermitteln, wurden vier Lamellenpaketen mit den Belägen OB1 (plan) und OB4 (sinus) untersucht. Für die Versuche wurde der spezifische Ölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s bis 3 mm³/mm²/s variiert (siehe Tabelle 7). Die Lamellenpakete C1_KB (OB1) und C2_KB (OB4) wurden hier bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s untersucht. Für die Lamellenpakete C3_KB (OB1) und C4_KB (OB4) wurde der spezifische Ölvolumenstrom auf 3 mm³/mm²/s eingestellt.

Bei den Versuchen mit sinusgewellten und planen Referenzlamellen (Kamm/Radial) aus Papier ergaben sich keine deutlichen Verbesserungen der erreichten spezifischen Reibleistung. (um ca. 7 % höher). Dies zeigt das sinusgewellte Lamellen keinen großen Einfluss auf die spezifische Reibleistung im Dauerschlupf haben, lediglich auf das Löseverhalten im Schaltbetrieb. Beim Dauerschlupfbetrieb sind die gewellten Lamellen durch den Anpressdruck fast plan.

Temperaturverteilung an den Stahllamellen bei den Lamellenpaketen C1_KB und C2_KB an der Leistungsgrenze

Bild 61 bis Bild 64 stellen die Stahllamellentemperaturverteilung an den beiden Lamellenpaketen C1_KB, C2_KB, C3_K B und C4_KB, an ihrer spezifischen Reibleistung bei den Versuchen V1, V2, V3 und V4 dar. Für die vier Lamellenpakete werden der spezifische Kühlölvolumenstrom auf $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ und $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt. Aufgrund der lokalen Erwärmung der Wellung an der Stahllamellen bei den Versuchen mit niedriger Flächenpressung (V1 und V4) ist die Stahllamellentemperatur etwas höhere mit dem Belag OB4 (sinus) gegenüber den mit Belag OB1 (plan) geführten Versuchen. Weiterhin sinkt das Temperaturniveau der Stahllamellen von V3 (niedriger Schlupf, hohes Drehmoment) über V2 zu V1 (hoher Schlupf, niedriges Drehmoment) ab. Die Stahllamellentemperaturen im Versuch V1 und dem Wiederholungsversuch V4 sind auf vergleichbarer Höhe.

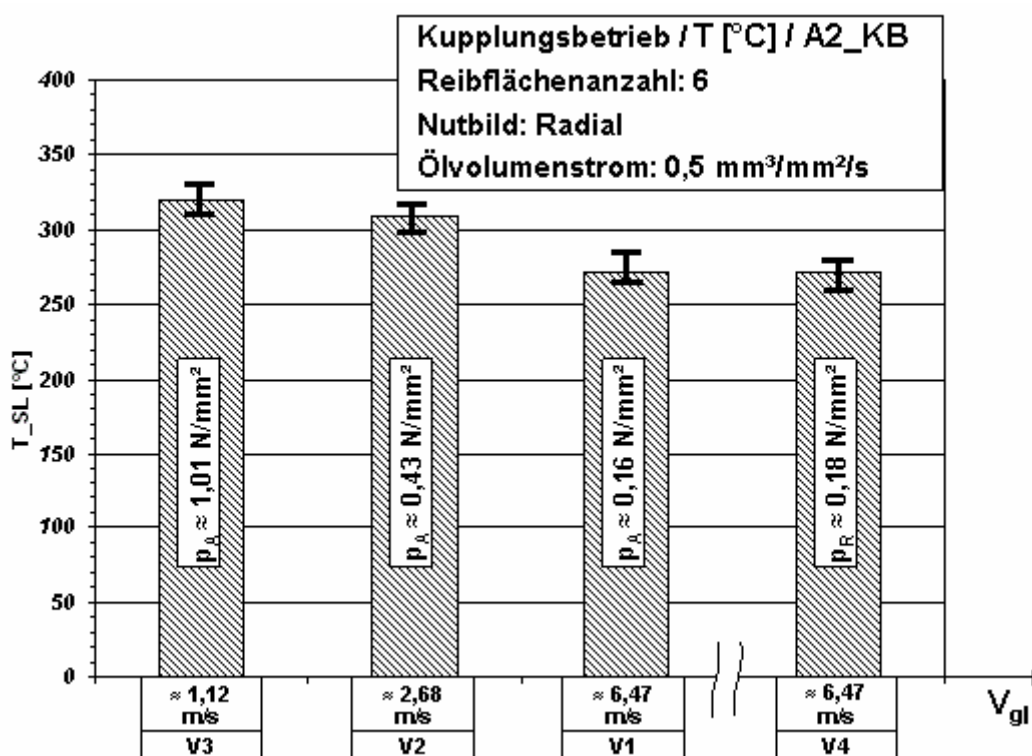


Bild 61: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes C1_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

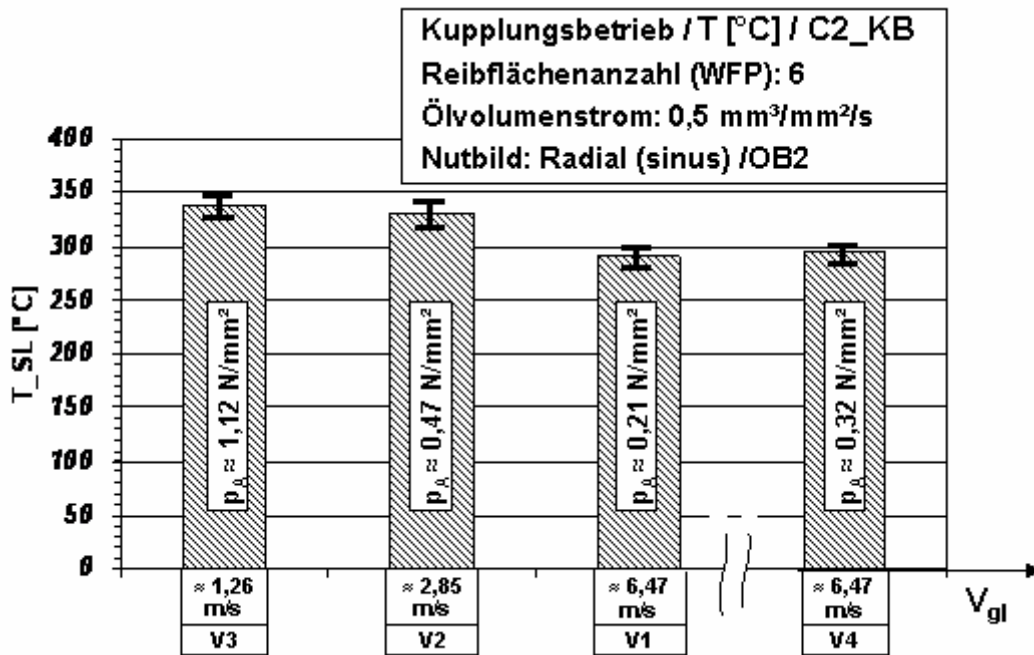


Bild 62: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakets C2_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

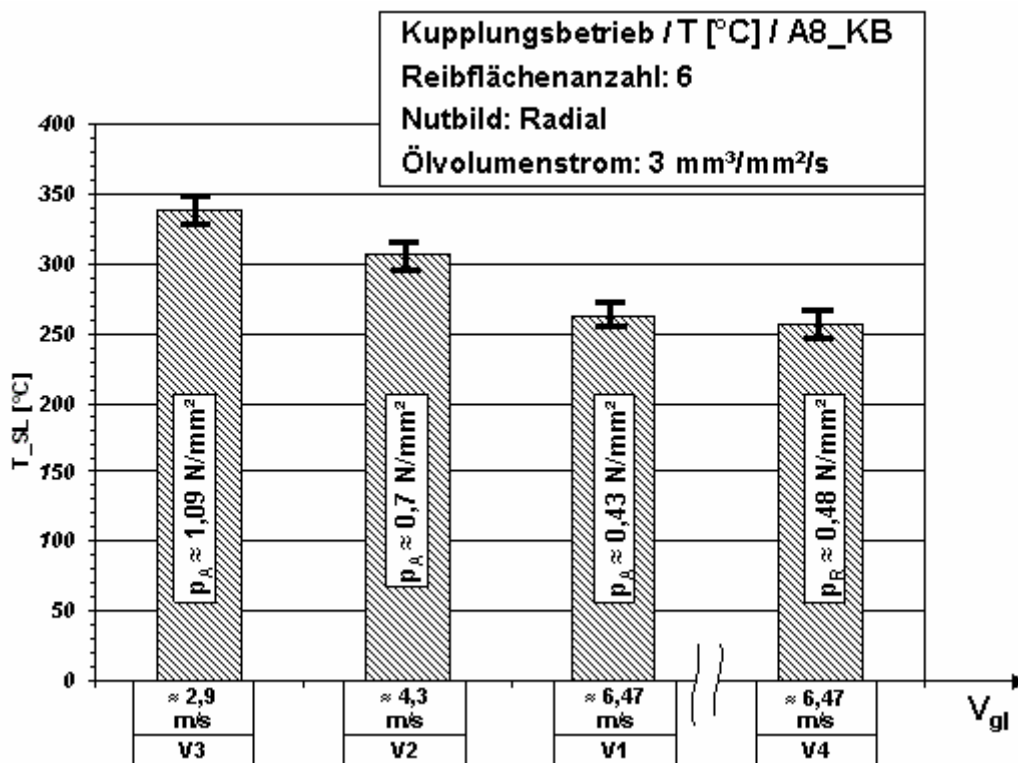


Bild 63: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakets C3_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

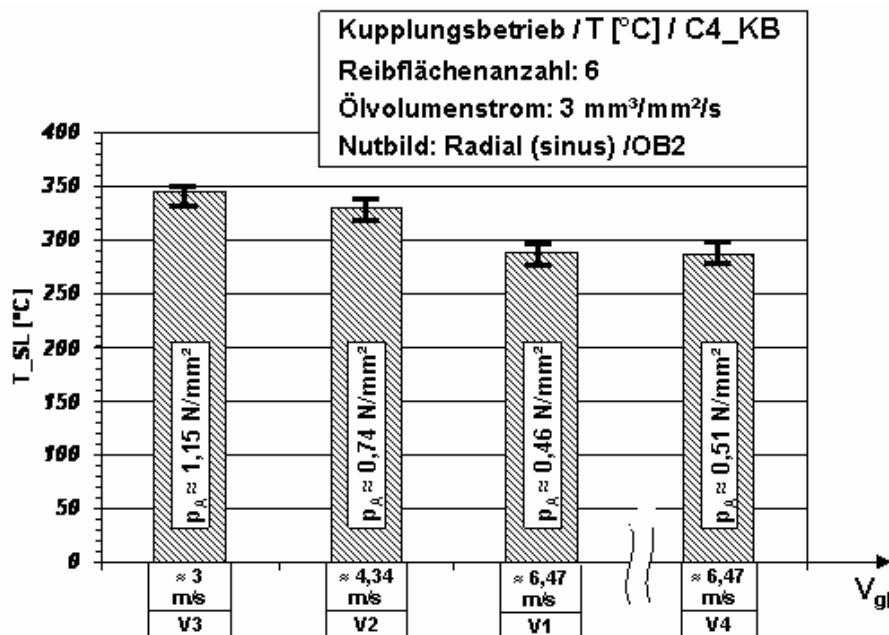


Bild 64: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakets C4_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

A. 13 zeigen, dass die Lamellendickenabnahme nicht von der Lamellenausführung beeinflusst wird. Die Lamellendickenabnahme der einzelnen Lamellen in den Lamellenpaketen C1_KB (plan), C2_KB (sinus) bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s ist vergleichbar. Ebenso ist die Lamellendickenabnahme der einzelnen Lamellen in den Lamellenpaketen C3_KB (plan), C4_KB (sinus) bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 3 mm³/mm²/s vergleichbar.

B.19 bis B.26 zeigen die Rauigkeitsmessungen an den Stahllamellen jeweils vor und nach der Untersuchung. Die gemessenen Rauigkeitswerte an den Stahllamellen C1_KB (plan), C2_KB (sinus), welche bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s betrieben wurden, sind höher als die Rauigkeitswerte der Stahllamellen C3_KB (plan) und C4_KB (sinus), welche bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 3 mm³/mm²/s gefahren wurden.

8.1.4 Versuche zum Einfluss der Reibflächenpaarenanzahl und des Schmierstoffes

8.1.4.1 Versuche zum Einfluss der Reibflächenpaarenanzahl

Aufgrund der Optimierung des Bauraumes und der erforderlichen Momentübertragung wird in der praktischen Anwendung der nasslaufenden Lamellenkupplung die Lamellenanzahl axial variiert. Eine beliebige Erhöhung der Lamellenanzahl ist nicht vorteilhaft, weil die Momentenverteilung an den einzelnen Lamellen nicht gleich ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden Stichversuche D1_KB, D2_KB, D3_KB und D4_KB mit dem Belag OB1 durchgeführt, um den Einfluss der spezifischen Leistungsgrenze auf die Anzahl der Wirkflächenpaare zu untersuchen. Für die Versuche mit den Lamellenpaketen D1_KB,

D2_KB, D3_KB und D4_KB wurde jeweils ein spezifischer Kühlölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt (siehe Tabelle 8). Bild 65 zeigt die Abhängigkeit der spezifischen Leistungsgrenze von der Anzahl der Wirkflächenpaare. Die Anzahl der Wirkflächenpaare hat - unter der hier untersuchten Randbedingung - keinen bzw. nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die spezifische Reibleistungsgrenze.

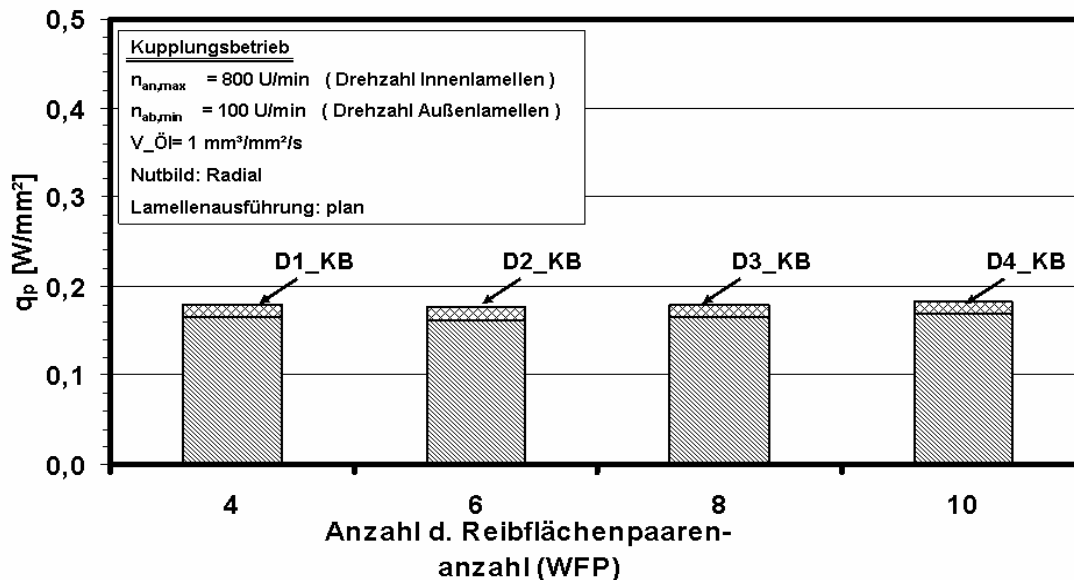


Bild 65: Einfluss der Reibflächenpaarenanzahl auf die spezifische Reibleistungsgrenze für Kupplungsbetrieb (KB)

Weiterhin werden die Stahllamellentemperaturen in den vier Lamellenpaketen D1_KB, D2_KB, D3_KB und D4_KB erfasst. Bild 66 bis Bild 69 zeigen die Stahllamellentemperaturverteilung über die vier Lamellenpakete an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze bei den Versuchen V1, V2, V3 und V4. Es ergibt sich eine etwas höhere Stahllamellentemperatur in den Versuchen V1 bis V4 (niedriger Schlupf, hohes Drehmoment) bei einer Anzahl von 4 Reibflächenpaaren (Bild 69), im Vergleich zu den Versuchen, welche mit 6, 8 und 10 Reibflächenpaaren gefahren wurden. Weiterhin sinkt das Temperaturniveau der Stahllamellen von V3 (niedriger Schlupf) über V2 zu V1 (hoher Schlupf) ab. Die Stahllamellentemperaturen im Versuch V1 und dem Wiederholungsversuch V4 sind hier ebenfalls auf einem vergleichbaren Niveau.

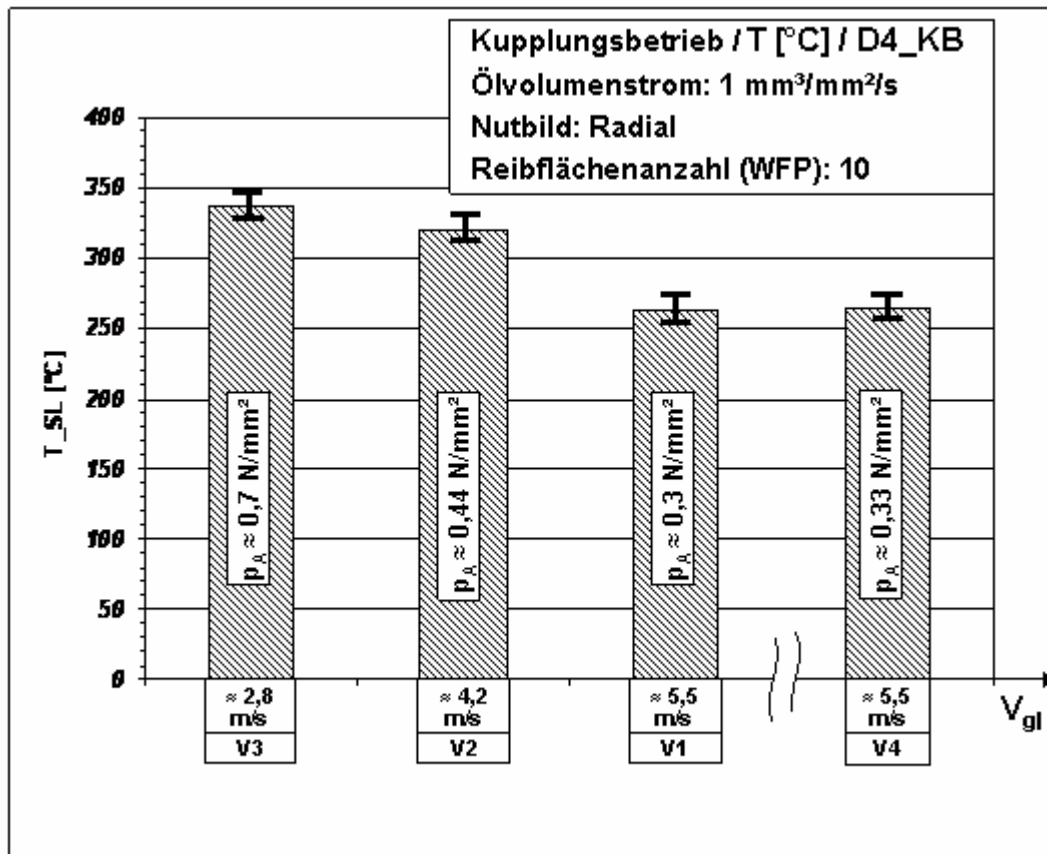


Bild 66: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes D4_KB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

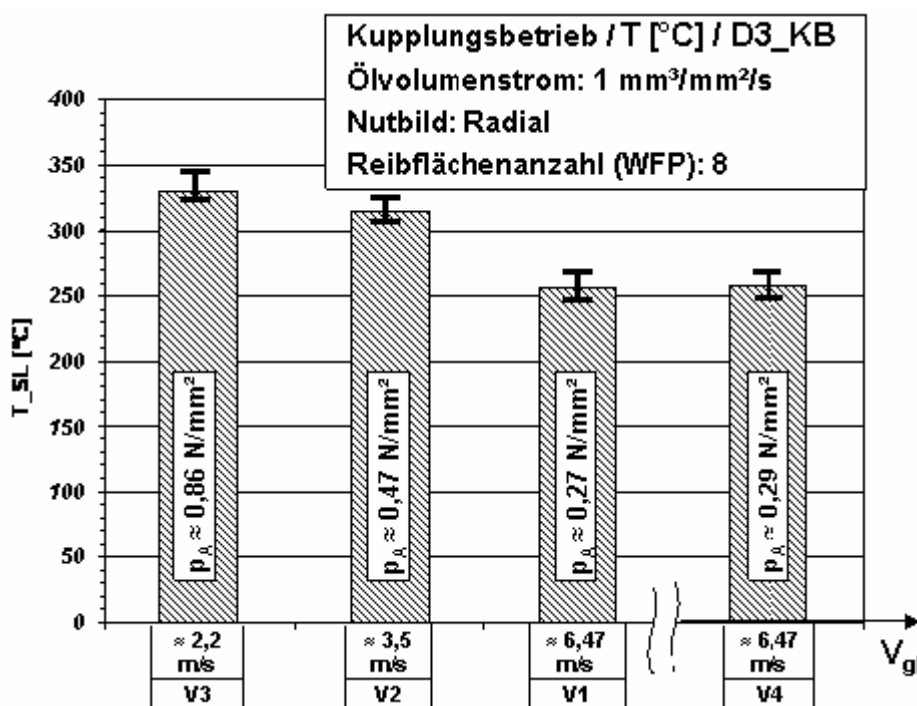


Bild 67: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes (D3_KB) an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

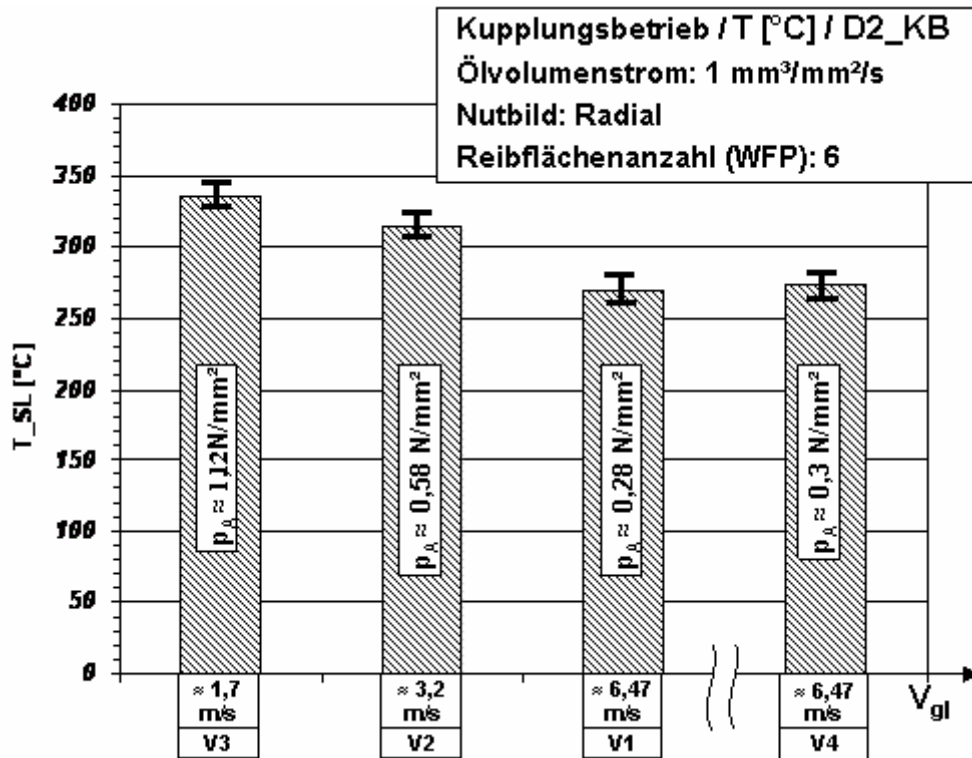


Bild 68: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes D3_KB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

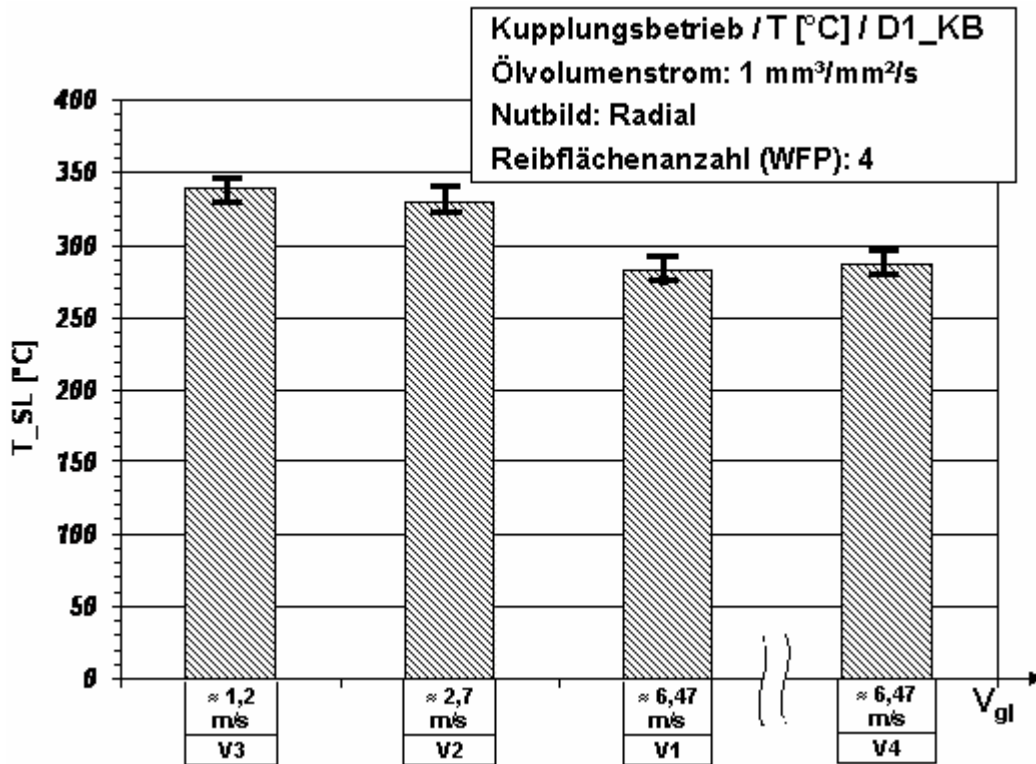


Bild 69: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes D1_KB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

A. 14 bis A. 17 zeigen die Lamellendickenabnahme der vier Lamellenpakete D1_KB, D2_KB, D3_KB und D4_KB an spezifischen Leistungsgrenzen. Aufgrund der besseren Reibmomentverteilung im Lamellenpaket zeigt die Lamellendickenabnahme in den Lamellenpaketen D1_KB (vier aktive Reibflächenpaare) und D2_KB (6 aktive Reibflächenpaare) gleichmäßige Axialkraftverteilung an den einzelnen Lamellen ist. Weiterhin ergibt sich eine etwas höhere Lamellendickenabnahme des Lamellenpaketes D1_KB (vier aktive Reibflächenpaare) eine im Vergleich zur Abnahme der Lamellendicke der Lamellenpakete D2_KB, D3_KB und D4_KB.

8.1.4.2 Versuche zum Einfluss des Schmierstoffs

Um den Einfluss des Schmierstoffes auf die spezifische Reibleistungsgrenze im Kupplungsbetrieb (KB) zu ermitteln, wurden der Einfluss eines alternativen Kühltölschmierstoffes (hier: Öl_B) untersucht: Für das Lamellenpaket D5_KB (6 aktive Reibflächenpaare) wurde ein spezifischer Kühltölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ eingestellt (siehe Tabelle 8). In Bild 70 ist der Einfluss der Ölsorte auf die spezifische Reibleistungsgrenze dargestellt.

Mit dem Motorenöl (Öl_B) erreichte man niedrigere zulässige Reibleistungen (ca. 8 %) und niedrigere Reibwerte als mit Öl_A.

Beide Öle besitzen Friction Modifier, die im Allgemeinen den Reibwert bei kleineren Gleitgeschwindigkeiten, mit zunehmender Kettenlänge der einlegierten Additive, z.B. Karbonsäure oder Alkylamin, absenken. Öl_B besitzt im Vergleich zum Öl_A noch zusätzlich Detergentien, die einen Einfluss auf das Reibwertverhalten von Papierbelägen haben. Besonders die Detergentien des Kalziumsulfonat Typs wirken in Verbindung mit dem basischen Friction Modifier Alkylamin Reibwert senkend im Vergleich zu unlegierten Ölen. Dabei sind z.B. FM Additive aus Karbonsäure stärker Reibwert senkend, als die basischen Alkylamin FM Additive in Verbindung mit AW Additiven⁷⁶. Dies könnte eine Erklärung für den niedrigeren Reibwert von dem in Versuch verwendeten Motorenöl sein. Zudem gehört das Motorenöl zu den biologisch leicht abbaubaren Schmierstoffen, die sich im Allgemeinen niedrigere Reibwerte zeigt, als herkömmliche ATF Öle.

⁷⁶ Mosbach 2002

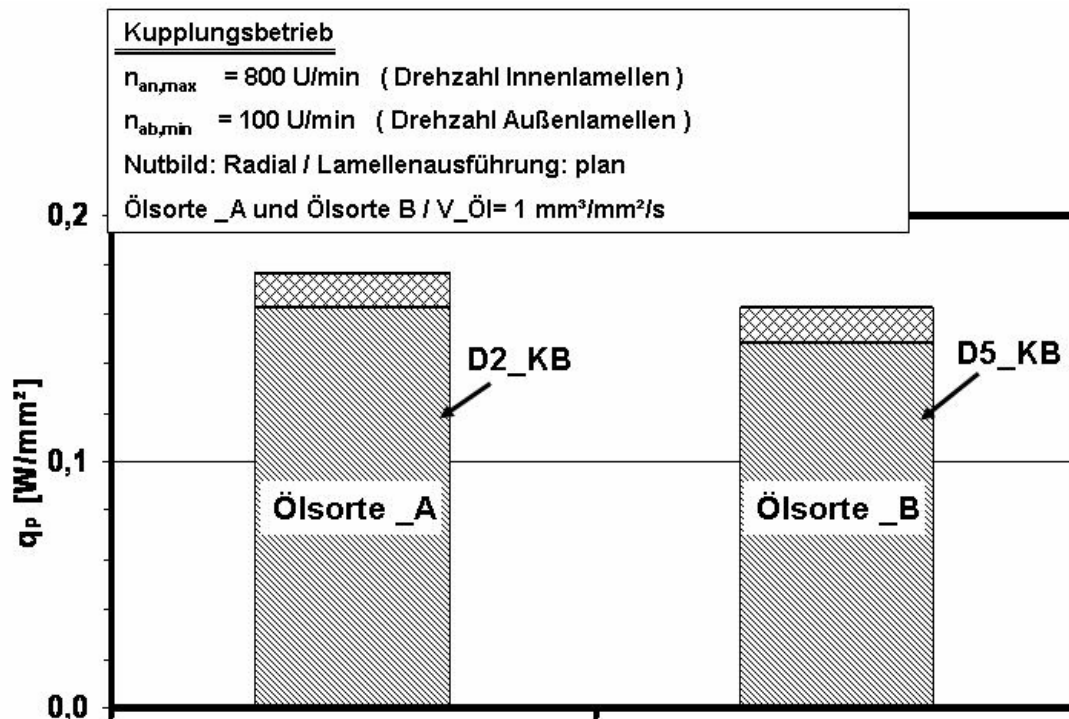


Bild 70: Einfluss des Schmierstoffs auf die spezifische Reibleistungsgrenze im Kupplungsbetrieb (KB)

Stahllamellentemperaturverteilung der Lamellenpaketen D5_KB und D2_KB an der Leistungsgrenze

Bild 71 und Bild 72 zeigen die Stahllamellentemperaturverteilung der zwei Lamellenpakete D5_KB und D2_KB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze bei den Versuchen V1, V2, V3 und V4 unter Einsatz der Ölsorte ÖI_A und ÖI_B. Es wurde eine ähnliche Stahllamellentemperatur bei den Versuchen V1 bis V4 bei jeweils 6 und 8 aktiven Reibflächenzahlen beobachtet. Im Gegensatz dazu zeigen die Stahllamellentemperaturen in den Versuchen V1 bis V4 bei der Ölsorte ÖI_A Abweichungen in Temperaturverhalten in Abhängigkeit der Anzahl der aktiven Reibflächenpaare. Weiterhin sinkt bei beiden Lamellenpaketen das Temperaturniveau der Stahllamellen von V3 (niedriger Schlupf) über V2 zu V1 (hoher Schlupf) ab. Die Stahllamellentemperaturen im Versuch V1 und dem Wiederholungsversuch V4 sind auf einem vergleichbaren Niveau.

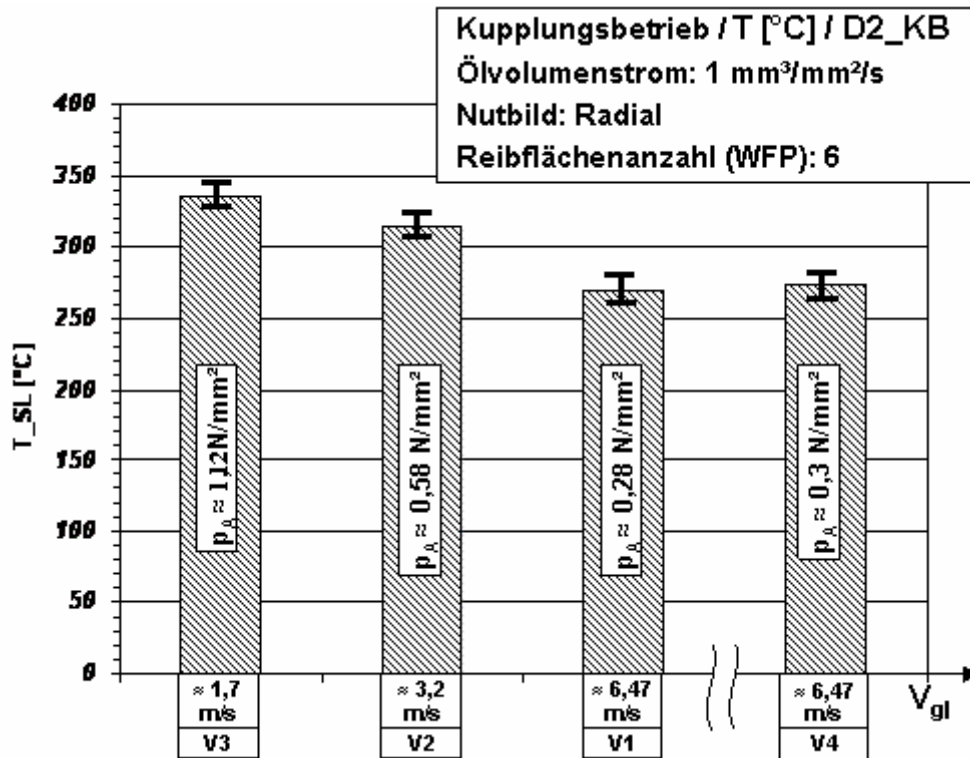


Bild 71: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes D2_KB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

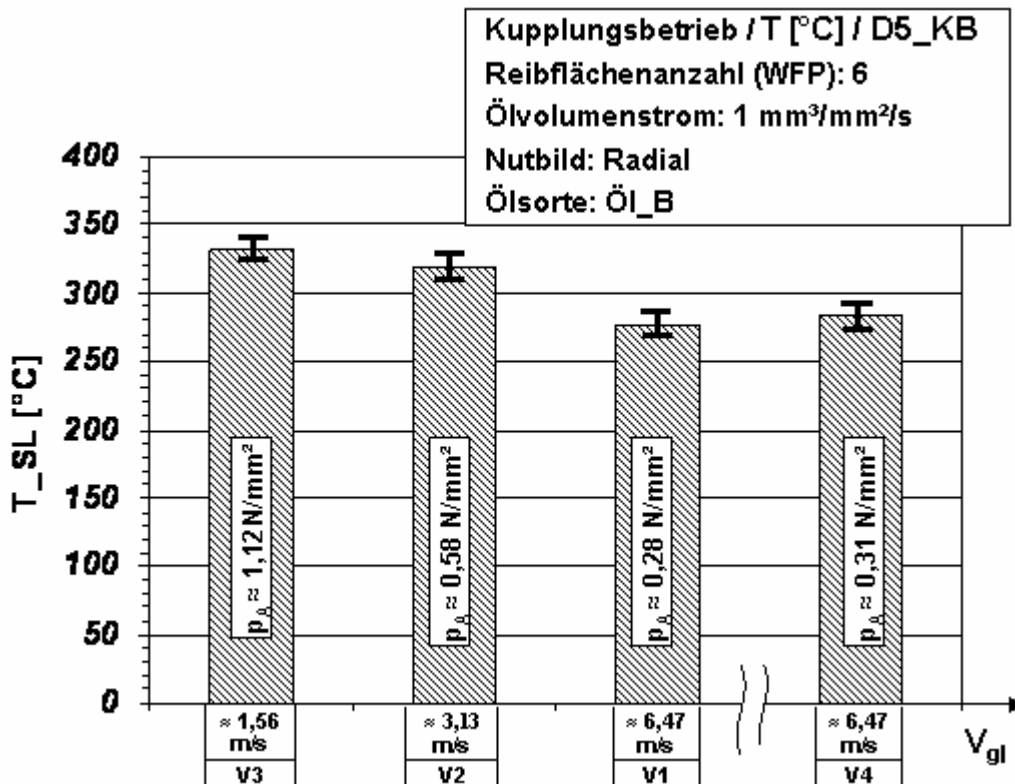


Bild 72: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes D5_KB an der spezifischen Leistungsgrenze bei V1, V2, V3, V4

18 und A. 19 zeigen die Lamellendickenabnahme der zusammen mit dem Kühlschmierstoff ÖI_B eingesetzten Lamellen (siehe Anhang).

Die Lamellendickenabnahmen beim Einsatz des Kühlschmierstoffs ÖI_B (an den Lamellenpaketen D5_KB und D6_KB) sind geringfügig höher als bei den mit Kühlschmierstoff ÖI_A eingesetzten Lamellen.

8.2 Versuche mit sintermetallischen Reibbelägen in der Baugröße II

In der praktischen Anwendung werden nicht nur die organischen Beläge verwendet, sondern auch sintermetallische Beläge. In der thermischen Belastbarkeit sind die Sinterbeläge wegen des besseren Wärmeaufnahme- und Wärmeleitungsvermögens den Papierbelägen tendenziell überlegen. Dieser Vorteil wird jedoch durch die schlechte Anpassung der Sinterbeläge an die Oberfläche der Gegenlamelle teilweise wieder aufgehoben. Durch die ungleichmäßige Pressungsverteilung kommt es zu örtlichen Überbeanspruchungen und damit zur Reduzierung der thermischen Belastbarkeit. Sinterbeläge werden in der Regel eingesetzt, wenn hohe thermische Belastbarkeit, hohe Lebensdauer und geringer Verschleiß gefragt sind und auf Schaltkomfort kein Wert gelegt wird. Typische Anwendung für Sinterbeläge sind Wendegetriebe von Baumaschine und Schiffen sowie nass Bremsen in Landmaschinen und Exzenterpressen^{77,78}.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Sintermetallischen Belag SB mit der Baugröße II Dauerschlupf untersucht.

8.2.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Höhe des Kühlölvolumenstromes

8.2.1.1 Kupplungsbetrieb: Innenlamellendrehzahl $n_{an}=800$ U/min

Aufbauend auf den Versuchen mit organischen Reibbelägen und dem dort gefundenen deutlichen Einfluss der Höhe des Kühlölvolumenstromes auf die Leistungsgrenze im Dauerschlupfbetrieb wurden die entsprechenden Versuche hier mit dem sintermetallischen Reibbelag SB in der Baugröße II durchgeführt (siehe Tabelle 9). Diese Versuche werden mit der Ölsorte ÖI_B und Sintermetallreibbelägen mit einem Waffelmusternutbild durchgeführt. Hier wurde jetzt die erweiterte Versuchsmethodik eingesetzt. Für die Versuchsreihe mit dem Sinterbelag SB beträgt das maximale Moment $T_r=800$ Nm und der maximale Schlupf $n_s=300$ U/min.

In Bild 73 sind die drei Bereiche, Bereich A (stabiler Bereich), Bereich B (quasistabiler Bereich), und Bereich C (kritischer Bereich) dargestellt. Weiterhin zeigt Bild 73 an Hand der durchgeführten Versuche mit den drei Lamellenpaketen E3_KB, E6_KB und E9_KB im Kupplungsbetrieb (KB), dass durch die Erhöhung des Kühlölvolumenstromes die spezifische

⁷⁷ Bergheim 1997

⁷⁸ Hämmerl 2003

Leistungsgrenze q_{pG} für den SB deutlich erweitert werden kann. Analog zu den mit Papierreibbelägen durchgeführten Versuchen, wird für jeden spezifischen Kühlölvolumenstrom die spezifische Leistungsgrenze ermittelt. Die spezifische Reibleistungsgrenze wird hierbei durch die festgelegten Abbruchkriterien, (siehe Bild 19), ermittelt. Bild 73 zeigt drei unterschiedlich schraffierte Bereiche. Zwischen den einzelnen Bereichen liegt jeweils ein schmales Band. Dieses entsteht durch die Streuung des Reibwertabfalls bei der Auswertung von 9% bis 11% zwischen dem Versuch V1 und dem Wiederholungsversuch V4. Die Wiederholungsgenauigkeitsmessung zur Bestimmung der Leistungsgrenze ist daher sehr gut.

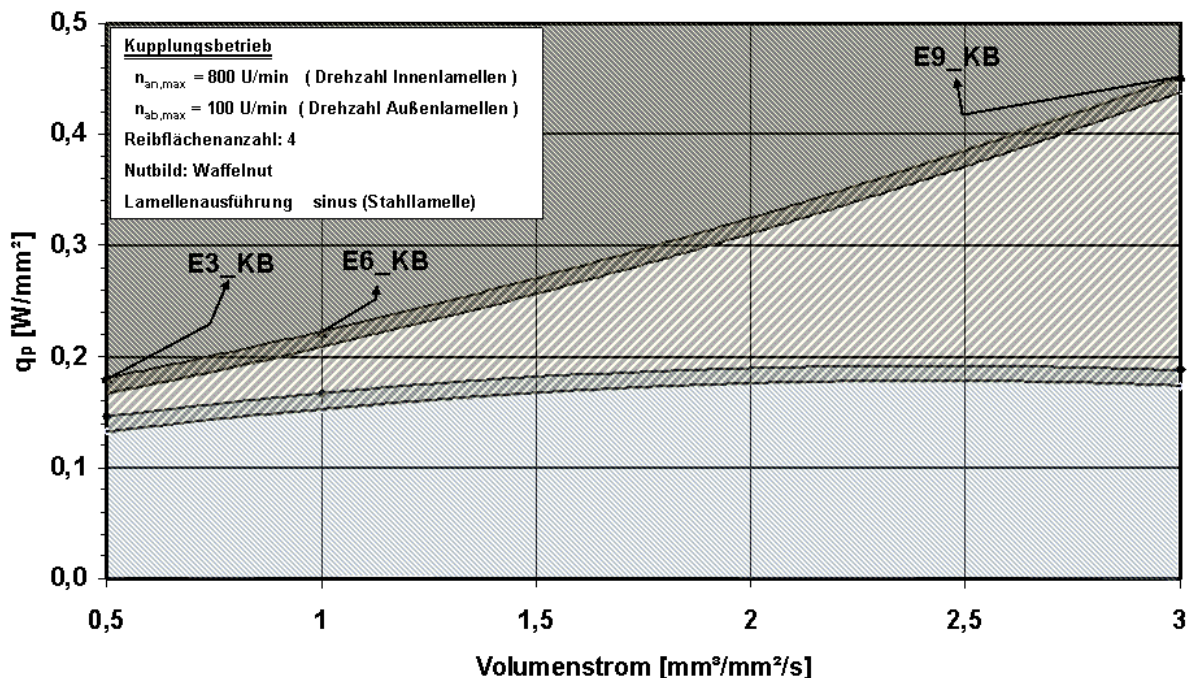


Bild 73: Einfluss der Kühlölmenge auf die spezifische Reibleistungsgrenze im Kupplungsbetrieb (KB)/ Betriebspunkt 800 U/min. Die Sinterlamellen Baugröße II

Temperaturverteilung an den Stahllamellen bei den Lamellenpaketen E3_KB, E6_KB und E9_KB an der Leistungsgrenze

Die Stahllamellentemperatur ist ein entscheidendes Kriterium für die Auslegung der nasslaufenden Lamellenkupplung. Eine höhere Temperatur in der Reibfläche des Sinterbelages löst den Effekt des „Sinterübertragung“ aus. Dieser Effekt hat einen starken Einfluss auf den Reibwertverlauf, sowie die Lebensdauer der Kupplung. Die Sinterpartikel lösen sich meistens bei höherer Temperatur aus dem Sinterbelag aus und werden von den Innenlamellen auf die Stahllamellen und wieder von den Stahllamellen auf Sinterlamellen übertragen. Dieser Effekt verursacht manchmal auch eine Reibmomentschwankung.

Für die durchgeführten Versuche mit dem Sinterbelag SB wird die Stahllamellentemperatur erfasst. Die Auswertung der erfassten Stahllamellentemperaturen erfolgt in der Laststufe (Beharrungstemperatur) nach 90% der Versuchsdauer (siehe Bild 37) durch Mittelwertbildung der drei (T_{SL_A} ; T_{SL_M} ; T_{SL_I}) Temperatursignale.

Entsprechend der in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Vorgehensweise wurde die Verteilung der Temperaturen über eine Stahllamelle erfasst. Bild 74 bis Bild 76 stellen die Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete E3_KB, E6_KB und E9_KB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze jeweils bei den Versuchen V1, V2, V3 dar. Die gemittelten Stahllamellentemperaturniveaus der Lamellenpakete liegen zwischen ca. 250 °C und 240 °C. Hier zeigen sintermetallischen Beläge eindeutig höhere thermische Belastbarkeiten wegen des besseren Wärmeaufnahme- und Wärmeleitungsvermögens gegenüber den Papierbelägen auf. Im Vergleich mit einem untersuchten organischen, waffelgenuteten Belag OB3 zeigt das Temperaturniveau der Stahllamelle von V3 (niedriger Schlupf) über V2 zu V1 (hoher Schlupf) keine signifikante Temperaturabnahme. Die Innentemperatur (T_{SL_I}) in 20 mm Tiefe für die drei Lamellenpakete liegt zwischen 215 °C und 230 °C. Aufgrund des relativ geringen Schlupfunterschieds zwischen V1 und V3 wurde der Versuch V2 mit einem spezifischen Kühllölvolumenstrom von 3 mm³/mm²/s (E9_KB) nicht durchgeführt.

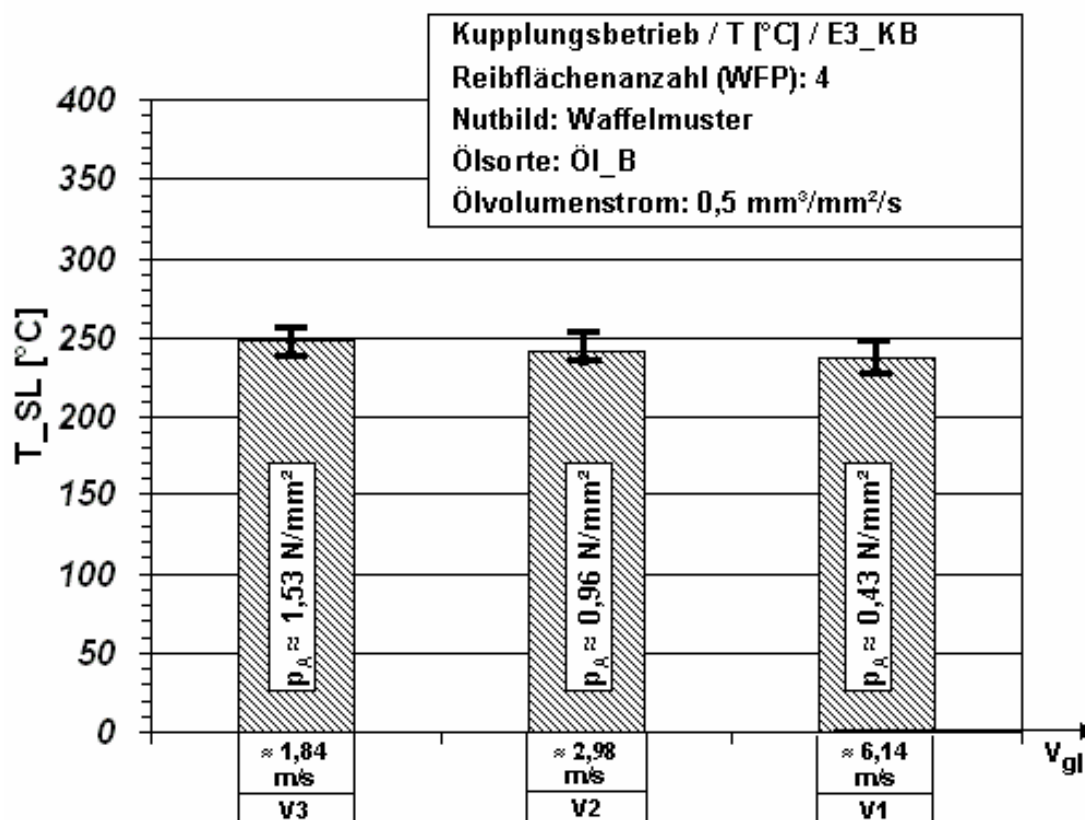


Bild 74: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes E3_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

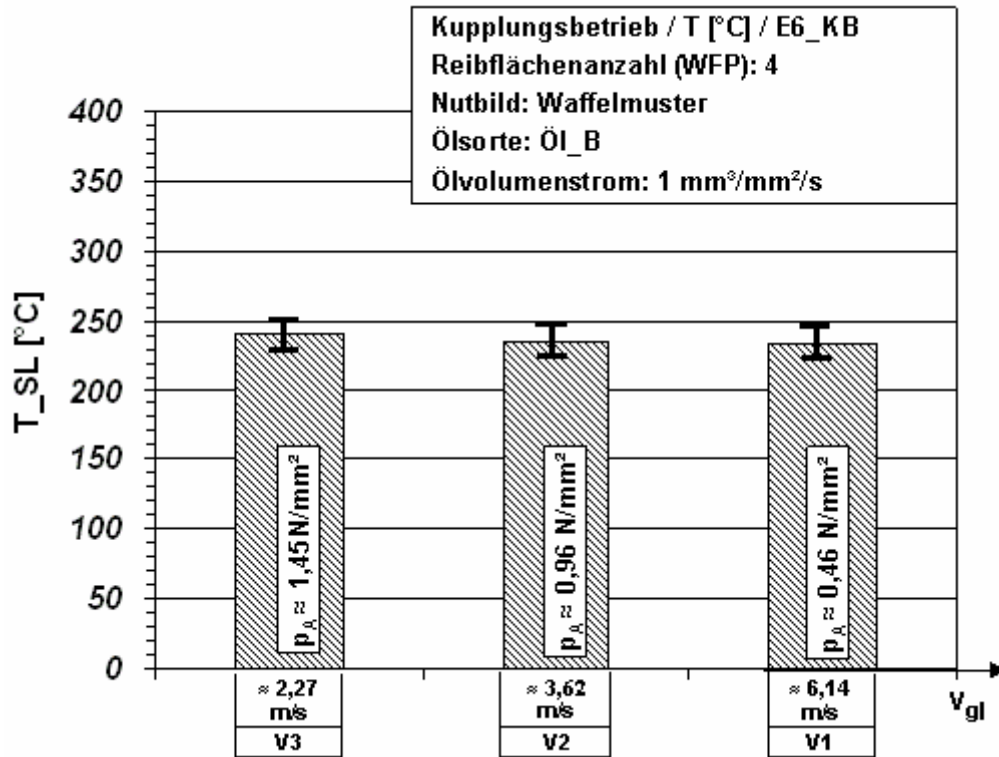


Bild 75: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes E6_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

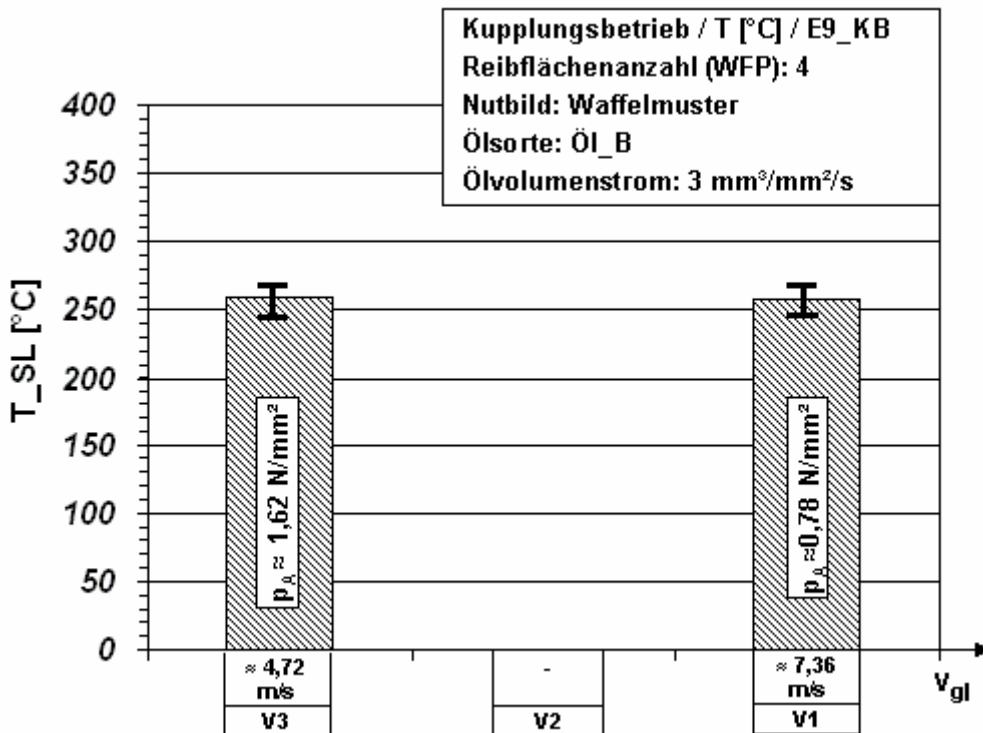


Bild 76: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes E9_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

8.2.1.2 Typischer Reibwertverlauf in der Laststufe

An Hand der oben untersuchten Lamellenpakete E3_KB, E6_KB und E9_KB konnte nachgewiesen werden, dass der Reibwertverlauf und das Reibwertverhalten an der Leistungsgrenze in der Laststufe bei drei verschiedenen spezifischen Ölvolumenströmen von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$, $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ und $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ sich signifikant unterscheidet. Der Reibwertverlauf wird in Bild 77 ausschließlich in der Laststufe dargestellt. Der Reibwertverlauf wurde für die verschiedenen Kühllölvolumenströme jeweils vergleichend für den Versuchspunkt V1 dargestellt.

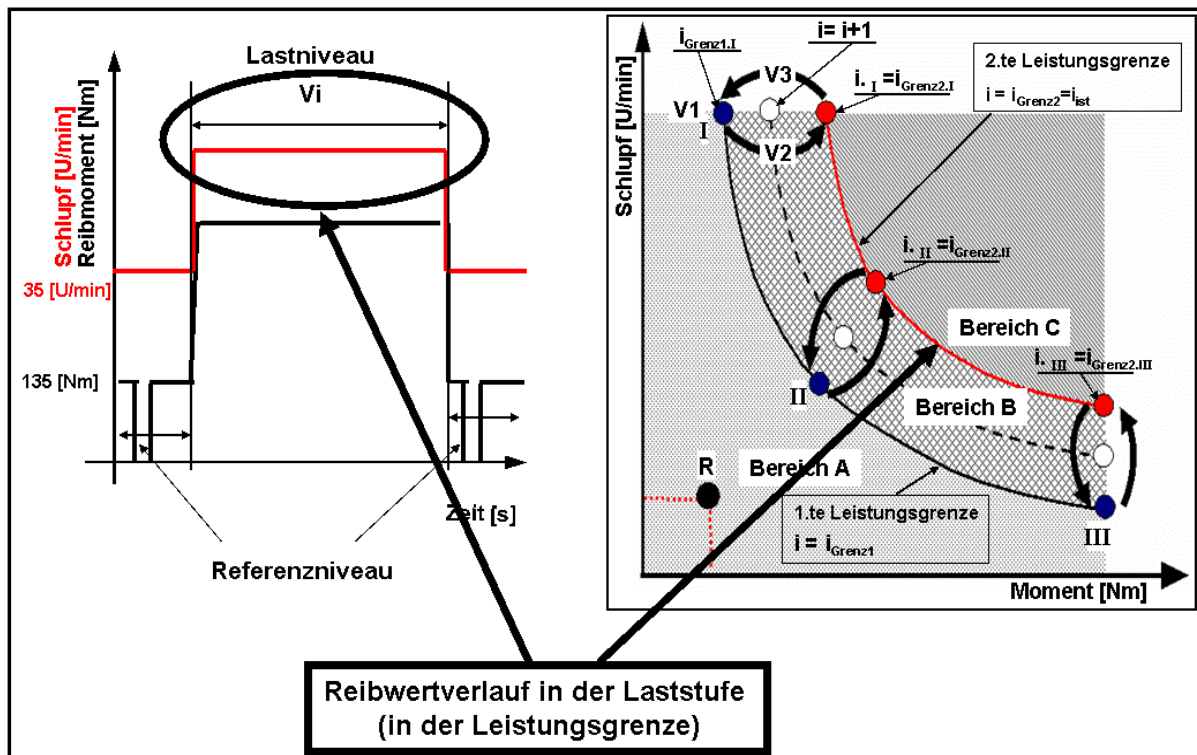


Bild 77: Definition des Bereiches Laststufe

Reibwertverlauf bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

Bild 78 zeigt den Druck- und der Reibwertverlauf des Lamellenpaketes E3_KB beim Versuch V1 (hoher Schlupf) an der definierten Leistungsgrenze. Der Reibwertverlauf bei dem eingestellten spezifischen Ölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ bleibt zunächst in der Höhe konstant, gegen Ende der Laststufe fällt der Reibwert um ca. 13 % ab. Über den Verlauf können überlagerte Schwingungen mit nahezu konstanter Amplitude beobachtet werden.

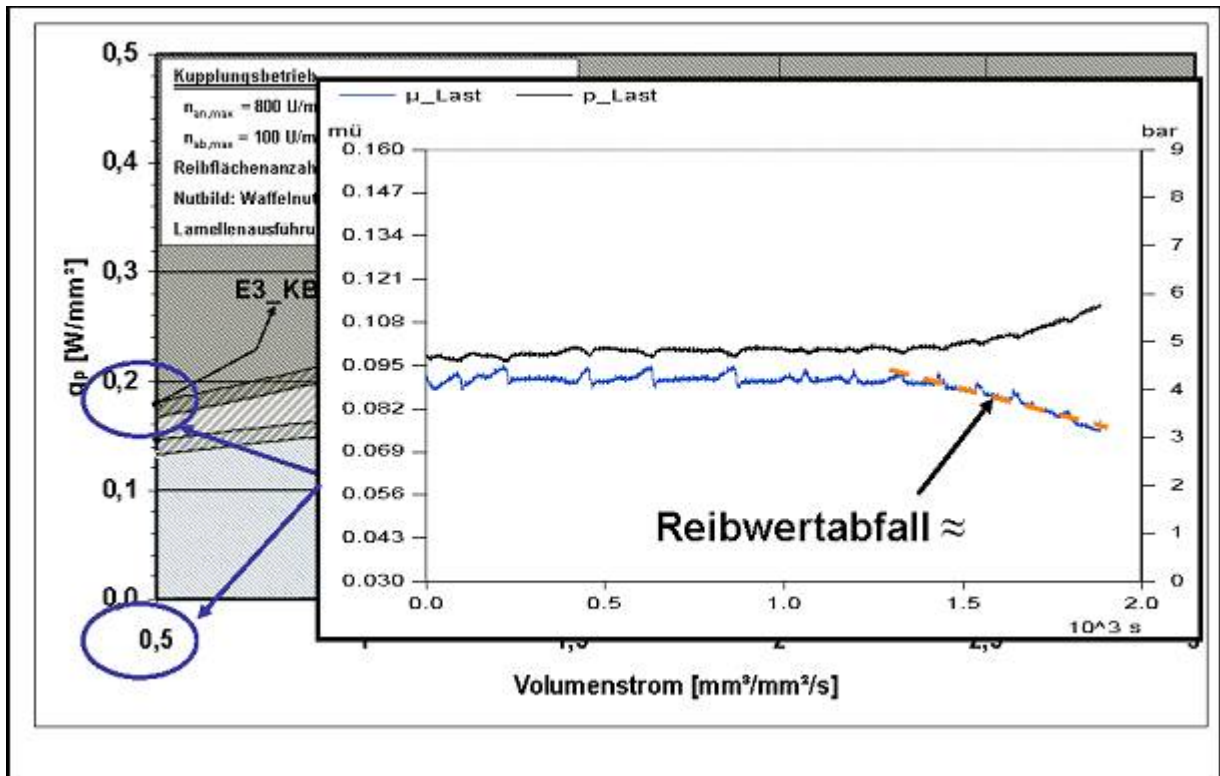


Bild 78: Reibwertverlaufes in der Laststufe beim Versuch V1 an der Leistungsgrenze des Lamellenpaketes E3_KB (spez. Ölvolumenstrom 0,5 mm³/mm²/s)

Reibwertverlauf bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von 1 mm³/mm²/s

Im Bild 79 wird der typische Druck- und der Reibwertverlauf des Lamellenpaketes E6_KB bei dem Versuch V1 (hoher Schlupf) in der Laststufe an der Reibleistungsgrenze dargestellt. Der Reibwertverlauf bei einem eingestellten spezifischen Ölvolumenstrom von 1 mm³/mm²/s schwingt mit nahezu konstanter Amplitude und steigt minimal am Anfang der Laststufe an. In der zweite Hälfte der Versuchsdauer fällt der Reibwert kontinuierlich (ca. 12 %) ab.

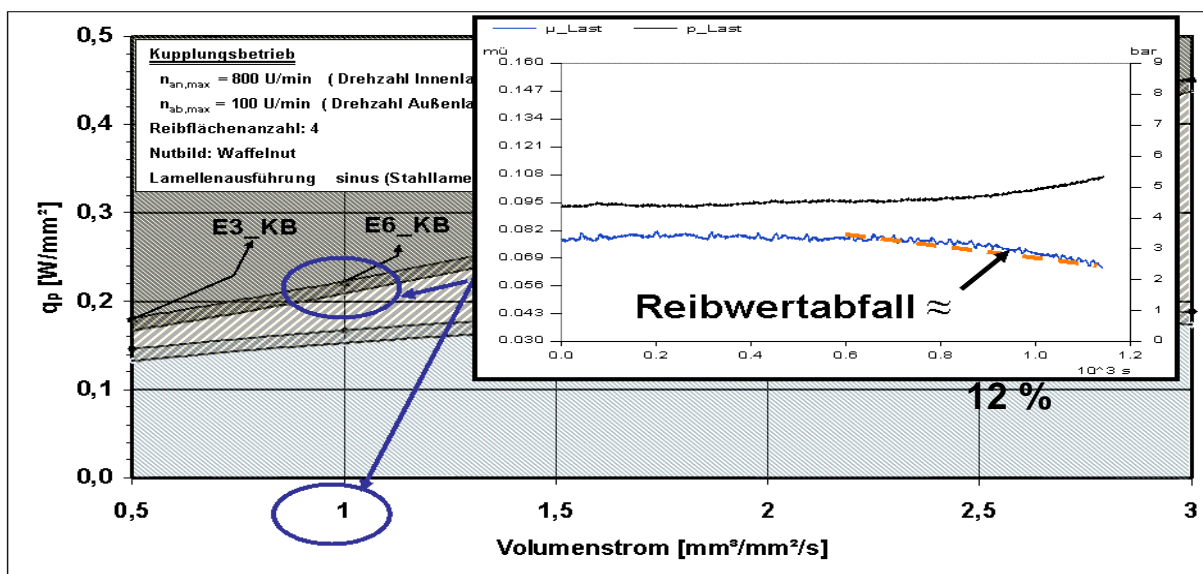


Bild 79: Reibwertverlaufes in der Laststufe beim Versuch V1 an der Leistungsgrenze des Lamellenpaketes E6_KB (spez. Ölvolumenstrom 1 mm³/mm²/s)

Reibwertverlauf bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

Bild 80 zeigt einen typischen Druck- und der Reibwertverlauf des Lamellenpaketes E9_KB bei dem Versuch V1 (hoher Schlupf) in der Laststufe an der Reibleistungsgrenze. Der Reibwertverlauf bei dem eingestellten spezifischen Ölvolumenstrom von $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ schwingt mit hoher, nahezu konstanter Amplitude und fällt kontinuierlich (ca. 12 %) ab. Der Reibwert bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ schwingt stärker als bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ oder einem spezifischen Ölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$. Der Reibwert fällt, im Gegensatz zum Reibwert bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ oder einem spezifischen Ölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ im Mittel kontinuierlich ab.

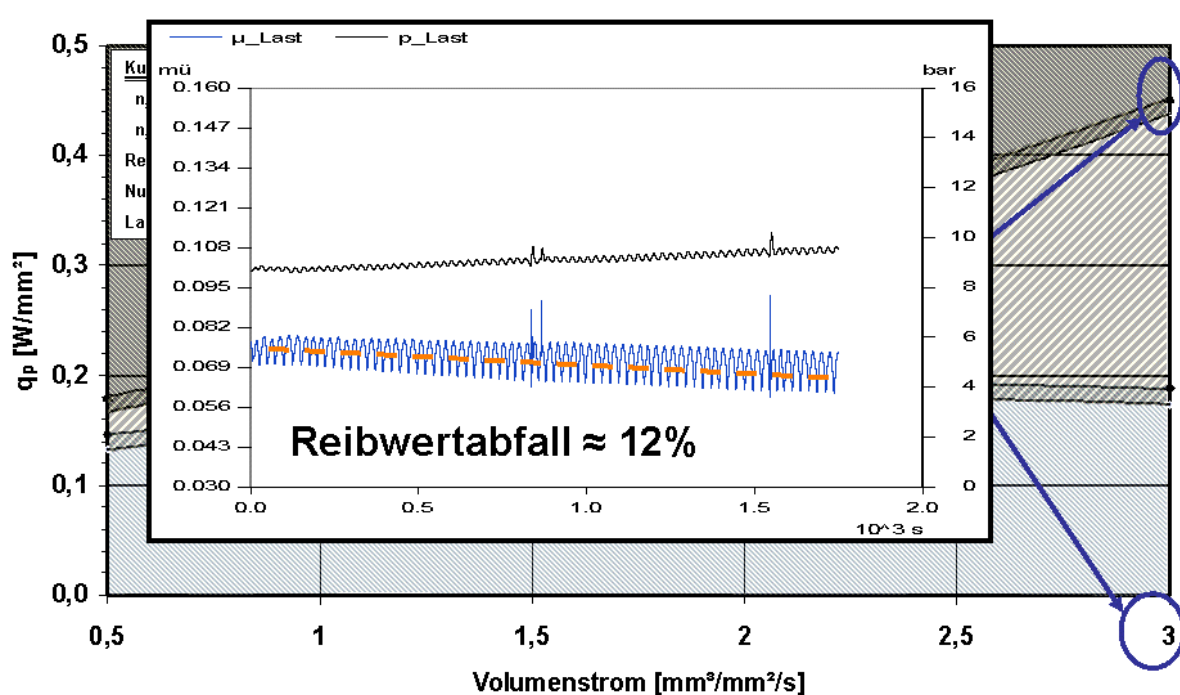


Bild 80: Reibwertverlaufes in der Laststufe beim Versuch V1 in der Leistungsgrenze des Lamellenpaketes E9_KB (bei spez. Ölvolumenstrom $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$)

Bild 81 zeigt eine vergleichende Auswertung der Stahllamellendicke im neuen und im eingelaufenen Zustand. Die Dargestellte Vermessung gilt für die drei Lamellenpakete E3_KB, E6_KB und E9_KB. Alle drei Lamellenpakete wurden mit einer Innenlamellendrehzahl von 800 U/min (Kupplungsbetrieb) belastet. Durch die radiale Vermessung vom Innen- bis zum Außendurchmesser des aktiven Reibbereiches ist ein (im Axialschnitt betrachtet) keilförmiger, nach außen hin steigender Verschleißangriff zu erkennen. Die Verschleißtiefe beträgt am Reibaußendurchmesser im Mittel ca. 0,025 mm.

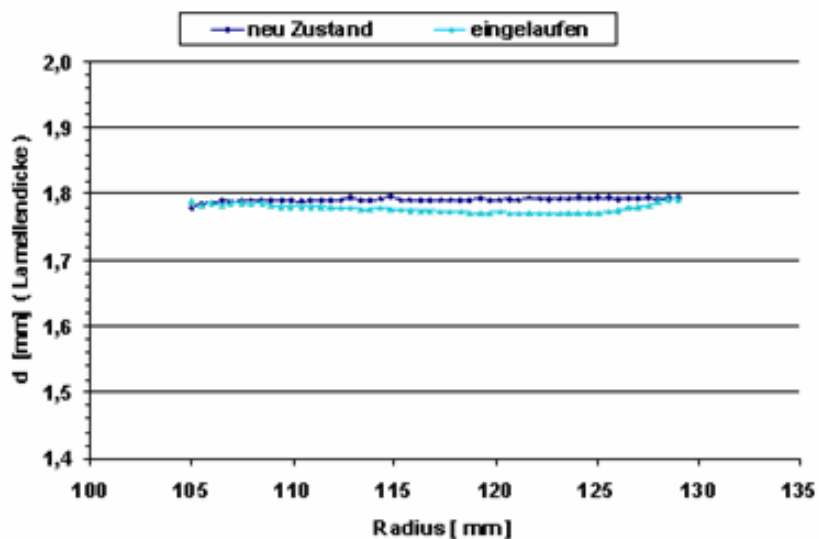


Bild 81: Vergleichende Vermessung der Lamelldicke: neue und eingelaufene Lamellen (exemplarisch)

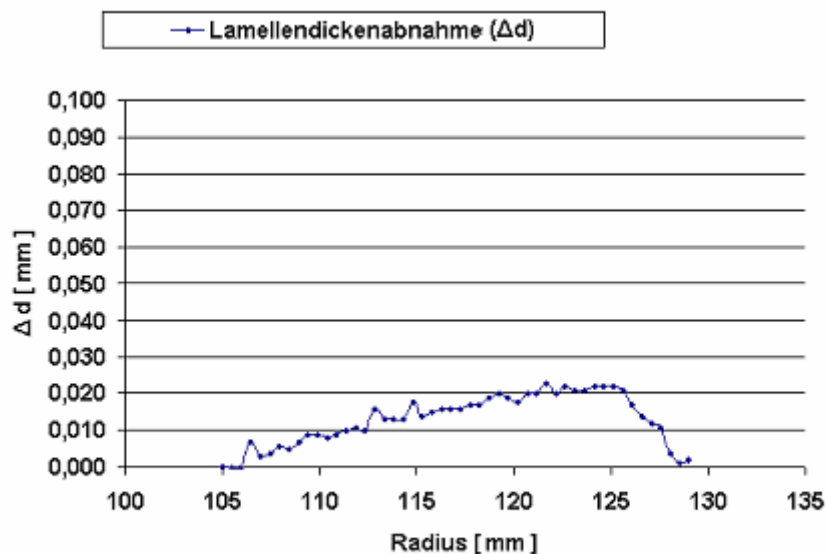


Bild 82: Verschleiß der Stahllamelle nach Versuch Zustand

Neben der Verschleißbeobachtung werden die Oberflächenrauigkeit vor und nach der Untersuchung gemessen. Aufgrund der hohen Oberflächenrauigkeit des Sinterbelages wird die Stahllamelle sehr stark gegriffen und ist nach der Untersuchung geglättet. Bild 83 und Bild 84 zeigen eine typische Rauigkeitsmessung der Stahllamellenoberfläche vor- und nach der Untersuchung der Lamellenpakete E3_KB, E6_KB und E9_KB.

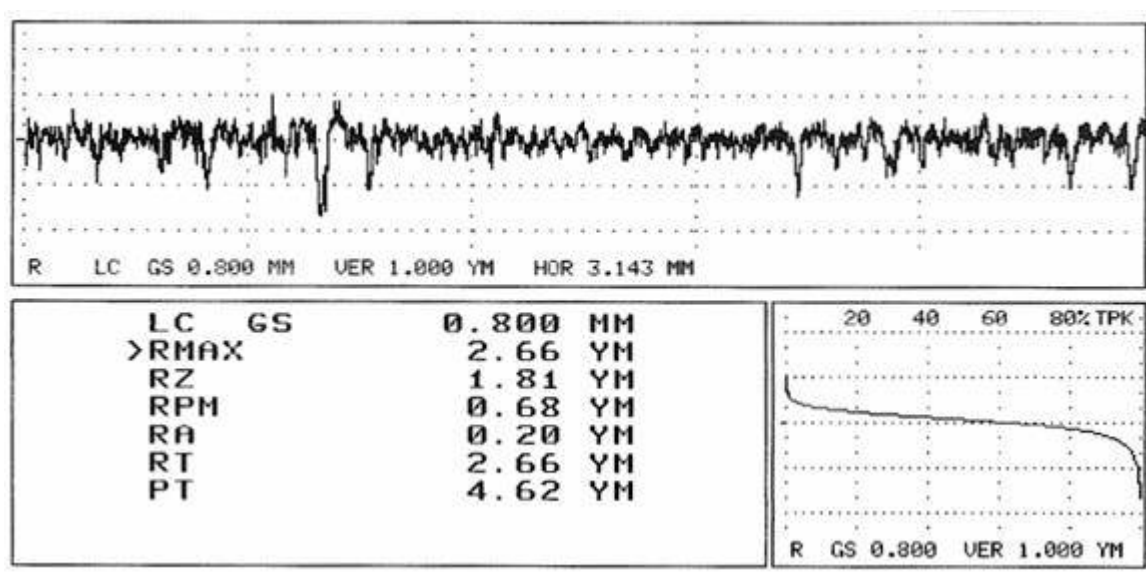


Bild 83: Typische Rauheitsmessung neuen Zustand (exemplarisch)

Bild 112 zeigt, dass die Rauheit im Bereich der Reibflächen gegenüber dem Neuzustand (Bild 111) deutlich eingelätet ist.

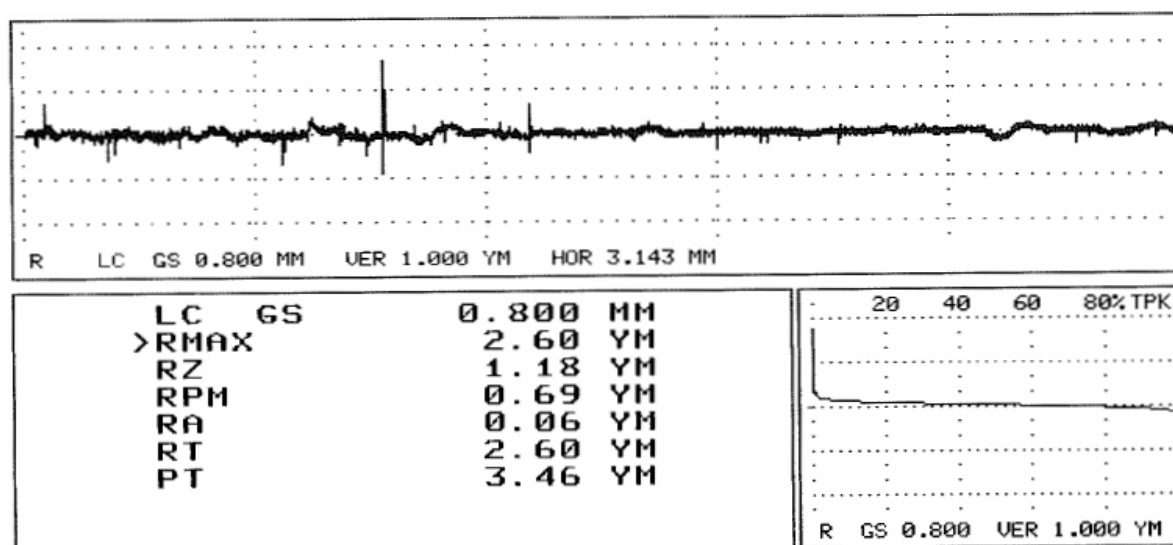


Bild 84: Rauheitsmessung an einer belasteten Lamelle

8.2.1.3 Kupplungsbetrieb: Innenlamellendrehzahl $n_{an} = 400$ U/min

Die Untersuchungen des Betriebspunktes 800 U/min im Kupplungsbetrieb zeigen, dass die Variation des Ölvolumenstroms einen deutlichen Einfluss auf die spezifische Leistungsgrenze hat. Um den Einfluss der Absolutdrehzahl n_{an} (Innenlamellendrehzahl) zu ermitteln, wurde die Absolutdrehzahl n_{an} von 800 U/min auf 400 U/min reduziert (Tabelle 9). Die Ergebnisse der Untersuchung des Betriebspunktes 400 U/min sind in Bild 85 dargestellt. Die durchgeführten Versuche an den Lamellenpaketen E2_KB, E5_KB und E8_KB zeigen auch hier, dass durch die Erhöhung des Ölvolumenstroms die spezifische Leistungsgrenze q_{pG} für die Absolutdrehzahl $n_{an} = 400$ U/min (Innenlamellendrehzahl) deutlich erhöht werden

kann. Weiterhin zeigen die Messergebnisse, dass die spezifische Leistungsgrenze bei einer Absolutdrehzahl von 800 U/min und gleichen spezifischen Kühlölvolumenströmen (Bild 108) höher ist, als die spezifische Leistungsgrenze bei einer Absolutdrehzahl von 400 U/min, d.h. die Kühlwirkung bzw. die Wärmeübertragung der nasslaufenden Kupplung unter Dauerschlupf nimmt mit der Zunahme der Absolutdrehzahl zu, weil die Fliehgeschwindigkeit des Kühlöls einen Einfluss auf die Kühlölverteilung hat. (siehe Kapitel 9.3)

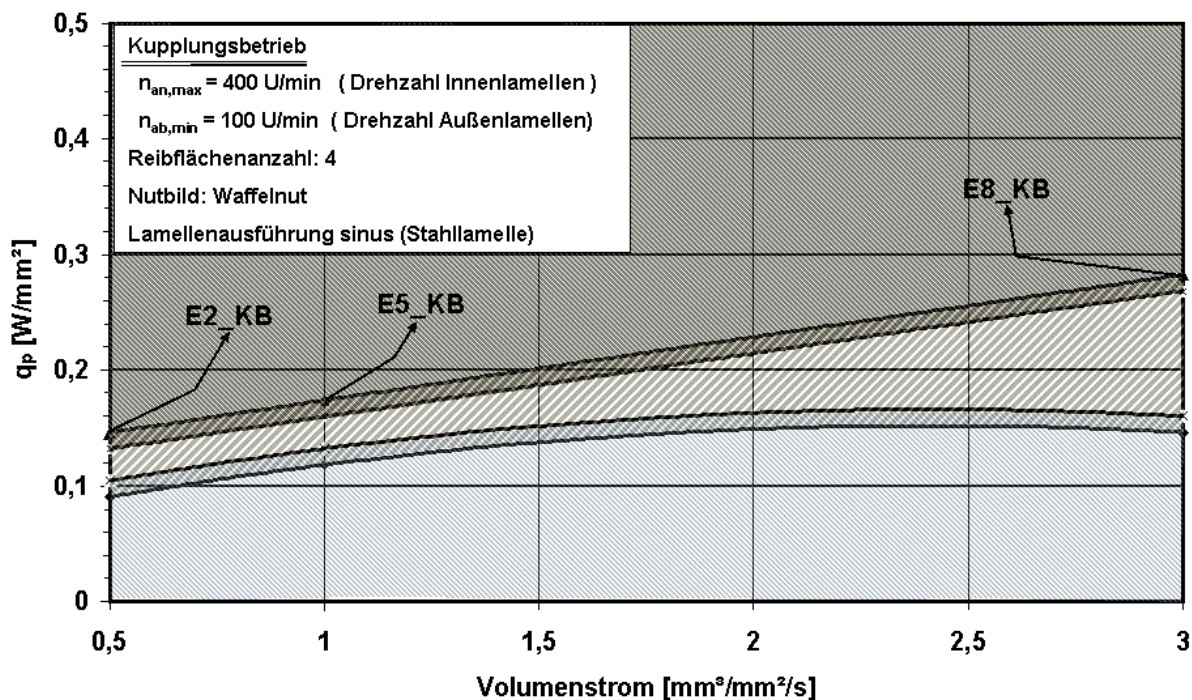


Bild 85: Einfluss der Kühlölmenge und der Absolutdrehzahl auf die spezifische Reibleistungsgrenze für Kupplungsbetrieb (KB) /Betriebspunkt 400 U/min

Stahllamellentemperaturverteilung der Lamellenpaketen E2_KB, E5_KB und E8_KB an der Leistungsgrenze

Wie bereits bei den Versuchen mit der Absolutdrehzahl 800 U/min werden die Stahllamellentemperatur erfasst. Bild 86 bis Bild 88 stellen die Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete E2_KB, E5_KB und E8_KB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze bei den Versuchen V1, V2, V3 dar. Das Temperaturniveau der Stahllamelle ist von V3 (niedriger Schlupf) über V2 zu V1 (hoher Schlupf) ähnlich. Hierbei ist das Temperaturniveau bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von 3 mm³/mm²/s bei den Versuchen V1 und V3 etwas höher als das Temperaturniveau bei einem spezifischen Ölvolumenstrom von 1 mm³/mm²/s und 0,5 mm³/mm²/s.

Allgemein ist das Stahllamellentemperaturniveau des Kupplungsbetriebes (KB) für die beiden Absolutdrehzahl 400 U/min und 800 U/min ähnlich, obwohl die ermittelten spezifischen Reibleistungen unterschiedlich sind. Die Innentemperatur (T_{SL_I}) in 20 mm Tiefe für die drei Lamellenpakete liegt zwischen 215 °C und 230 °C.

Aufgrund des kleinen Schlupfunterschieds zwischen V1 und V3 wurde der Versuch V2 mit einem spezifischen Ölvolumenstrom 3 mm³/mm²/s nicht durchgeführt.

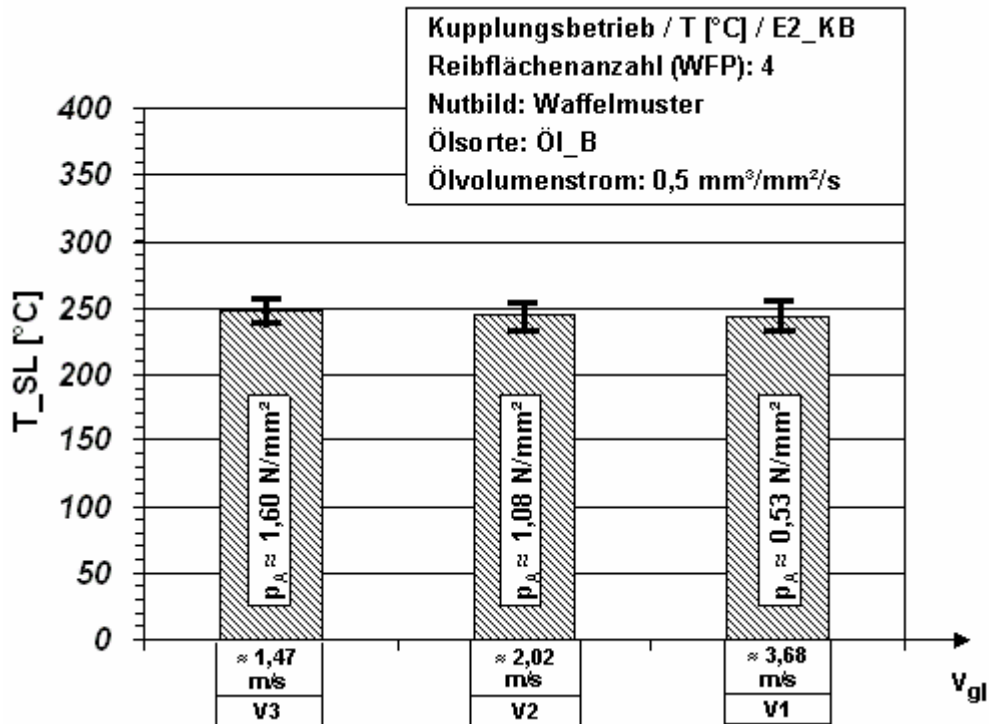


Bild 86: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes E2_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

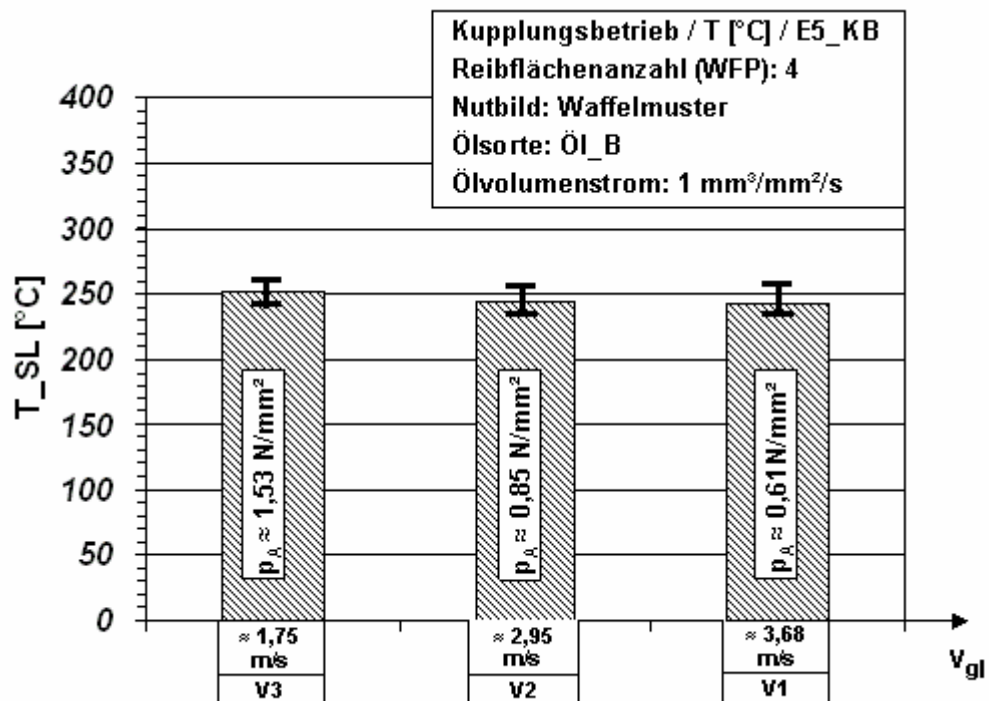


Bild 87: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes E5_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

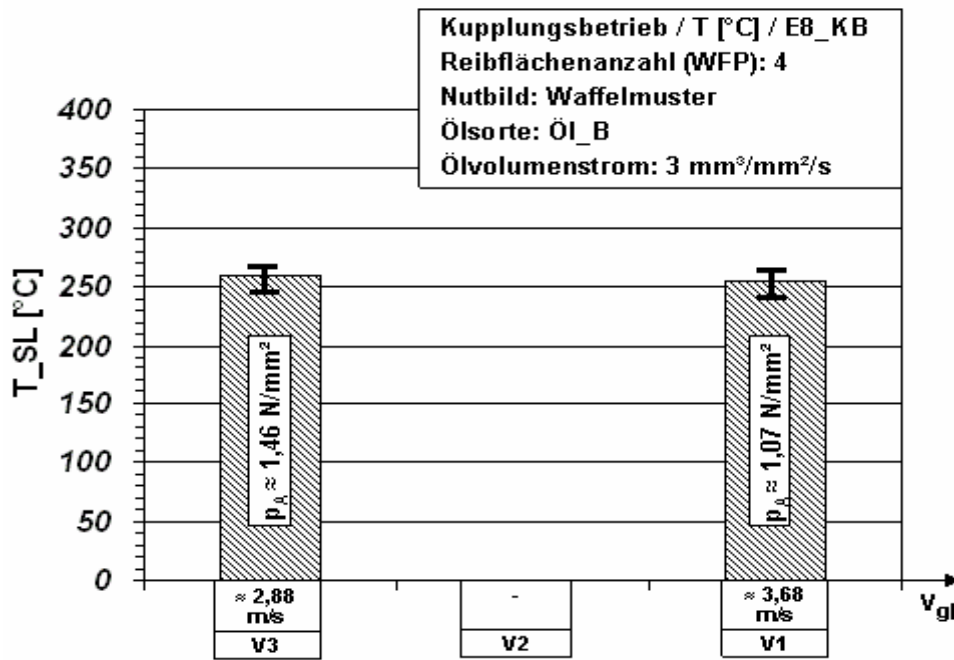


Bild 88: Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpaketes E8_KB an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

Wie bereits im Kupplungsbetrieb 800 U/min wird die Stahllamellendicke vor und nach der Untersuchung gemessen. Bild 89 zeigt eine typische Auswertung der Stahllamellenvermessung im neuen und nach Versuch Zustand. Die dargestellte Vermessung gilt für die Lamellenpakete E2_KB, E5_KB und E8_KB. Diese wurden mit einer Innenlamellendrehzahl 400 U/min (Kupplungsbetrieb) belastet. Durch die radiale Vermessung vom Innen- hin zum Außendurchmesser der aktiven Reibfläche ist ein (im Axialschnitt betrachtet) keilförmiger, nach außen hin steigender Verschleißangriff zu erkennen, weil die Flächenpressung der Reibpaarung nicht optimiert ist. Die Verschleißtiefe beträgt am Reib-Außendurchmesser ca. 0,02 mm.

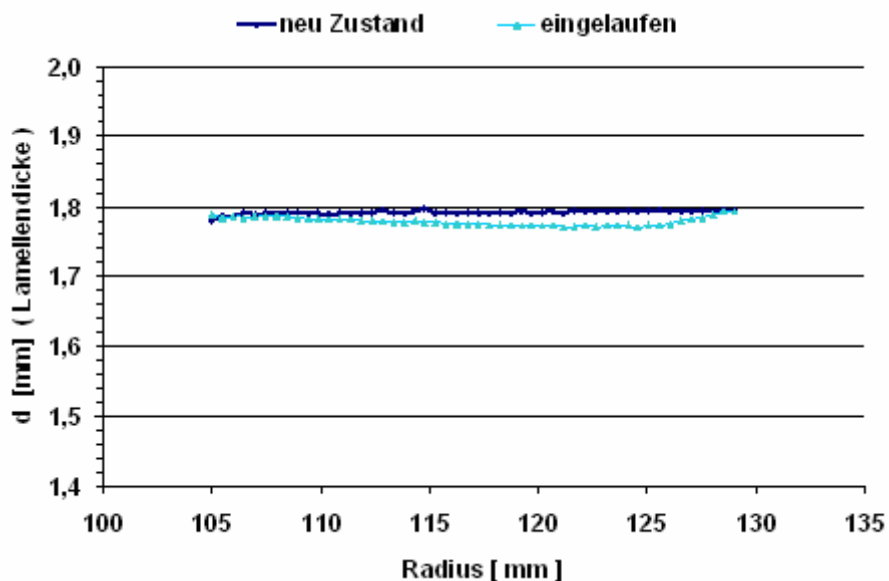


Bild 89: Vergleichende Lamelledickenvermessung

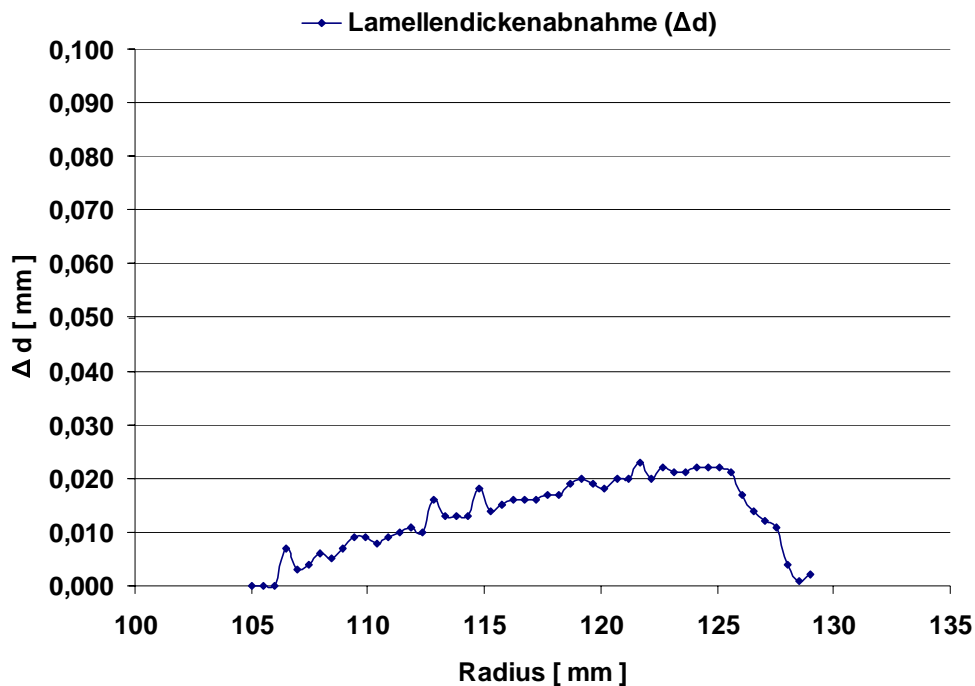


Bild 90: Verschleiß der Stahllamelle nach Versuch Zustand.

Aufgrund der ungleichmäßigen Flächenpressung wird die Stahllamellenoberfläche unterschiedlich belastet. Die Rauheitsmessung der Stahllamelle nach der Untersuchung zeigen, dass die Stahllamellen von den Sinterlamellen im äußeren Bereich mehr als inneren Bereich gegriffen wurden (Bild 91 und Bild 92). Bild 91 und Bild 92 zeigen eine typische Rauheitsmessung der Stahllamellen Vor- und nach der Untersuchung der drei Lamellenpakete E2_KB, E5_KB und E8_KB bei einer Innenlamellendrehzahl von 400 U/min (Kupplungsbetrieb).

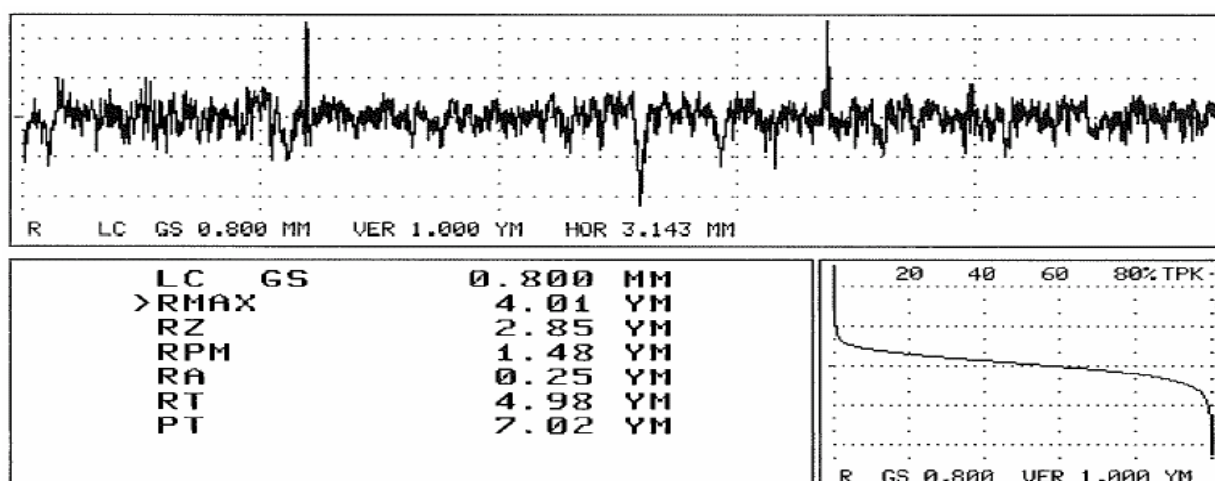


Bild 91: Typische Rauheitsmessung im neuen Zustand

Die Rauigkeit der Stahllamelle im neuen Zustand ($R_z = 2,85$) zeigt sich im eingelaufenen Zustand ($R_z = 2$) stark geglättet. Die Traganteilkurve zeigt eine stark plateauartige Oberflächenstruktur

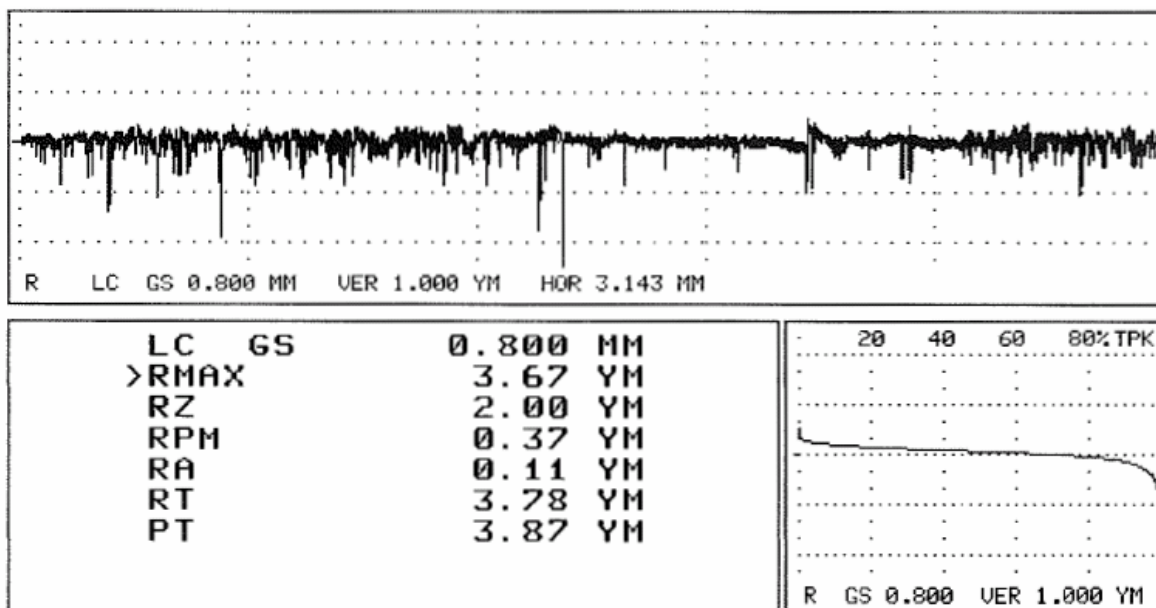


Bild 92: Typische Rauheitsmessung im belasteten Zustand (Exemplarisch)

8.2.1.4 Bremsbetrieb: Innenlamellendrehzahl $n_{an} = 0$ U/min

Bezogen auf die praktischen Anwendungsfälle der Sinterbeläge im Bremsbetrieb (z.B. Bremsen in Achsen von Bau- und Landmaschinen) wird im Rahmen dieser Arbeit analog zu der Vorgehensweise mit organischen Belägen der Sinterbelag im Bremsbetrieb untersucht. Ein weiteres Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung des Einfluss der Betriebsart (Kupplungsbetrieb und Bremsbetrieb) auf die spezifische Reibleistungsgrenze. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die spezifische Reibleistung im Bremsbetrieb abhängig von den eingestellten spezifischen Ölvolumenströmen ist (Bild 93). Weiterhin zeigt Bild 93 im Vergleich mit dem Kupplungsbetrieb (Bild 73 und Bild 85), dass die spezifische Reibleistungsgrenze im Kupplungsbetrieb (KB) höher als im Bremsbetrieb (BB) ist (siehe Bild 108).

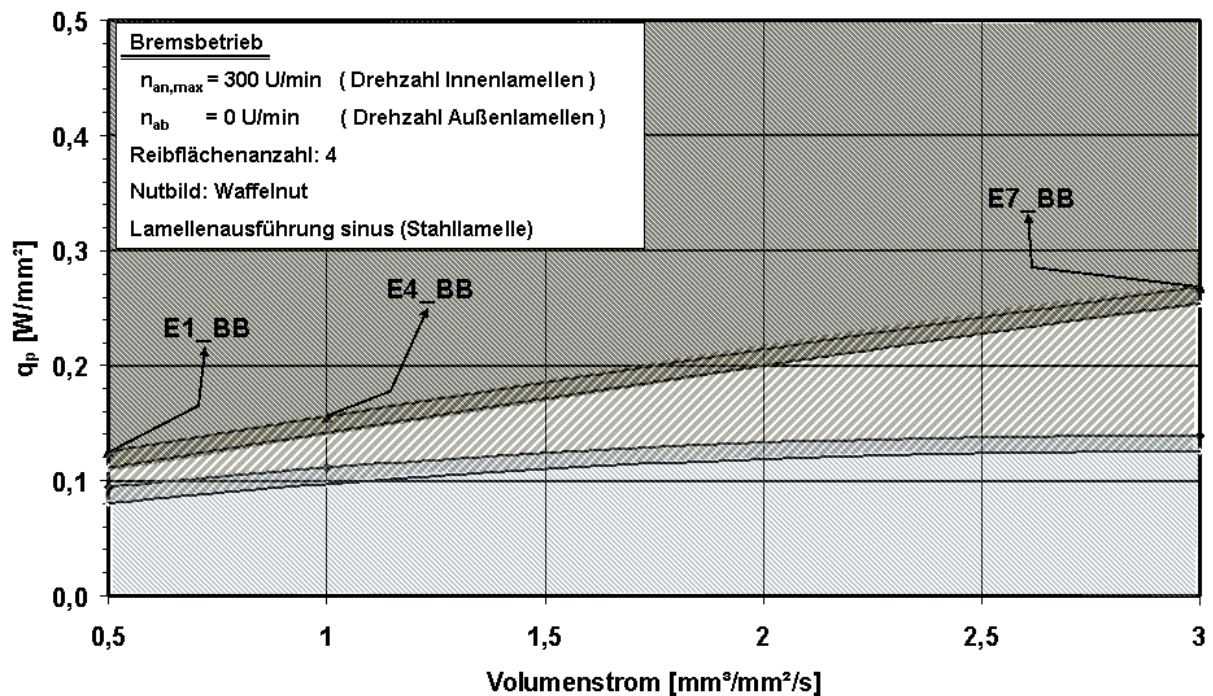


Bild 93: Einfluss der Kühlölmenge auf die spezifische Reibleistungsgrenze im Bremsbetrieb (BB)

Reibwertverhalten für einen spezifischen Kühlölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ im Versuch V3 (niedriger Schlupf und hohe Flächenpressung)

Zum Aufbau eines brauchbaren Reibwertes ist ausreichende Benetzung der Oberflächen der Reibpartner mit Kühlöl sicherzustellen. Eine Angabe der für den Reibwertaufbau erforderlichen Mindestmenge für Bremsbetrieb der Sinterbeläge ist der spezifische Ölvolumenstrom $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$. Die Absolutendrehzahl (Innenlamellendrehzahl) ist von dem eingestellten Schlupf abhängig. Durch einen möglichst niedrigen Kühlölvolumenstrom muss eine ausreichende Kühlung über den gesamten Drehzahlbereich (Innenlamellendrehzahl) sichergestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird weiterhin diese Korrelation untersucht.

Im Bremsbetrieb stehen die Stahllamellen still $n_{ab}=0 \text{ U/min}$. Der Schlupf n_s wird durch die Antriebsdrehzahl n_{an} (Innenlamellendrehzahl) eingestellt. Der maximale Schlupf im Bremsbetrieb mit sintermetallischen Belägen im Versuch V1 beträgt 300 U/min . Der Minimale Schlupf wird bei dem Versuch V3 eingestellt. Im Versuch V3 (niedrige Absolutdrehzahl ca. 75 U/min) des Lamellenpaketes E1_BB mit dem eingestellten spezifischen Ölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ wurde eine sehr starke Reibmomentschwankung beobachtet (Bild 94, Bild 95, Bild 96). Weiterhin zeigt der Reibwert bei dem Versuch V2 einen starken Reibwertabfall (Abbruchkriterium), aber ein höheres Stahllamellentemperaturniveau. Beim Versuch V1 mit dem Schlupf $n_s=300 \text{ U/min}$ wurden relativ niedrige Stahllamellentemperaturen gemessen. Die Gleitgeschwindigkeit hat ausgereicht, um die gesamte Reibfläche an der Wärmeübertragung zu beteiligen.

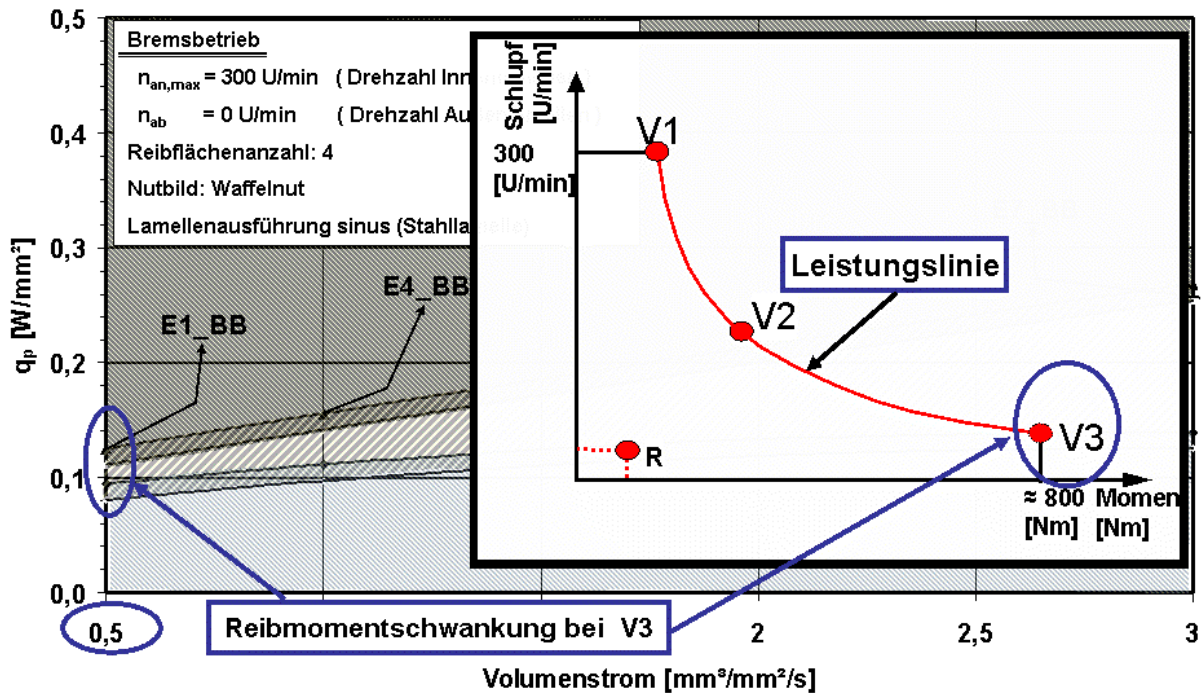


Bild 94: Reibwertverhalten beim Versuch V3 (niedriger Schlupf und höhere Flächenpressung)/ $V_{\text{Öl}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

Bild 95 zeigt den charakteristischeren Verlauf des Reibmoments T_r , der Flächenpressung p_A und des Druckverlaufs p . Diese Parameterkombination (Schlupf, Flächenpressung, Kühlmölmenge) führt reproduzierbar zum Auftreten starker Reibmomentschwankungen. Nach einer kurzen Phase zunehmender Amplituden in der Rampe schwingt das System für ca. 25 s mit nahezu konstanter Amplitude (etwa 75 Nm), welche gegen Anfang der Laststufe wieder gegen Null absinkt. Nach einer kurzen Phase ohne Schwankungen bzw. Schwingungen in der Laststufe treten dann wieder starke Reibmomentschwankung mit der gleichen Amplitude (etwa 75 Nm; ca. 10 % von Sollwert) auf. Aus Sicherheitsgründen wurde das Lamellenpaket für eine kurze Zeit geöffnet, anschließend wurde die Laststufe wieder angefahren. Hier zeigte sich, dass das Reibsystem erneut zu schwingen begann.

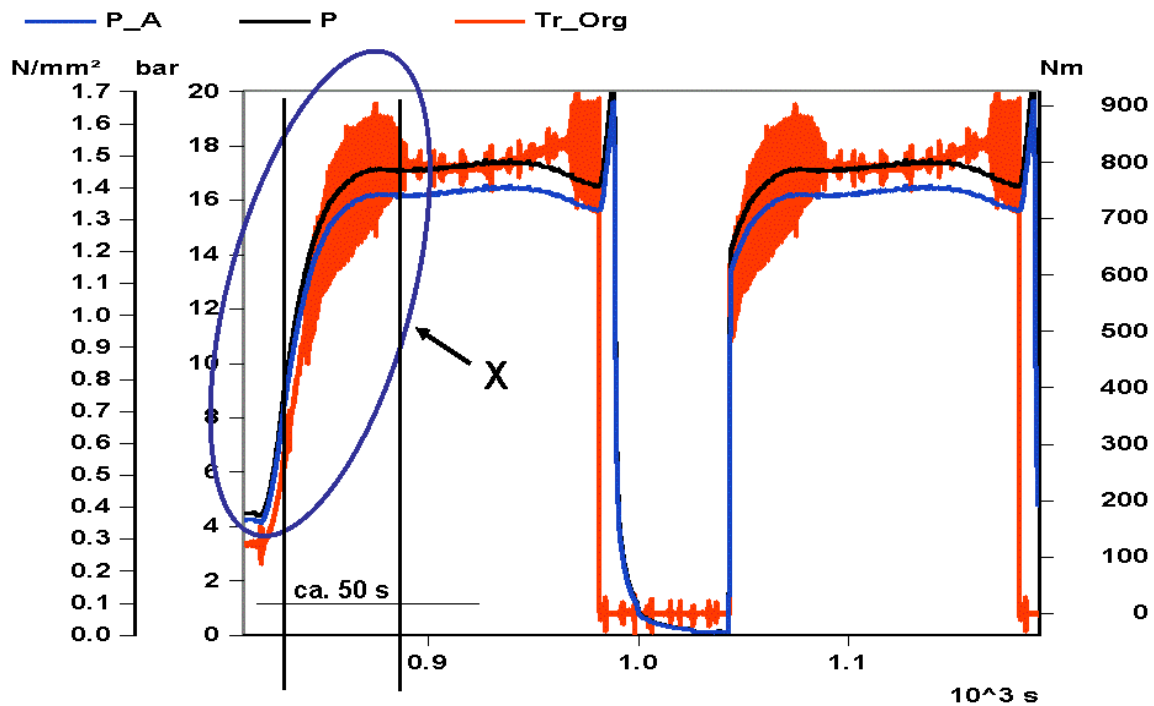


Bild 95: Reibmomentschwankung beim Versuch V3 (niedriger Schlupf und hohe Flächenpressung) / Ölvolumenstrom= 0,5 $mm^3/mm^2/s$

Bild 96 zeigt, dass das auftretende Reibmoment T_r bei einer Flächenpressung von $p_A=1 N/mm^2$ mit einer Amplitude von ca. 75 Nm (ca. $\pm 10\%$ von Sollwert) schwingt. Weiterhin wurde eine sehr starke Önebelbildung im Prüfkopf beobachtet. Die Reibflächen der Stahlmellen wurden durch thermische Überlastung tiefblau verfärbt. Die ermittelte Stahlmellentemperatur ist 255 °C.

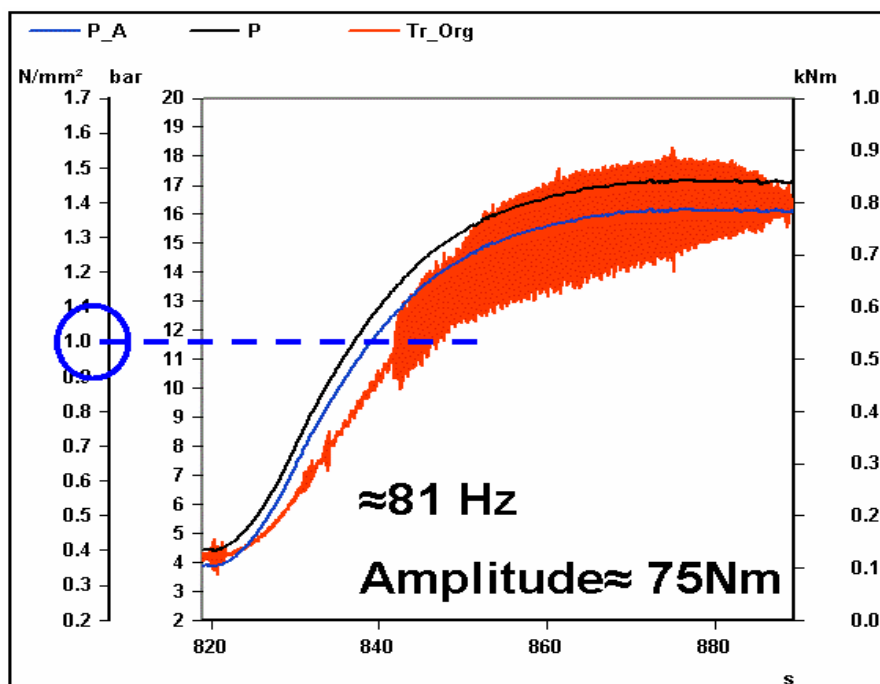


Bild 96: Detailansicht X / Reibmomentschwankung bei dem Versuch V3 (niedriger Schlupf und höhere Flächenpressung) / $V_{\text{Öl}}= 0,5 mm^3/mm^2/s$

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt (Bild 97), dass der spezifische Kühlölvolumenstrom $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ für beliebigen Absolutdrehzahl und Flächenpressung ausreicht. Das bedeutet, dass hier die spezifische Reibleistungsgrenze durch die auftretenden Nebenerscheinungen bestimmt wurde. So konnte an dieser Stelle die eigentliche Leistungsgrenze nicht vollständig abgefahren werden.

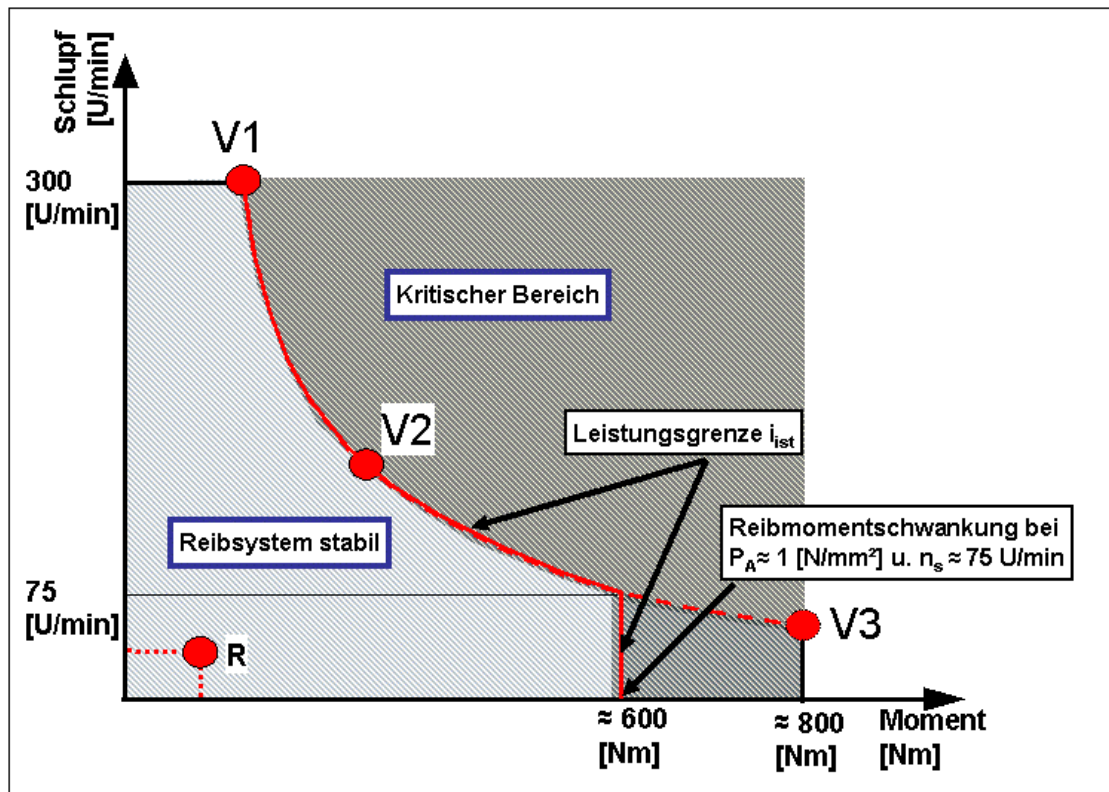


Bild 97: Begrenzung der Leistungsgrenze durch die Flächenpressung und den Schlupf für einen spez. Kühlölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ (Bremsbetrieb)

Bild 98 stellt die Stahllamellentemperaturverteilung des Lamellenpakete E1_KB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze bei den Versuchen V1, V2 dar. Aufgrund der oben erwähnten Reibmomentschwankung wurde die Temperatur des Versuchs V3 nicht dargestellt (Bild 98).

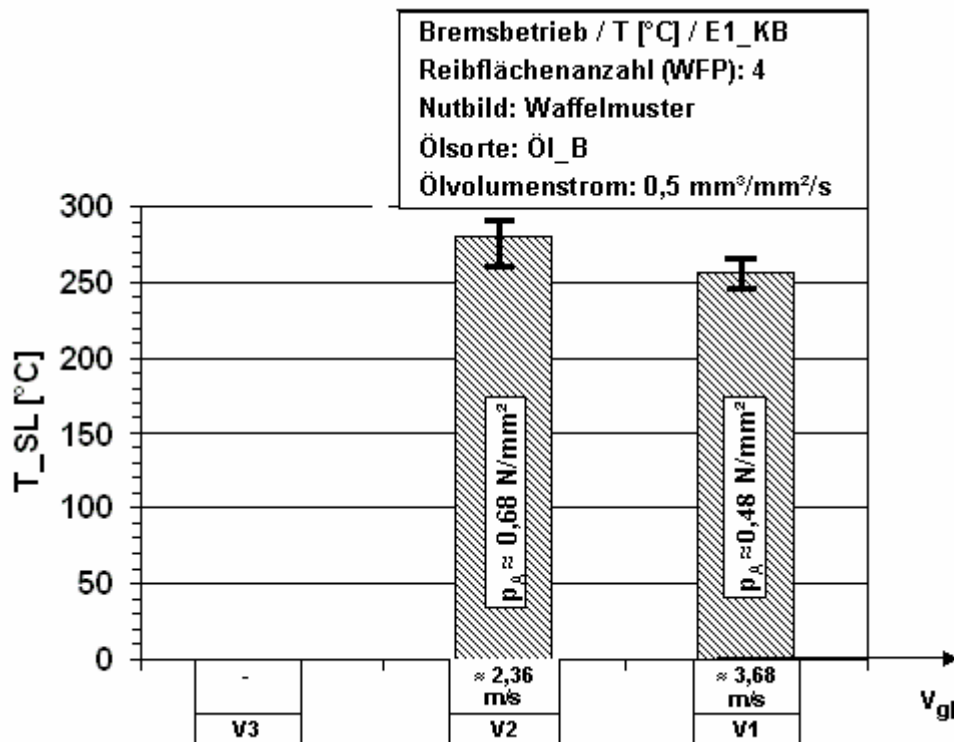


Bild 98: Stahllamellentemperaturverteilung das Lamellenpaket (E1_KB) an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2,

Reibwertverhalten für Ölvolumenstrom 1 mm³/mm²/s bei dem Versuch V3 (niedriger Schlupf und höhere Flächenpressung)

Das Ergebnis der Untersuchung mit dem Ölvolumenstrom von 0,5 mm³/mm²/s im Bremsbetrieb zeigt, dass der Versuch V3 mit niedrigem Schlupf und höherer Flächenpressung nicht möglich ist.

In weiteren Versuchsreihen wurde der Ölvolumenstrom von 0,5 auf 1 mm³/mm²/s verdoppelt. Im Versuch V3 (niedrige Absolutdrehzahl ca. 129 U/min) des Lamellenpaketes E4_BB wurde ein sehr starker Reibwertabfall (ca. 18 % in 3 min.) beobachtet. Analog der spezifischen Kühllölmenge 0,5 mm³/mm²/s ist die eingestellte Differenzdrehzahl (Schlupf) ausreichend, um die Gesamt-Bruttoreibfläche als Wärmeübertragungsfläche aus zu nutzen (Bild 99 Bild 100). Bei den Versuch V2 zeigt sich weiterhin ein Reibwertabfall und somit ein definiertes Abbruchkriterium.

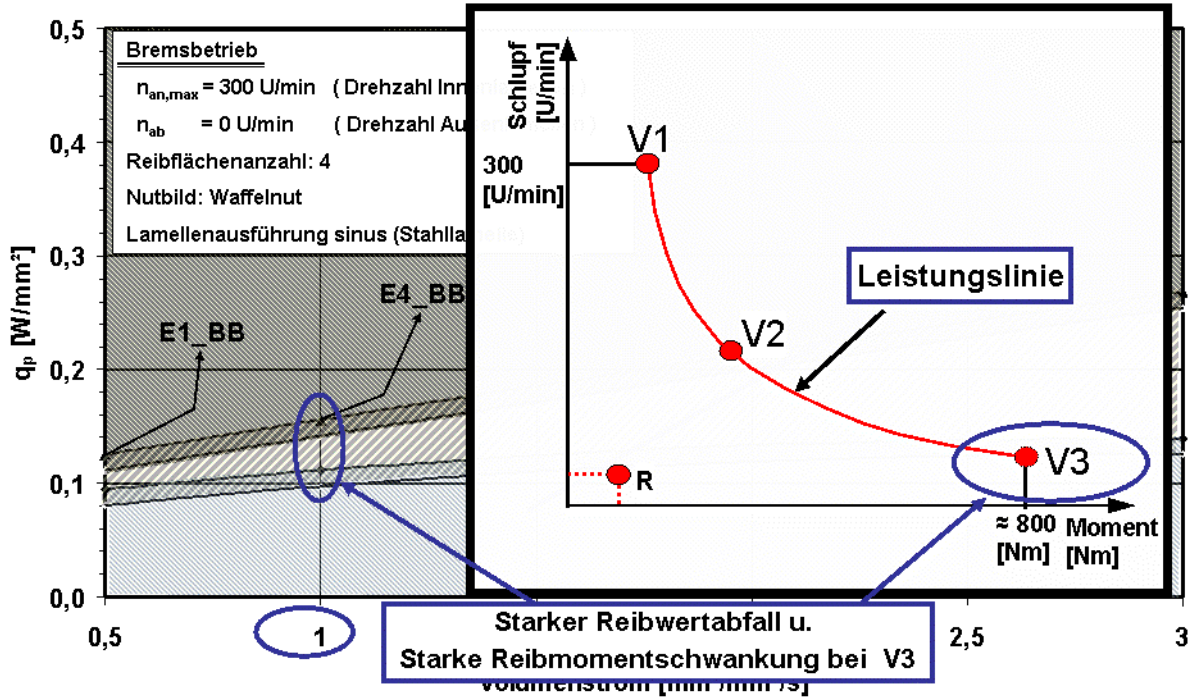


Bild 99: Reibwertverhalten beim Versuch V3 (niedriger Schlupf und hohe Flächenpressung)/
 Ölvolumenstrom = $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

Bild 100 stellt den Reibwert-, Druck- und Flächenpressungsverlauf des Lamellenpaketes E4_BB (Bremsbetrieb) bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ für den Versuch V3 in der Laststufe dar. Der Reibwert fällt rasch in der Laststufe (in ca. 3 min) um 18% ab. Hierbei wurden ebenfalls starke Reibmomentschwankungen beobachtet.

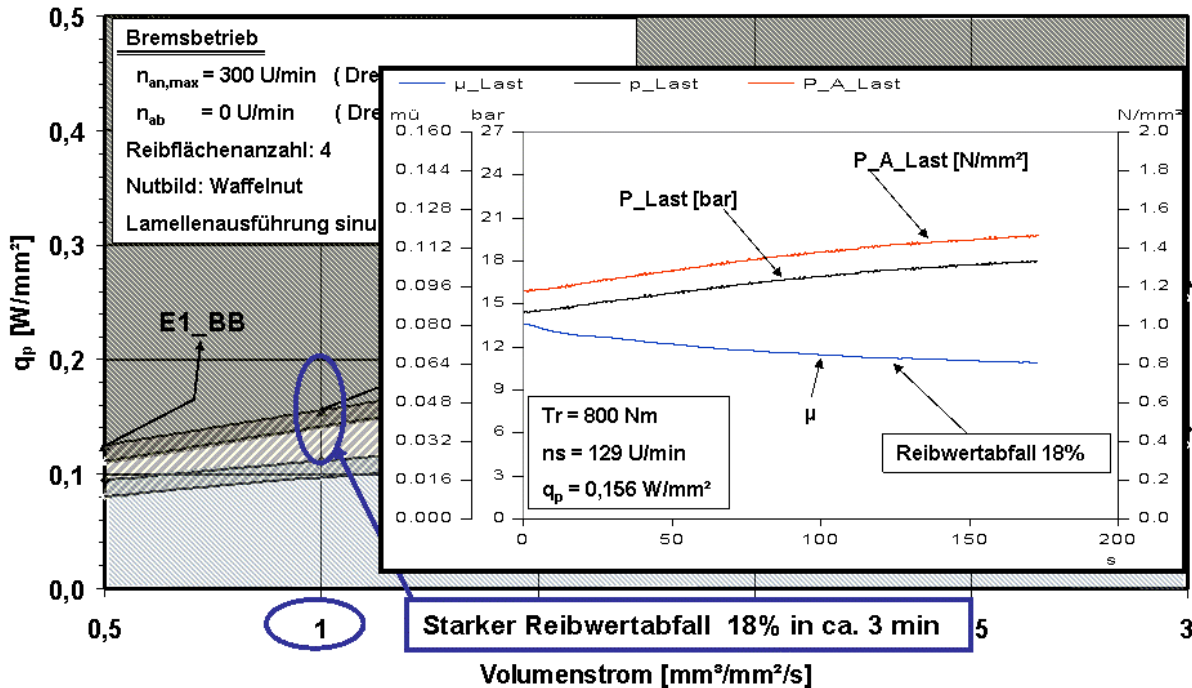


Bild 100: Starker Reibwertabfall bei dem Versuch V3 (niedriger Schlupf und höhere Flächenpressung)
 $V_{\dot{O}} = 1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

Analog der Versuchsreihe mit dem spezifischen Ölvolumenstrom von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ ist die Reibleistungsgrenze des Lamellenpaketes E4_BB bei einem spezifischen Kühllölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ bei einer Flächenpressung von $p_A \approx 1,15 \text{ N/mm}^2$ (ca. 750 Nm) und durch den Schlupf n_s von ca. 129 U/min begrenzt (Bild 101).

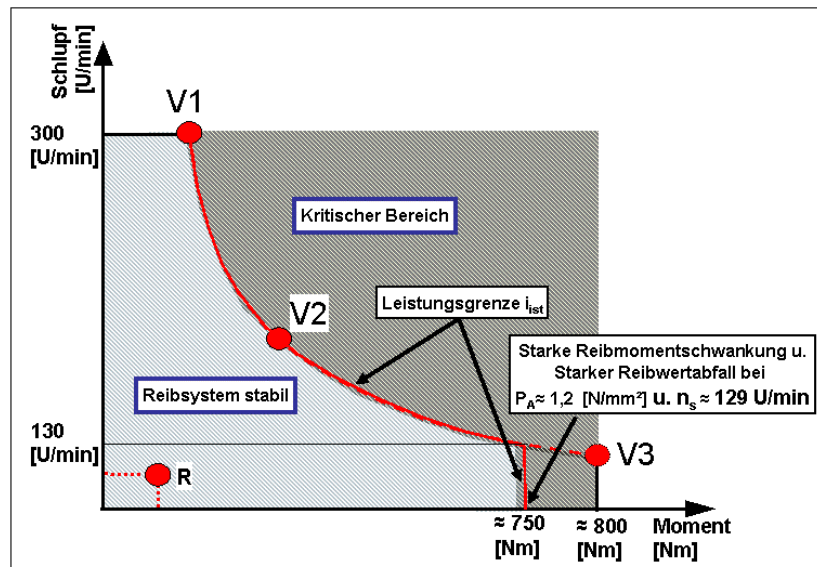


Bild 101: Begrenzung der Leistungsgrenze durch die Flächenpressung und den Schlupf für spez. Ölvolumenstrom $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ (Bremsbetrieb)

Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete E4_BB an der Leistungsgrenze

Bild 102 stellt die Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete E4_BB an ihrer spezifischen Reibleistungsgrenze bei den Versuchen V1, V2 dar. Aufgrund des oben erwähnten Reibwertabfalls wurde die Temperatur des Versuchs V3 nicht dargestellt (Bild 98).

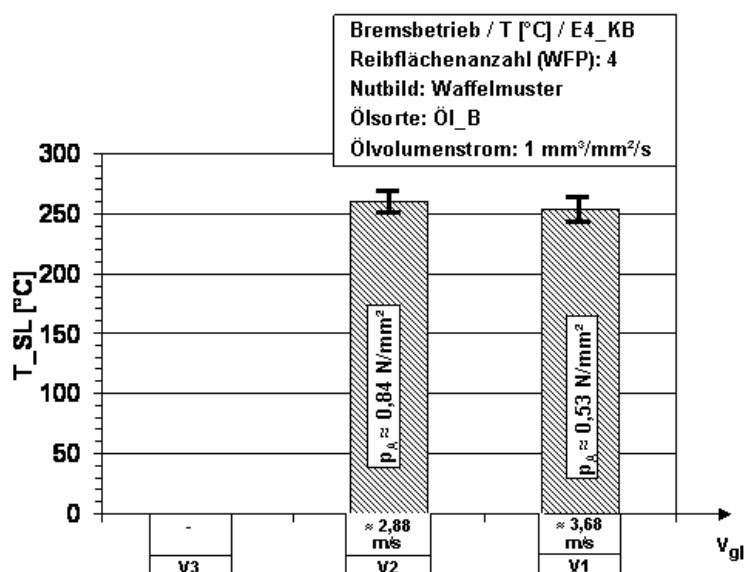


Bild 102: Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete (E4_KB) an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V2, V3

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Sinterbelag SB mit der spezifischen Kühlölvolumenstrom von $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die eingestellte Kühlmenge für die gesamten Schlupfbereiche (V1, V2 und V3) ausreicht. Das Temperaturniveau der Stahllamelle im Versuch V3 (niedriger Schlupf) und V1 (hoher Schlupf) ist bei der spezifischen Ölvolumenstrom $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ etwas höher als das Temperaturniveau bei einem spezifischen Kühlölvolumenstrom von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ bzw. $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$. Aufgrund des kleinen Schlupfunterschieds zwischen V1 und V3 wurde der Versuch V2 mit der spezifischen Kühlölvolumenstrom von $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ nicht durchgeführt.

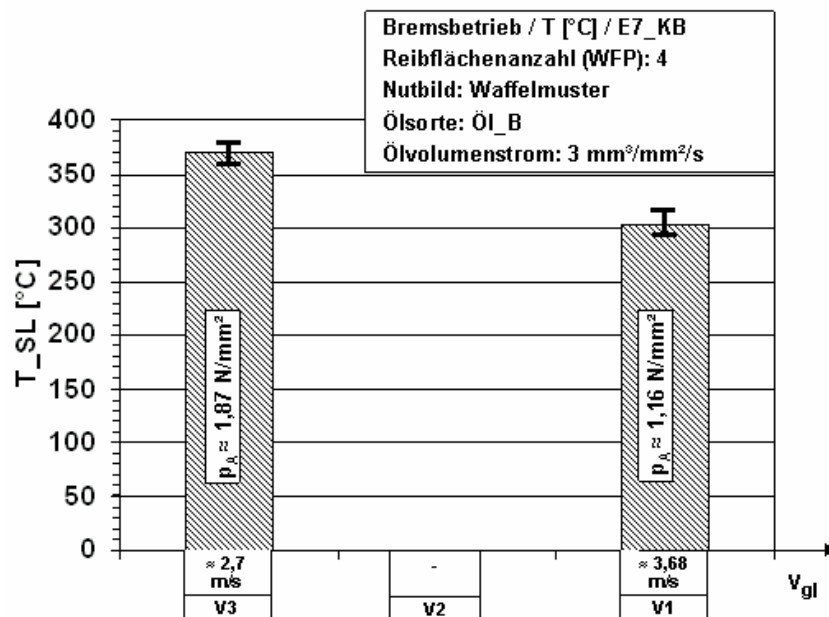


Bild 103: Stahllamellentemperaturverteilung der drei Lamellenpakete (E7_KB) an der spez. Leistungsgrenze bei V1, V3

Bild 104 zeigt eine Stahllamellenvermessung im neuen und im eingelaufenen Zustand für das Lamellenpaket E1_KB mit dem spezifischen Ölvolumenstrom $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$. An der radialen Messung vom Innen- zum Außendurchmesser des Reibbereiches ist ein (im Axialschnitt betrachtet) gleichmäßiger Verschleißangriff zu erkennen. Die Verschleißtiefe beträgt an der gesamten Reibfläche ca. $0,01 \text{ mm}$. Aufgrund der auftretenden Reibmomentschwankung wurde dieses Lamellenpaket nicht so lange im Versuch V3, im Vergleich zu den anderen Lamellenpaketen, belastet.

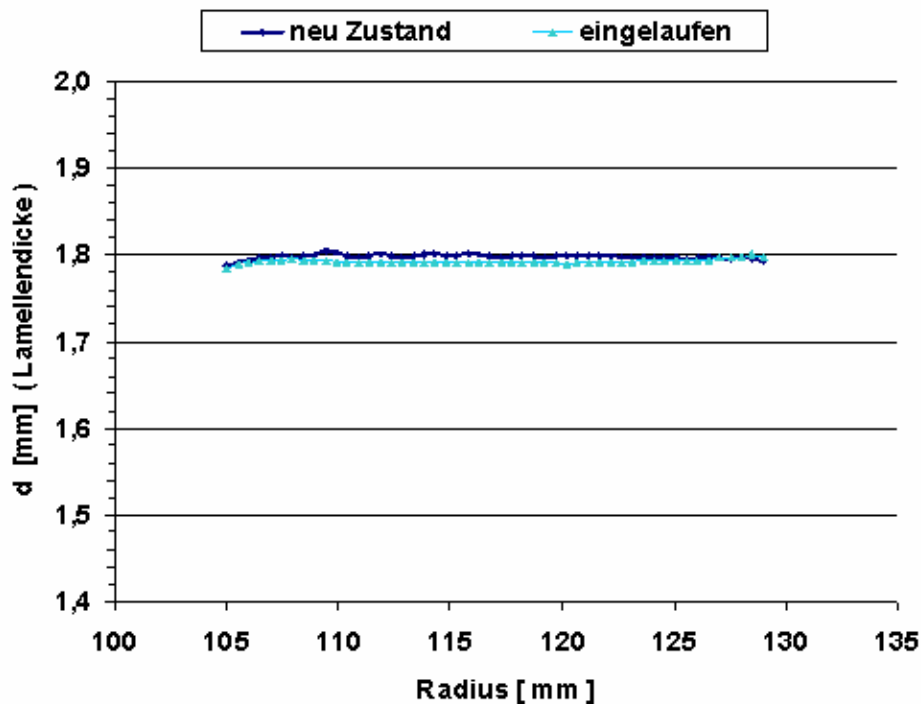


Bild 104: Lamelledicke neue und im eingelaufenen Zustand (Exemplarisch)

Bild 105 zeigt den Verschleiß der Stahllamellen des Lamellenpaketes E1_BB mit dem spezifischen Ölvolumenstrom $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ im Bremsbetrieb.

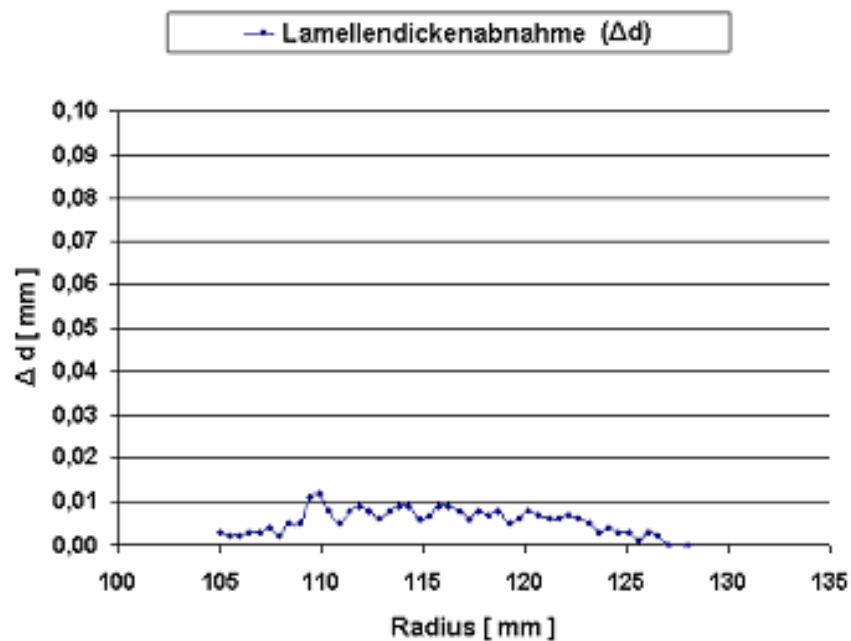


Bild 105: Verschleiß der Stahllamelle im eingelaufenen Zustand (Exemplarisch)

Bild 106 und Bild 107 zeigen eine typische Rauheitsmessung der Stahllamellen vor und nach der Untersuchung der drei Lamellenpakete E1_BB, E4_BB und E7_BB bei einer Außenlamellendrehzahl von 0 U/min (Bremsbetrieb).

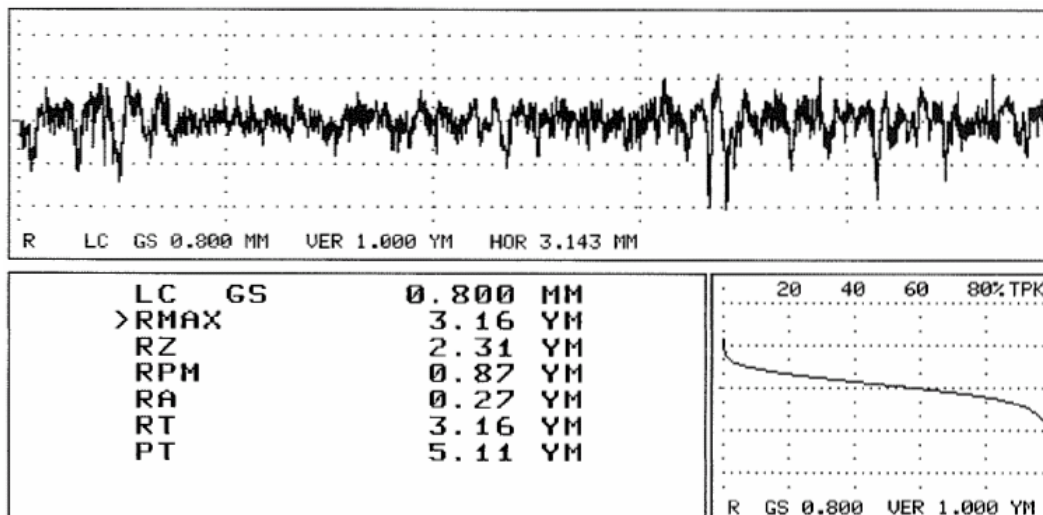


Bild 106: Typische Rauheitsmessung neuen Zustand (Exemplarisch)

Die vergleichende Betrachtung der Rauigkeit der Stahllamelle im Neuzustand ($R_z = 2,31$) mit der belasteten Lamelle lässt deutliche Glättungseffekte erkennen ($R_z = 0,94$).

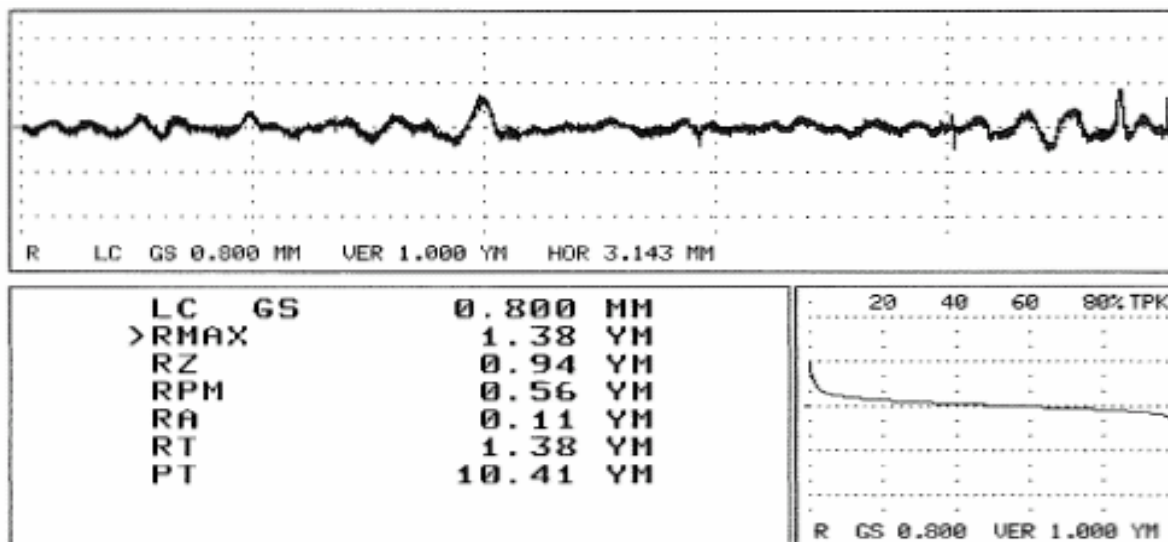


Bild 107: Typische Rauheitsmessung alte Zustand im Bremsbetrieb (Exemplarisch)

Einfluss Betriebsart (Kupplungs –und Bremsbetrieb), Innenlamellendrehzahl (400 und 800 U/min) und Volumenstrom auf die spezifische Reibleistung für Sinterbelag

Prinzipiell wird bei allen Versuchsreihen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, das Schmieröl am Innendurchmesser drucklos zugeführt und über die Zentrifugalkraft der rotierenden Teile durch die Nutung in den Belaglamellen nach außen befördert. Wie bereits im Kapitel 8.1.2 erklärt wurde, hat die Strömungsgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Wärmeabführung und damit auf die spezifische Reibleistungsgrenze q_{pG} im Dauerschleif. Im Bild 108 wurde der Zusammenhang bzw. der Einfluss der Betriebsart des Kupplungs- (KB) und Bremsbetriebs (BB) des Sinterbelag (SB) auf die spezifische Reibleistungsgrenze q_{pG} dargestellt. Als Reibleistungsgrenzen q_{pG} wurden die Grenzlinie zwischen Bereich B und C dargestellt (siehe Bild 19). Die Versuche haben gezeigt, dass die Absolutdrehzahl (Innenlamellendrehzahl) im Kupplungsbetrieb (KB) einen signifikanten

Einfluss auf die spezifische Reibleistungsgrenze q_{pG} hat. Weiterhin zeigen die Versuchsergebnisse, dass die spezifische Reibleistungsgrenze q_{pG} im Dauerschlupf des Bremsbetriebs etwas niedriger als im Kupplungsbetrieb ist, wobei die Differenz mit steigendem Ölvolumenstrom abnimmt. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass durch die Verdopplung der Absolutdrehzahl (von 400 U/min auf 800 U/min) die Kühllölmenge um die Hälfte reduzieren werden kann. Das spezifische Reibleistungsniveau der Absolutdrehzahl von 800 U/min, bei einer spezifischen Kühllölmenge von $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$, liegt ungefähr auf demselben spezifischen Reibleistungsniveau, als das von der Absolutdrehzahl von 400 U/min, bei einer spezifischen Kühllölmenge von $1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$.

Der Einfluss der Absolutdrehzahl auf die spezifische Reibleistung wird durch die Abhängigkeit des Wärmeübertragungskoeffizienten von der Absolutdrehzahl verursacht (Bild 109)⁷⁹. Mit zunehmender Absolutdrehzahl steigt die Wärmeübergangszahl an. Ist die spezifische Kühllölmenge ausreichend (z.B. $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$), so kann nach ⁸⁰ die gesamte Reibfläche am Wärmeübergang teilnehmen. Bild 108 zeigt, dass die spezifische Reibleistung durch Verdopplung der Absolutdrehzahl bei der spezifischen Kühllölmenge $3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ deutlich erhöht wurde. Bei der spezifischen Kühllölmenge $0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$ wurde die spezifische Reibleistung prozentual nicht so stark von der Absolutdrehzahl erhöht.

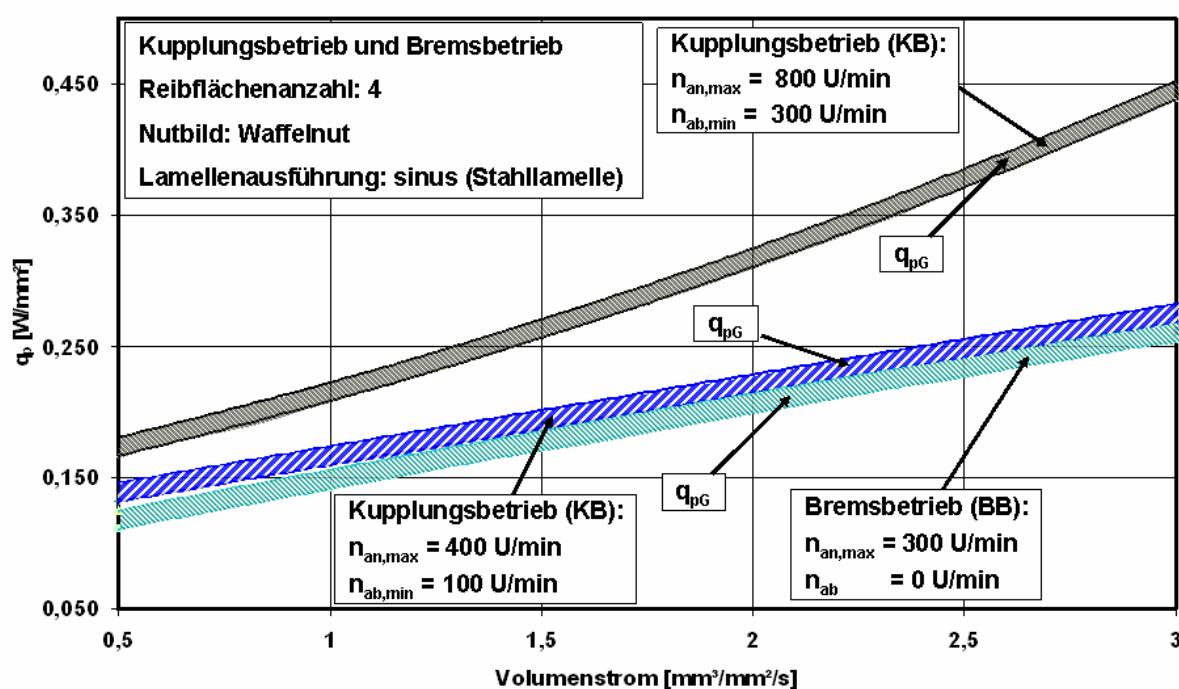


Bild 108: Spezifische Reibleistung abhängig von der Betriebsart, Innenlamellendrehzahl (400 U/min und 800 U/min) und dem Volumenstrom

⁷⁹ Rohm / Reißer 2004

⁸⁰ Rohm / Reißer 2004

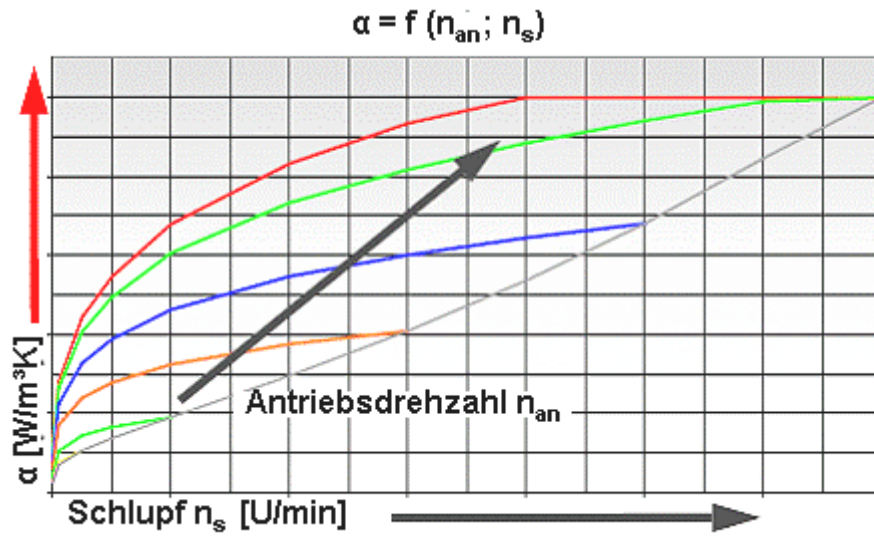


Bild 109: Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = f(\text{Differenzdrehzahl „Schlupf“, Antriebsdrehzahl})$ ⁸¹

⁸¹ Rohm / Reißer 2004

9 Verschleiß und Setzen

9.1 Der Verschleiß

Unter Verschleiß versteht man den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, der durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers hervorgerufen wird. Anzeichen des Verschleißes sind losgelöste kleine Verschleißpartikel (Sinterpartikel im Schmierstoff), Werkstoffüberträge (Sinterübertrag auf die Stahllamelle) sowie Stoff- und Formänderung (setzen der Papierbeläge) des tribologisch beanspruchten oberflächennahen Bereiches. Die Reibung und der Verschleiß hängen nicht allein von den einzelnen kennzeichnenden werkstoff- und geometriespezifischen Eigenschaften ab, sondern sie sind Systemeigenschaften. Wenn eine Einflussgröße des tribotechnischen Systems geringfügig modifiziert wird (z.B. Belagsnutzung, Schmierstoff, Betriebsart, usw.), kann sich das Reibungs- und Verschleißverhalten des Systems gravierend ändern. Anhand der Stribeck-Kurve ist dies deutlich sichtbar. Bei geringer Relativgeschwindigkeit und hohen Anpressdruck befindet sich ein Gleitsystem im Mischreibungsgebiet, wo die Reibungszahl mit ansteigender Gleitgeschwindigkeit gravierend abnimmt. Ab der Übergangsdrehzahl geht das System vom Mischreibungsgebiet in das der Flüssigkeitsreibung über und die Reibungszahl nimmt langsam mit ansteigender Relativedrehzahl wieder zu.

Tribotechnische Systeme (TTS) zeichnen sich dadurch aus, dass neben den gewollten Eingangsgrößen, auch nicht gewollte Eingangsgrößen, sogenannte Störgrößen, auftreten. Zusammen mit der Bau- und Wirkstruktur beeinflussen sie die Nutz- und Verlustgrößen des TTS. Eine nasslaufende Kupplung ist ein energiedeterminierendes System, wo die Eingangsgröße, die Eingangsdrehzahl der Antriebswelle, in eine Ausgangsgröße, Ausgangsdrehzahl der Abtriebswelle, umgewandelt wird. Für die hier betrachteten Lamellenschaltkupplung gilt, dass zwischen den Grundkörper (Stahllamelle), Gegenkörper (Papier- oder Sinterlamelle), Zwischenstoff (Öl) und dem Umgebungsmedium (meistens Luft) Verluste in Form von Wärme auftreten.⁸²

Je nach Art der tribologischen Beanspruchung und der beteiligten Stoffe kann der Verschleiß in verschiedene Verschleißarten unterteilt werden, z.B. in Gleitverschleiß (Dauerschlupf), Furchungverschleiß, Spülverschleiß (Kühlöldurchsatz durch die Lamellen), Prallstrahlverschleiß, Werkstoffkavitation, Tropfenverschleiß, usw.

⁸² Santner 2004

Der Verschleiß wird durch Verschleißmechanismen bewirkt, wobei vier von besonderer Bedeutung sind:

- Oberflächenzerrüttung
- Abrasion
- Adhäsion
- Tribochemische Reaktion

Nach der DIN 50 320 ist die Gliederung des Verschleißgebietes nach Verschleißarten und Verschleißmechanismen unterteilt. Bei nassslaufenden dauerschleifenden Lamellenkupplungen treten die Verschleißmechanismen überlagert auf. In Bild 110⁸³ sind die Grundlegenden Verschleißmechanismen schematisch dargestellt⁸⁴.

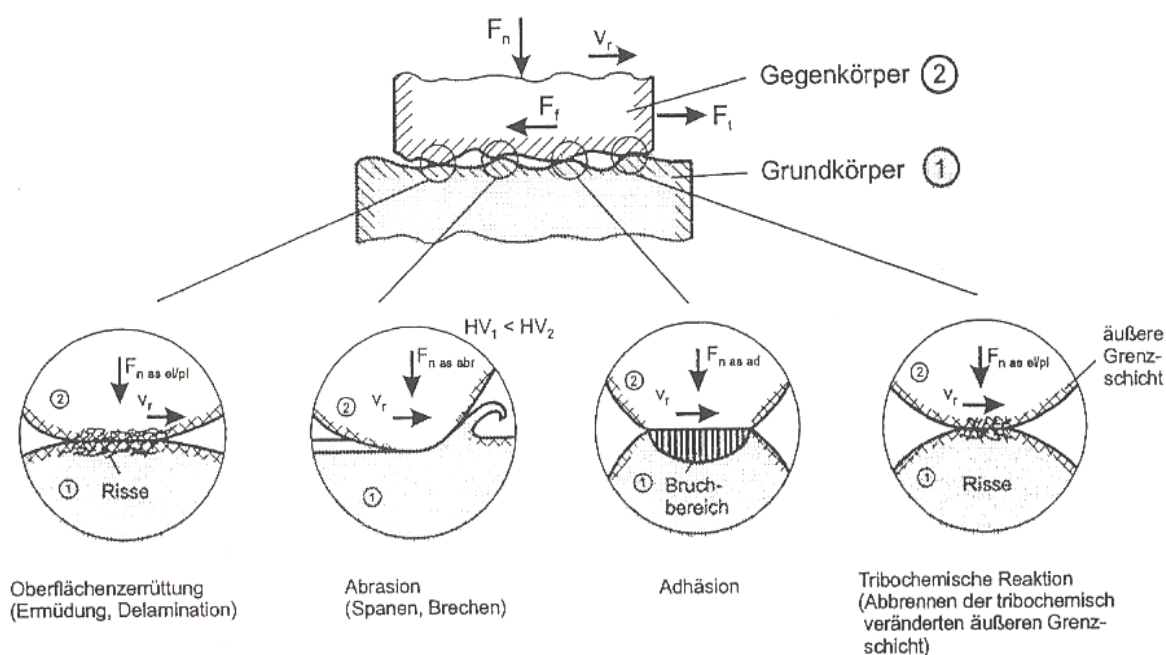


Bild 110: mikroskopische Betrachtungsweise der vier wichtigen Verschleißmechanismen^{85,86}

Aufgrund wechselnder Beanspruchung in den oberflächennahen Bereichen von Grund- und Gegenkörper wird die Oberflächenzerrüttung, welche sich durch Rissbildung, Risswachstum und Abtrennung von Verschleißpartikeln äußert, hervorgerufen.

⁸³ Santner 2004

⁸⁴ Kragelski 1971

⁸⁵ Santner 2004

⁸⁶ Habig / Evers / Chatterjee-Fischer 1978

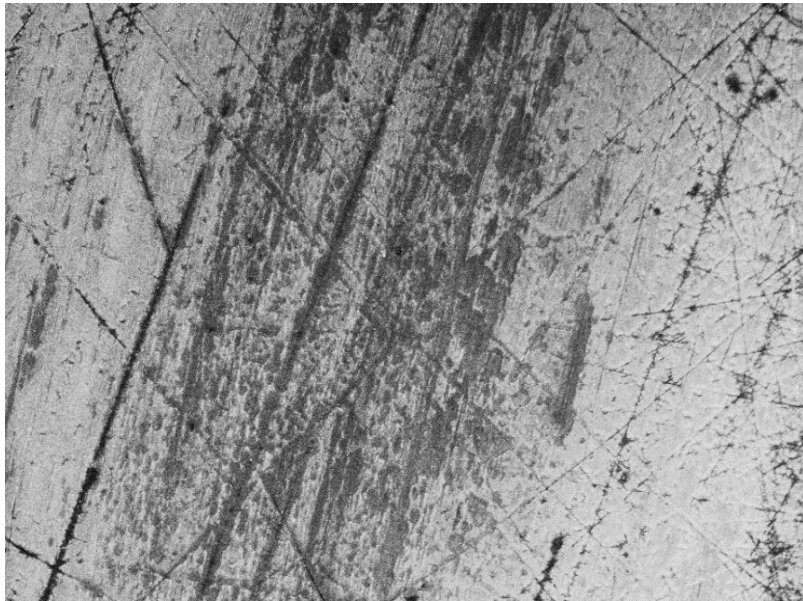


Bild 111: Ritzungen u. Mikroerspanungen der Stahllamelle

Die Abrasion führt zu Ritzungen und Mikroerspanungen des Grundkörpers (Stahllamelle) durch harte Rauheitshügel des Gegenkörpers (Sinterlamelle) oder durch harte Partikel im Zwischenstoff (siehe Bild 111). Dieser Verschleißerscheinung tritt besonders bei Sinter/Stahlpaarungen auf.



Bild 112: Typisch Verschleißerscheinung bei Sinterübertragung „Leopardenfell“

Bei der Adhäsion werden zunächst nach Durchbrechen eventuell vorhandener Deckschichten atomare Bindungen (Mikroverschweißungen) vor allem an den plastisch deformierten Mikrokanten zwischen Grund- und Gegenkörper gebildet. Ist die Festigkeit der Bindungen höher als die des weicheren Reibpartners, kommt es zu Ausbrüchen aus letzterem und zum Materialübertrag auf den härteren Reibpartner. Das übertragene Material

kann entweder auf dem härteren Reibpartner verbleiben oder abgetrennt oder aber auch zurückübertragen werden⁸⁷.

Tribochemische Reaktionen sind chemische Reaktionen von Bestandteilen des Grund- und/oder Gegenkörpers mit Bestandteilen des Schmierstoffs oder des Umgebungsmediums statt infolge einer reibbedingten Aktivierung der beanspruchten oberflächennahen Bereiche. Die Reaktionsprodukte weisen gegenüber Grund- und Gegenkörper veränderte Eigenschaften auf und können nach Erreichen einer gewissen Dicke zum spröden Ausbrechen neigen oder auch Reibung- und/oder Verschleißmindernde Effekte zeigen. Auch diese Verschleißerscheinung ist bei nasslaufenden Lamellenkupplungen, besonders wegen der Reaktivität von Papier- und Sinterbelägen mit den Additiven des Schmierstoffes, nicht auszuschließen.

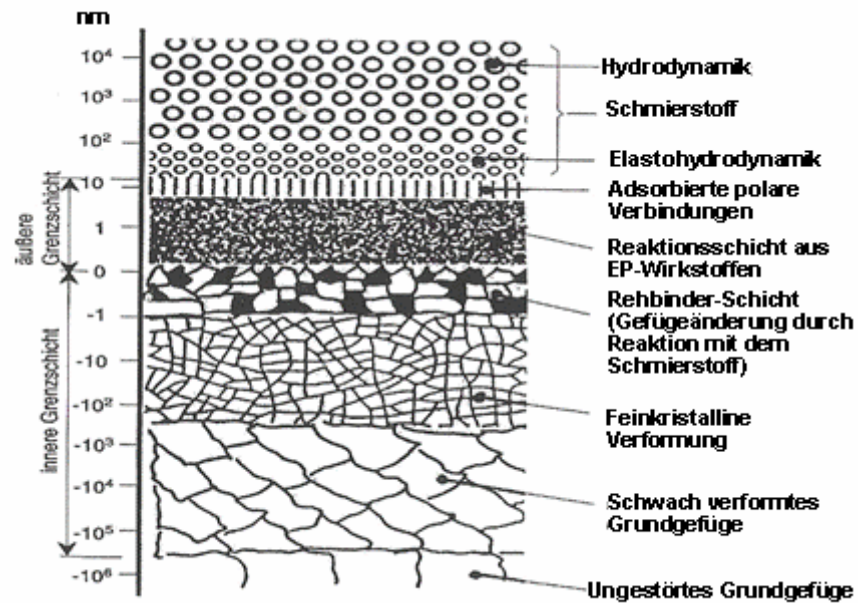
Schichtenbildung im Wirkflächenpaar beim Verschleiß allgemein

Bei der tribochemischen Betrachtung der Wirkflächenpaare ist bei den Werkstoffeigenschaften des Grund- und Gegenkörpers zwischen den oberflächennahen Randbereichen und dem Grundmaterial zu unterscheiden. Besonders wichtig sind die Eigenschaften des oberflächennahen Randbereiches, wie Gefügebau, Härte und chemische Zusammensetzung⁸⁸. Ebenso sind die Oberflächenrauheiten von großem Interesse. Gerade bei Kontakten von metallischen Werkstoffen mit und ohne Zwischenmedium ist die Ausbildung von Grenzschichten gegeben. Hierbei lagert sich an das ungestörte Grundgefüge ein von der spanenden Bearbeitung oder Umformung stammender verfestigter, gegenüber dem Grundgefüge mit feinkörnigerem Gefüge, ausgestatteter Schichtaufbau an. Darüber liegt die äußere Grenzschicht, die aus einer Reaktionsschicht und einer Adsorptionsschicht besteht. Wenn sich das Verschleißgeschehen in der äußeren Grenzschicht abspielt, ist es ein akzeptabler Zustand.

Bild 113 zeigt den Aufbau einer solchen Grenzschicht im geschmierten Zustand. Im Gegensatz zum ungeschmierten System bildet sich im geschmierten Fall eine Reibschicht aus, die sich dadurch charakterisiert, dass eine Gefügeänderung durch Reaktionen mit dem Schmierstoff und dem Werkstoff auftritt.

⁸⁷ Santner 2004

⁸⁸ Jäger / Hofmann / Dimmig / Oehler 1990

Bild 113: Grenzschichtenaufbau mit Schmierstoff⁸⁹

Unter der Rebinderschicht liegt eine feinkristalline Verformung vor und darunter ein schwach verformtes Grundgefüge, unter dem sich das ungestörte Grundgefüge befindet. Über der Rebinder-Schicht bildet sich die eingangs erwähnte Reaktionsschicht, aufgrund der Additive im Schmierstoff, aus. Darauf baut eine adsorbierte polare Verbindungsschicht auf. Früher wurde oft davon ausgegangen, dass Schmierstoffe mit polaren Molekülen im wesentlichen die Schmierwirkung erzeugen, was aber heute widerlegt wurde, da es Schmierstoffe auch ohne polare Moleküle gibt. In den meisten Fällen sind die Schmierstoffe aus polaren und nichtpolaren Molekülen zusammengesetzt. Über der Schicht mit den adsorbierten polaren Verbindungen befindet sich der Schmierstoff selbst, dessen Bereiche in die Elastohydrodynamik und der Hydrodynamik eingeteilt ist. Dieser theoretischen Betrachtung liegt ein ausreichender Schmierstofffilm zwischen Grund- und Gegenkörper zugrunde, welcher nur möglich ist, wenn die Rauheitsspitzen der Grund- und Gegenkörper durch eine

⁸⁹Bartz 1979

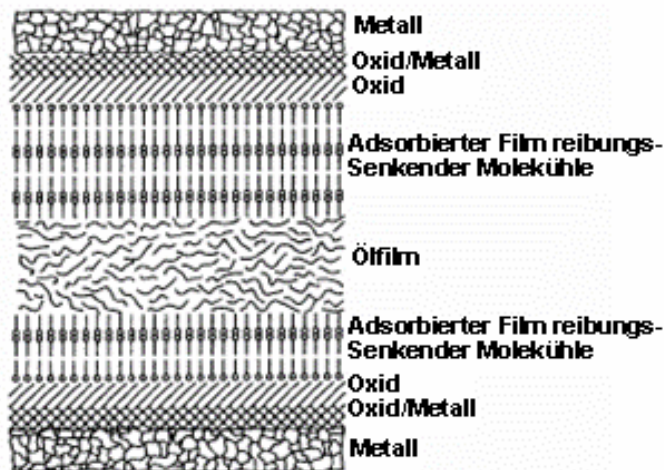


Bild 114: schematisches Modell der Anlagerungsschichten

ausreichende Schmierstoffschicht getrennt werden. In manchen Fällen der Verschleißuntersuchung eines geschmierten Systems, wird der Schmierstoff selber als Gegenkörper definiert.

Bei der Verschleißbetrachtung für dauerschleifende nasslaufende Lamellenkupplungen muss man beachten, dass man aufgrund der Anpressdrücke und der Relativgeschwindigkeiten und der abnehmenden Viskosität des Schmierstoffs, bedingt durch die thermische Belastung, sich im Gebiet der Misch und Grenzreibung befindet.

9.2 Verschleiß und Setzen der organischen Reibbeläge

Verschleiß der organischen Reibbeläge

Bei organischen Belägen ist immer mit Verschleiß zu rechnen, der sich jedoch im Normalbetrieb in Grenzen hält. Bei zu hoher Belastung kann es jedoch zu einem erhöhten Verschleiß kommen. Die dadurch zunehmend reduzierte Belagnutung führt zu einer reduzierten Kühlung und bewirkt eine weitere Zunahme des Verschleißes.

In den Versuchsreihen mit dem organischen Belag wurde eine Lamellendickenabnahme beobachtet. Bei der Betrachtung jeder einzelnen Lamelle eines Lamellenpaketes (z.B. Bild 116) stellte man fest, dass die Lamellendickenabnahme der zweiten Lamelle (2) - von der Kolbenseite aus gesehen – wesentlich höher ist, als die der dritten Lamelle (3). Dies wurde durch nicht gleichmäßige Anpresskraft im Lamellenpaket verursacht. Die Verzahnung von Lamellen verursachen beim schließen des Lamellenpaketes Reibungskräfte, die die Verschiebekraft aufgrund der Reibung in den Verzahnungen erhöhen (Bild 115).

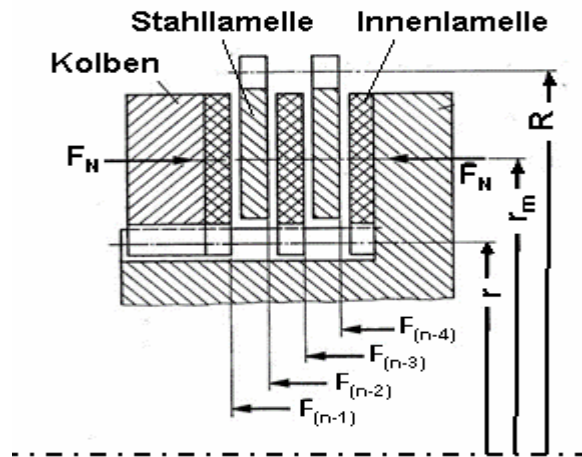


Bild 115: Zuordnung Anpresskraftverteilung im Lamellenpaket

Dies führt zu Hemmkräften beim Schließvorgang und ist bedingt durch die Masse der Lamellen. Dabei erhöht sich die Verschiebekraft ($F_{(n-1)} > F_{(n-2)} > F_{(n-3)} \dots$) von Lamelle zu Lamelle ausgehend von der Anpressplatte⁹⁰. Aufgrund der Reibung in den Verzahnungen der Außen- und Innenlamellen und der Reibung zwischen den Lamellen entsteht, ohne dass das Lamellenpaket geschlossen ist, ein Rutschmoment. Weil sich die Anpresskraft von Lamelle zu Lamelle verringert, verkleinert sich auch das übertragbare Moment, gegenüber einem ideal reibungsfrei verzahnten Lamellenträger (Bild 117).

Aufgrund der nicht aktiven Reibfläche der jeweils äußeren Lamelle, entspricht die Lamellendickenabnahme der ersten Lamellen (1) und der letzten Lamelle (4) etwa der Hälfte der Lamellendickenabnahme der zweiten (2) und der dritten (3) Lamelle (siehe Bild 116).

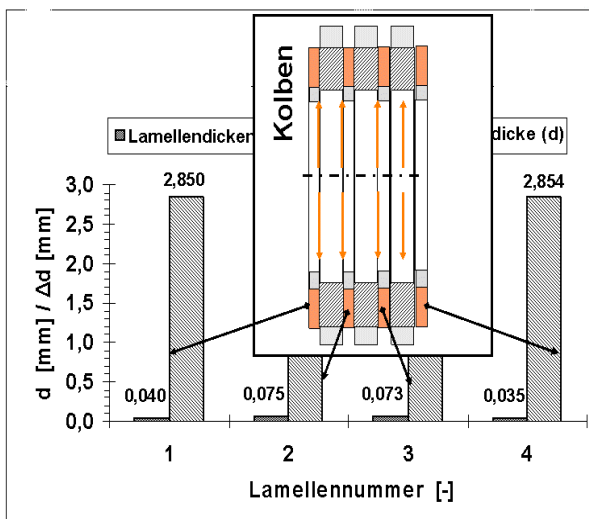


Bild 116: Zuordnung der Wirkflächenpaare zur Lamellendickenabnahme (A5_KB)

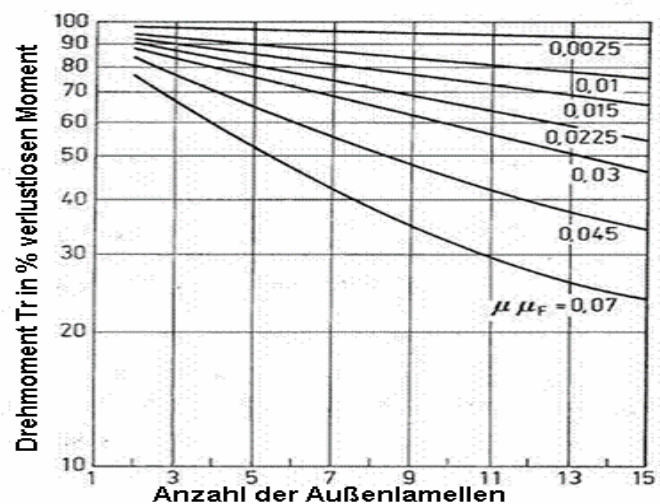


Bild 117: Zuordnung Reibmoment im Lamellenpaket (exemplarisch)⁹¹

⁹⁰ Winkelmann / Harmuth 1985

⁹¹ Beisel 1983

Die Temperaturmessung der Papierlamelle in dem Lamellenpaket unter Dauerschleif zeigt, dass die erste Stahllamellentemperatur (T_{SL_M1}) von der Kolbenseite höher ist, als die zweite und dritte Stahllamellentemperatur (T_{SL_M2}/T_{SL_M3}). Das korreliert zum sich mit dem beobachteten Verschleiß (Bild 118).

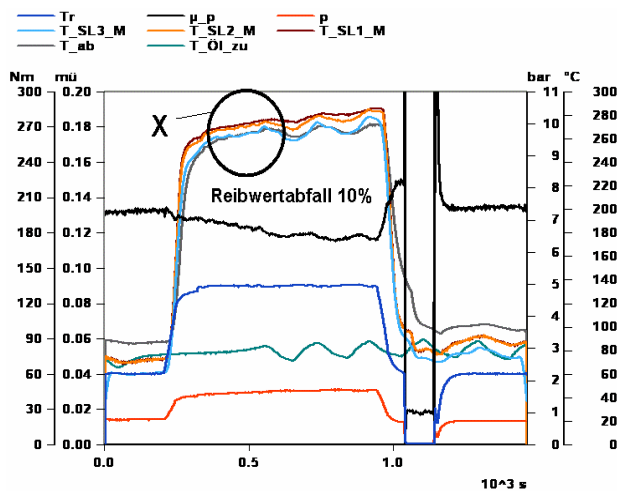


Bild 118: Stahllamellentemperaturen eines Lamellenpakets

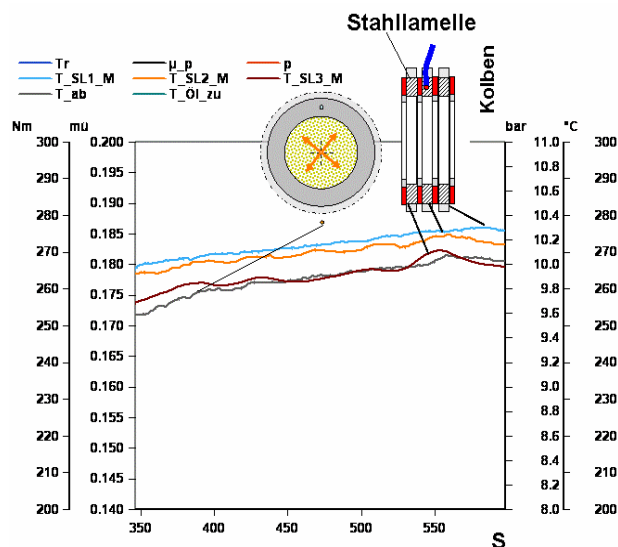


Bild 119: Stahllamellentemperaturen (Ansicht X) Lamellenpakets

Setzen der organischen Reibbeläge

Die elastische Nachgiebigkeit des Belages (Belagelastizität) unter Druckbelastung hat einen Einfluss auf die Lebensdauer der Kupplung. Durch diese elastische Nachgiebigkeit wird die Flächenpressung unter Druckbelastung beim Schalten der Kupplung gleichmäßig an die Reibfläche verteilt. Andererseits könnte bei zu hoher Elastizität die Funktion der Kupplung beeinträchtigt werden. So kann bei nicht ausreichendem Kolbenweg der Druckkolben gegen einen Anschlag oder über eine Dichtkante laufen, was zum Ausfall der Kupplung führt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Lamellendicke des Papierbelages beobachtet. Die gemessene Lamellendickenabnahme enthält den Verschleiß und das Setzen der Belaglamelle. Da die erste (Belag-)Lamelle (kolbenseitig) nur ein aktives Wirkflächenpaar mit einer Stahllamelle bildet, ist die Lamellendickenabnahme im Vergleich mit den anderen Lamellen ca. 50 % kleiner. Dies gilt in gleicher Weise auch für die aus kolbenseitiger Sicht letzte Stahllamelle. Hieraus können die unterschiedlichen Einflüsse des Setzens und des Verschleißes auf die Lamellendickenabnahme bestimmt werden, da bei den äußeren Belaglamellen deutlich zwischen den Einflüssen des Setzens und des Verschleißes unterschieden werden kann. Um das Setzen genauer zu betrachten, wird eine Versuchsreihe, bei der die Lamellen mit einer ähnlichen Flächenpressung belastet werden durchgeführt. Der ermittelte Setzbetrag bezieht sich auf die erste (Belag-)Lamelle (kolbenseitig). Bild 120 stellt exemplarisch das Setzen ei des organischen Belags in Abhängigkeit drei Nutbilder, Radial- Gruppenparallel- und Waffelmusternutung (siehe Kapitel 8.1.2) dar. Der gemessene Setzbetrag der jeweiligen Beläge zeigt, dass das Setzen bei dem Belag mit dem gruppenparallelen Nutbild am höchsten ist. Der geringste Setzbetrag wird bei

den Lamellen mit dem Nutbild Waffelmuster gemessen, dazwischen befindet sich der Setzbetrag der Lamellen mit Radialnutbild.

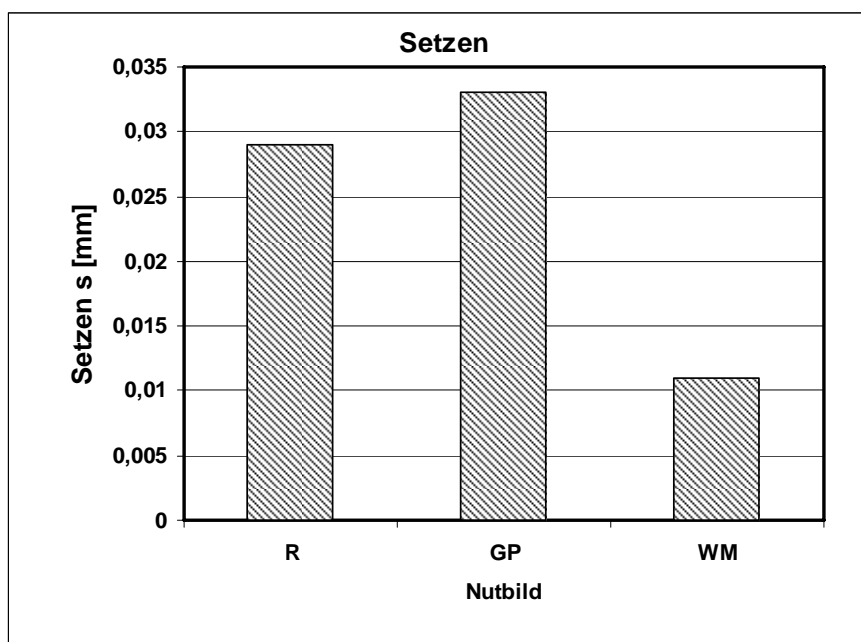


Bild 120: Exemplarische Darstellung das Setzen des organischen Belag (OB) nach der Untersuchung mit den drei Nutbilder (Radial- Gruppenparallel- und Waffelmuster)

9.3 Verschleiß des Sinterbelages

Allgemein ist zu sagen, dass der Verschleißwiderstand der Sinterlamelle höher ist als der Stahllamelle. In den Versuchen mit Stahl/Sinter Paarungen ergab eine Rauheitsmessung der Stahllamelle im Kupplungsbetrieb, dass die Stahllamelle deutlich im Vergleich zum Neuzustand (R_z ca. $2,5 \mu\text{m}$) geglättet wurde, dabei beträgt die Rauhtiefe R_z im gelaufenen Zustand ca. $0,4 \mu\text{m}$. Trotzdem waren auch nach langen Laufzeiten (ca. 20 Min.) immer noch große Flächen auf den einzelnen Belägen zu erkennen, die offensichtlich nicht am Reibprozess beteiligt waren. Die Ursache liegt in der geringen Elastizität des Sinterbelags und der damit zusammenhängenden nicht optimalen Flächenpressungsverteilung.

In Bild 121 sind Stahl- und Sinterlamellen im gelaufenen Zustand zu sehen.



Bild 121: Sinter- und Stahllamellen im gelaufenen Zustand

Man sieht hier eindeutig die beanspruchten temperatur-bedingt verfärbten Bereiche der Sinter- und Stahllamellen. In den Bereichen des Innendurchmessers (ca. 5 % vom Innendurchmesser gesehen) sind so gut wie keine Verfärbungen auf den Sinterlamellen erkennbar. Ab 25 % lagert sich Ölkohle ab, die bei 30 bis 35 % die Porosität der Sinterstruktur herabsetzt. Rückstände von verbranntem Öl in den Poren sind im Bereich von 10 bis 20 % vom Außendurchmesser ausgehend zu finden.

Die Verschleißmessung ergab eine Dickenabnahme von 0,02 mm (siehe Bild 105). Die einseitig belasteten Lamellen wiesen einen um die Hälfte verringerten Verschleiß auf. Bei allen Lamellen lag eine Parallelitätsabweichung von maximal 0,01 mm zwischen den Außen- und Innendurchmesser vor.

Die Stahllamellen weisen in den beanspruchten Bereichen deutliche tiefblaue Verfärbungen auf, die den Anlassfarben von Stahl entsprechen. Dabei tritt die Blaufärbung bei 70 % vom Außendurchmesser ausgehend auf.

Der Verschleiß der Stahllamellen weist einen keilförmigen Verlauf auf. Die Dickenabnahme liegt zwischen 0,007 und 0,02 mm. Gerade an den inneren Randbereichen ist so gut wie kein Verschleiß vorhanden. Dies bestätigt auch eine Vermessung der Stahloberfläche von der Lamellendickenabnahme der Stahllamelle im gelaufenen und neuen Zustand. Die Beanspruchungszonen liegen in der Nähe des äußeren Radius, wobei die Randbereiche der gelaufenen Lamelle noch dieselben Abmessungen besitzen, wie die der Neuen.

Betrachtet man die Stereomikroskopischen Aufnahmen der Stahllamelle, so kann auf ein Abrasionsverschleiß geschlossen werden, weil die Stahloberfläche in den beanspruchten Bereichen stark in Laufrichtung verkratzt sind. Die Sinterbeläge weisen im Neuzustand eine

hohe Oberflächenrauheit auf und sind zudem sehr hart. So kommt es im Laufe des Betriebs zu Riefenbildung in Laufrichtung und Mikrozerspannungen des Stahlkörpers durch das Einwirken der harten Rauheitshügel der Sinterbeläge in den Stahlbelag.

In manchen Fällen kam es bei Temperaturen von über 250 °C zur adhäsiven Beanspruchung, verbunden mit Sinterübertrag auf die Stahllamelle. Dabei werden die zunächst vorhandenen Deckschichten, die durch die Schmierstoffadditive und die Reibmaterialien erzeugt werden, abgetragen. Es bilden sich atomare Bindungen (Mikroverschweißungen), vor allem an den plastisch deformierten Mikrokontakten zwischen den Stahl- und Sinterbelägen aus. Dies ist auf den Zusammenbruch des Ölfilms und thermische und mechanische Überlastung zurückzuführen. Die im Versuch erreichten Temperaturen lagen meist zwischen ca. 230°C und 250 °C, wodurch der Anteil der hydrodynamischen Reibung und die kinematische Viskosität des Kühlöls kleiner werden (siehe Bild 122).

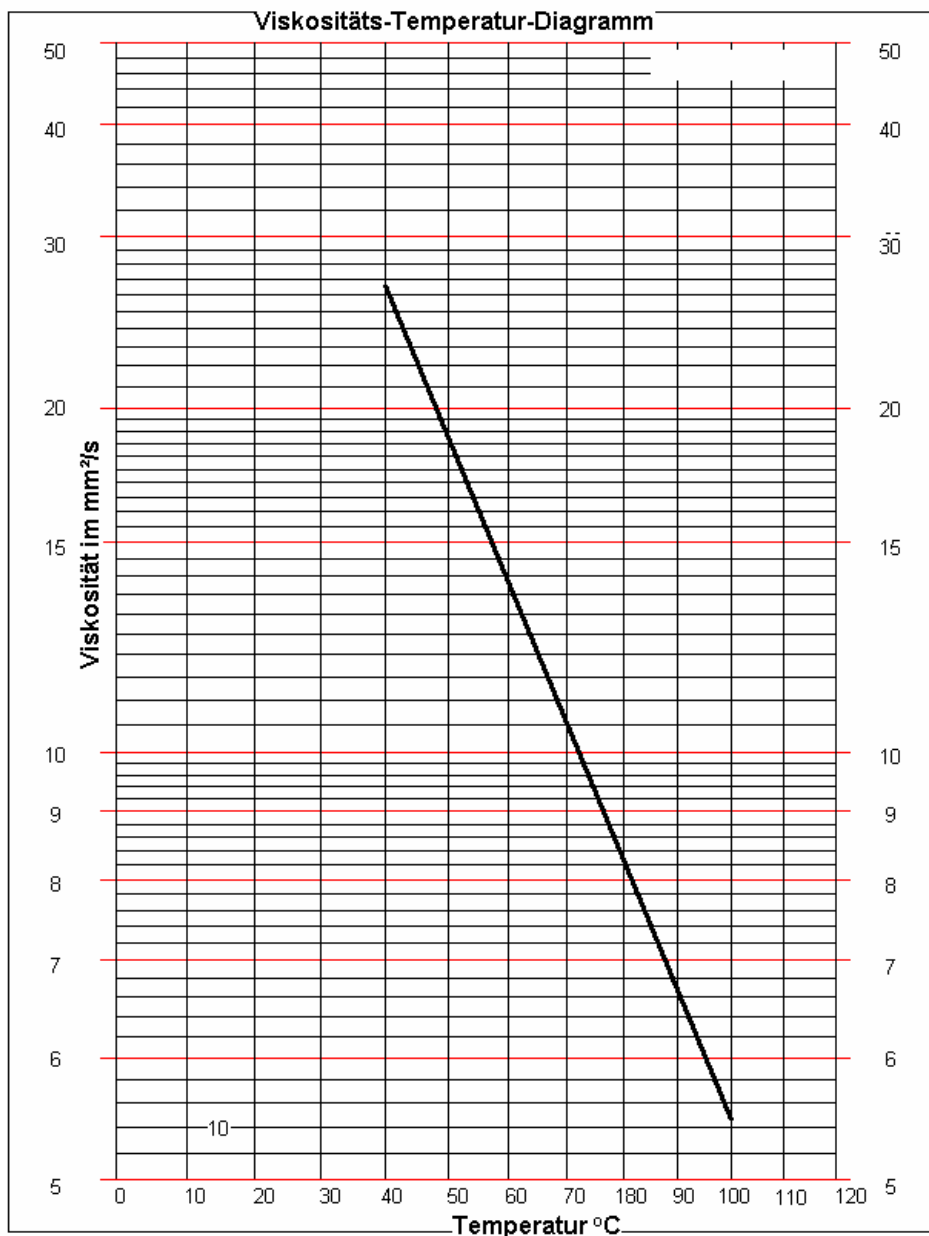


Bild 122: Temperatur- Viskositätskurve des Versuchsöl ÖL_A⁹²

Durch die momentane örtliche Festkörperberührung mit gekoppelten Oberflächenverschweißungen, kommt es zu einem „Temperaturblitz“. Dabei werden die Verschweißungen unmittelbar wieder aufgerissen, die mit der Zeit die Stahllamelle sprengen^{93,94}.

Um den Sinterübertrag zu verhindern, sollte für eine gute Kühlung der Beläge gesorgt werden, eventuell mit einer Rückkühlung des durchströmten Kühlöls.

⁹² Shell & DEA Oil GmbH 2004

⁹³ Mosbach 2002

⁹⁴ Gemeinholzer 1986

10 Zusammenfassung

Die Anforderungen an nasslaufende Lamellenkupplungen und –bremsen sind durch ihr breites Anwendungsfeld in der Antriebstechnik höchst unterschiedlich. Für die Auslegung von nasslaufenden Lamellenkupplung und –bremsen waren bisher die relevanten Kenngrößen, Belastungsgrenzen und -parameter im Dauerschlupfbetrieb nicht bekannt. Durch das mit diesem Forschungsvorhaben erreichte Ziel, die entscheidenden Einflüsse auf die Leistungsgrenzen im Dauerschlupfbetrieb zu identifizieren, ist es jetzt erstmalig möglich nasslaufende Lamellenkupplungen für den Dauerschlupfbetrieb systematisch auszulegen. Hierzu stehen dem Kupplungssystementwickler als Ergebnis dieses Vorhabens - neben einer ausgereiften Untersuchungsmethode - Basisdaten zur Beschreibung des Verhaltens ausgewählter Lamellenkupplungen im Dauerschlupfbetrieb zur Verfügung.

Um die beschriebenen Hauptziele dieser Arbeit systematisch erreichen zu können, wurde am Institut für Produktentwicklung (IPEK) ein komplett neuer Prüfstand für die Untersuchung von nasslaufenden Lamellenkupplungen im Dauerschlupfbetrieb entwickelt und aufgebaut.

Die entwickelte Untersuchungsmethodik wurde von Experten begutachtet, kritisch geprüft und als richtig anerkannt.

Im Folgenden sind die wesentlichen Einzelerkenntnisse aus den Versuchsreihen zusammenfassend aufgeführt.

Im Bereich der Papierreibbeläge, wie sie z. B. in Kraftfahrzeug -Anwendungen zum Einsatz kommen, konnte deutliche der Einfluss der Höhe des Kühlölvolumenstroms auf die im Dauerschlupf zu ertragende maximale Reibleistung nachgewiesen werden. Es konnte anhand von drei anwendungstypischen Kühlschmiermedien gezeigt werden, dass die Art des Schmierstoffs von ganz entscheidender Bedeutung für das Verhalten des Gesamtsystems ist. Hierbei ändert sich neben den im Dauerschlupf ertragbaren Reibleistungen, insbesondere das Verschleiß- und Reibwertverhalten. Von ebenso hoher Relevanz ist die Ausführung der Belagnutung: Hier konnten signifikante Unterschiede in der Höhe der ertragbaren Reibleistungen in Abhängigkeit der Belagnutung nachgewiesen werden. Es lassen sich weiterhin deutliche Tendenzen des Einflusses der Belagnutung auf das Verschleiß- und Setzverhalten des Lamellensystems ableiten.

Als ein weiterer - a priori unbekannter - Einflussparameter wurde die geometrische Einbaulage der Lamellen identifiziert. So zeigte sich belagspezifisch und reproduzierbar eine in Richtung des Anpresskolbens zunehmende Lamellendickenabnahme der einzelnen Belaglamellen.

Weitere, zum Teil in der Fachwelt a priori als relevant für die ertragbare Reibleistung unter Dauerschlupfbeanspruchung angesehene Einflussparameter, wie z. B. die Ausführung als Sinus- oder Planlamellen, sowie die Anzahl der Reibflächen erwiesen sich im Laufe der

Arbeit als wenig oder von nicht so großer Bedeutung für die Auslegung von Dauerschlupf betriebenen Lamellenkupplungen.

Im Bereich der sintermetallischen Reibbeläge zeigten sich signifikante Unterschiede im Friktionsverhalten im Vergleich zu den zeitlich früher durchgeführten Untersuchungen an Friktionspaarungen mit Papierreibbelägen. So zeigten sich zum Teil bereits deutlich vor dem Erreichen der Leistungsgrenzlinie bestimmende Abbruchkriterien, wie sehr ausgeprägte Reibwert- und über die aktive Reibfläche der Stahllamelle verteilte Temperaturschwankungen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde die bereits definierte Grundmethode erweitert. Es wurde ein Übergangsbereich (in der vorliegenden Arbeit als quasi-stabiler Bereich bezeichnet) definiert. In diesem Bereich können Lamellenkupplungssysteme mit sintermetallischen Reibbelägen noch betrieben werden. Mit Blick auf schwingungs- bzw. komfortkritische Anwendungen ist davon jedoch abzuraten.

Trotz des tribologisch unterschiedlichen Verhaltens der sintermetallischen Reibbeläge, konnten zum Teil vergleichbare Einflussgrößen ermittelt werden. So stellt auch hier die Höhe des Kühlölvolumenstroms einen signifikanten Einflussparameter dar. Darüber hinaus hat die Höhe der Grunddrehzahl (Drehzahl der antriebsseitigen Innenlamellen (hier mit Waffelnutung) einen deutlichen Einfluss auf die Höhe der zu ertragenden Reibleistung. Hier kann also davon ausgegangen werden, dass nicht alleine die Höhe des Volumenstroms, sondern auch die Verweildauer des Kühlschmierstoffs in der direkten Nähe zum tribologischen Kontakt von Bedeutung für das Systemverhalten ist.

Die aus bereits anderen Forschungsvorhaben bekannten Einglättungseffekte konnten auch für den Bereich der dauerschlupfenden Lamellenkupplung nachgewiesen werden.

11 Ausblick

Mit Blick auf die Ergebnisse das mit dieser Arbeit abgeschlossenen Forschungsvorhaben kann festgestellt werden, dass es möglich ist, nasslaufende Lamellenkupplungen hinsichtlich des Einsatzes in Dauerschlupfanwendungen auszulegen. Mit Blick auf die unterschiedlichsten Ausführungsformen der nasslaufenden Lamellenkupplungen sind für die Erstellung einer allgemeingültigen Auslegungsrichtlinie weitere Untersuchungen notwendig. So wurde in diesem Vorhaben eine, mit Blick auf die gängige Praxis, die als besonders relevant erscheinende Auswahl an Lamellengeometrien, Reibmaterialien und Kühlschmierstoffe getroffen. Zukünftig muss durch die systematische Erweiterung des Parameterfeldes, um die Kombination weiterer Geometrie- und Werkstoffparameter, (z.B. sintermetallische Reibbeläge in der Lamellenbaugröße I, bzw. Papierreibbeläge in der Lamellenbaugröße II) der Einfluss der Einzelparameter und der Einfluss der Kombination der Einzelparameter auf das Systemverhalten weiter untersucht werden. Auch der Einsatz neuer, alternativer Reibwerkstoffe und die Optimierung von Kühlschmierstoffen für Dauerschlupfanwendungen, sowie die Konzepte zur Führung der Kühlschmierstoffe durch die aktive Friktionspaare, haben das Potenzial, die Anwendung und Auslegung von nasslaufenden Lamellenkupplungen in Dauerschlupfzuständen weiter auf eine technisch-wirtschaftlich beherrschbare Basis zu stellen.

12 Literaturverzeichnis

Albers / Herbst 1998 Albers, A.; Herbst, D.: Rupfen – Ursachen und Abhilfen. In: Luk GmbH & Co. (Veranst.): 6. Internationales Kolloquium (Baden Baden 1998). Bühl : LuK GmbH & Co., 1998, S.23-46

Albers / Herbst 2000 Albers, A. ; Herbst, D.: Schwingungen in Reibkupplungen – Ursachen, Auswirkungen, Abhilfen. VDI-Berichte 1568. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000

Albers / Lux 1999 Albers, A.; Lux, R.; Burger, W.: Neuartiger, universell einsetzbarer Antriebsbaugruppen_Prüfstand. Meß- und Versuchstechnik im Fahrzeugbau. VDI Berichte 1470 (1999), S. 143-161

Ali Haj 2002 Fraj, Ali Haj: Dynamik und Regelung von Automatikgetrieben Fortschritt-Berichte VDI (2002), Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr.489, Düsseldorf: VDI-Verlag

Appelhoff / Brinkmann 1986 Appelhoff, H; Brinkmann, H.: Druckölgeschaltete Lamellenkupplungen für Schiffshauptantriebe Antriebstechnik 25 1986 Nr. 10 S. 40- 44

Bartz 1979 Bartz, W.J.: Reibungsminderung durch Schmierstoff und Additive (Friction Modifier) Perlach Verlag 1979

Beisel 1983 Beisel, W.: Untersuchungen zum Betriebsverhalten nasslaufender Lamellenkupplungen Dissertation (1983) TU Berlin

Bergheim 1997 Bergheim, M.: Organisch gebundene Kupplungsbeläge Möglichkeiten und Grenzen VDI-Berichte, Band 1323 (1997), Seite 527-548, Düsseldorf: VDI-Verlag

BorgWarner Transmission Systems GmbH.2004

www.turbos.bwauto.com

Brügel / Thies / Naumann 1989 Brügel, E.; Thies, H,-E ;Naumann, W.: Friedrichhafen

Einfluß des Schmierstoffes auf Schaltelemente von Fahrzeuggetriebe. Tribologie und Schmiertechnik 06/1989, Jahrgang 36, Seite 283-286

Czichos / Habing 1992 Czichos H.; Habing, K.-H. Tribologie Handbuch. Braunschweig:Wieweg 1992

Dabrowski / Meyer 1990 Dabrowski J.R.; Meyer, K.: Tribologisch wirksame Additive. Tribologie und Schmiertechnik 05/1990, Jahrgang 37, Seite 264-268

Döbereiner / Höhn / Michaelis 1998 Döbereiner, R.-S.; Höhn, B.-H.; Michaelis, K: Technische Arbeitstagung Hohenheim, 26. März 1998 Zeitschrift für Mineralöl-Anwendungstechnik, 43. Jahrgang, Seite 1-27

Dörpmund / Oberpichler 1979 Dörpmund, H.; Oberpichler G.: ATF-ein kompliziertes „Konstruktionselement“ in automatischen Planeten Getrieben ATZ 81 1979 S. 161- 164

Duminy 1979 Duminy, Jacques:Beurteilung des Reibschwingverhaltens schaltbarer Reibkupplungen. Dissertation (1979) TU Berlin

Dümeland 1983 Dümeland, M.: Weiterentwicklung störungsbehafteter Produkte nach konstruktionsmethodischen Kriterien Bochum Ruhr-Universität, Schriftreihe Heft 84.2, Dissertation (1983)

Elbl / Föll / Schüler 2001 Elbl, H.; Föll, W.; Schüler, W.: Tabellenbuch Fahrzeugtechnik 21. Auflage (2001) Holland & Josenhans Verlag Stuttgart

Engelen 1996 Engelen, H.: Lebensdauerfüllung Automatischer Getriebe. Tribologie & Schmierungstechnik 43. Jahrgang 6/1996 S.314- 320

Erhard 1999 Erhard, G.: Konstruieren mit Polymerwerkstoffen 2. Auflage, München; Wien: Hanser Verlag 1999

Franek 1985 Franek, F.: Tribologisch beanspruchte Komponenten im Elektromechanischen Gerätebau. Tribologie & Schmierungstechnik 32. Jahrgang 4/1985 S.216

Fischer / Otto 1994 Fischer, R., Otto D.: Wandlerüberbrückungssysteme. 5. LuK-Kolloquium (1994), S. 113-144

- Federn / Beisel 1986** Federn, K.; Beisel, W.: Betriebsverhalten nasslaufender Lamellenkupplungen. Antriebstechnik 25 1986 Nr. 10 S. 47- 52
- Federn 1977** Federn, K.: Leistungsgrenzen der Reibpaarung Stahl/Sinterbronze ölgeschmierter Reibkupplungen. Antriebstechnik Nr. 17 1977 S. 703- 707
- Frey / Neumann 1993** Frey, D.; Naumann, W.: Reibbeläge für ölgekühlte Reibschalt elemente. Antriebstechnisches Kolloquium 1993. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1993, S. 247- 273
- Friedrich 1995** Friedrich, O.: Leerlaufuntersuchungen zum thermischen Verhalten naßlaufender Lamellenkupplungen in dynamisch belasteten Schiffsgetrieben Deutsche Dissertation (1995) Universität der Bundeswehr, Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik
- Förster / Lindner / Steinl / Stürmer 2004** Förster, B.; Lindner, J.; Steinl, K.; Stürmer, W: Kupplungssysteme für schwere Nutzfahrzeuge ATZ 10/2004, Jahrgang 106, Seite 878- 887
- Funk 1997** Funk, W.: Lamellentaueln als Schadensursache bei naßlaufenden Lamellen kupplungen. VDI Berichte 1323 (1997), S. 563-581.
- Garkunov 1977** Garkunov, D.-N.: Erhöhung der Verschleißfestigkeit auf der Grundlage der selektiven Übertragung VEB Verlag Technik Berlin 1977
- Gemeinholzer 1971** Gemeinholzer, G.: Ölgekühlte Lamellenkupplung. Werkstatt und Betrieb, Heft 2, 1971
- Gemeinholzer 1985** Gemeinholzer, G.: Leistungsgrenzen der Reibpaarung Stahl/Sinterbronze ölgeschmierter Reibkupplungen. Antriebstechnik Nr. 18 1985 S. 18- 28
- Gemeinholzer 1986** Gemeinholzer, G.: Reibbelag aus Sinterwerkstoff hält aggressiven Ölen stand Maschinenmarkt, Würzburg 91 (1986) 70 S. 1372
- Greiner 1997** Greiner, J.: Die Entwicklung der Lamellenschaltetelemente für das 5-Gang Pkw-Automatgetriebe W5A580 von Mercedes-Benz. VDI Berichte 1323 (1997), S. 395-413
- Gemeinholzer 1971** Gemeinholzer, G.: Ölgekühlte Lamellenkupplung Werkstatt und

Betrieb. 104 (1971) 2, 4, 7 S. 125-130, S. 213-216, S. 501- 507

Hasselgruber 1953 Hasselgruber, H.: Temperaturberechnung für mechanische Reibkupplung. Diss. TH Aachen 1953

Habing 1985 Habing, K.-H.: Oberflächenschutzschichten für die Tribotechnik (2). Tribologie & Schmierungstechnik 32. Jahrgang 4/1985 S.221- 215

Habig / Evers / Chatterjee-Fischer 1978 Habig, K.-H.; Evers W. ; Chatterjee-Fischer, R.: Verschleiß- und Versagensuntersuchungen an gehärteten, nitrierten und boriierten Stählen in Abhängigkeit von der Wärmebehandlung des Gegenkörpers und der chemischen Zusammensetzung von Schmierstoffadditiven. HTM 33 1978 S. 271-280

Hausdorf / Spensberger 2003 Hausdorf, V.; Spensberger, Ch: Lamellensicherheitskupplung mit temperaturabhängiger Freischtaltung. Entwicklung und Erprobung einer Lamellensicherheitskupplung mit selbständiger Freischtaltung bei Überlast. VDI-Berichte, Band 1786 (2003), Seite 525-532, Düsseldorf: VDI-Verlag

Hämmerl 2003 Hämmerl, B: Neuartiger thermischer Überlastschutz für Nasslauf – Reibkupplungen am Beispiel von Exzenterpressen. VDI-Berichte, Band 1786 (2003), Seite 533-540, Düsseldorf: VDI-Verlag

Hämmerl 1995 Hämmerl, B: Auslegungsrichtlinien für ölgekühlte Lamellenkupplungen; Abschlußbericht FVA – Vorhaben Nr. 150/I, II (1995)

Hämmerl 1994 Hämmerl, B.: Lebensdauer- und Temperaturverhalten ölgekühlter Lamellenkupplungen bei Lastkollektivbeanspruchung. Diss. TU München 1994

Hein / Nauerz / Wörner 1995 Hein, L.; Nauerz, H.; Wörner O.: Aufbau und Steuerung einer schlupfgeregelten Überbrückungskupplung im hydrodynamischen Wandler. VDI Berichte 1175 (1995), S. 319-337

Heilenkötter 1990 Heilenkötter, D.: Untersuchungen zum Schlupfverhalten nasslaufender Lamellenkupplungen Deutsche Dissertation (1990) Universität der Bundeswehr, Fachbereich Maschinenbau

Herausgeber Peeken / Troeder 1993 Herausgeber Peeken, H., Troeder, Ch.: Industrieentwicklung und Forschungsergebnisse für die Maschinenüberwachung und die Konstruktion

in der Antriebstechnik. Antriebstechnisches Kolloquium 1993

Hirt / Witzenberger 1995 M. Hirt, M. Witzenberger: Modulationskupplung für Nutzfahrzeuggetriebe. VDI Berichte 1175 (1995), S. 407-417

Holzer / Frey / Matthes 1997 Holzer, N.; Frey, D.; Matthes, B.: Schleppmomente an naßlaufenden Lamellenbremsen. VDI Berichte 1323 (1997), S. 469-489

Höhn Höhn, B.-R.: Einfluss der Ölalterung auf Reibwertstabilität von Lamellenkupplungen FVA Nr. 297 (FZG) TU München

Höhn / Pflaum / Hämmerl 1997 Höhn, B.-R.; Pflaum, H.; Hämmerl, B.: Ermittlung der Leistungsgrenze ölgekühlter Lamellenkupplungen anhand von Temperaturkriterien. VDI Berichte 1323 (1997), S. 507-525

Höhn / Pflaum / Mosbach 2003 Höhn, B.R.; Pflaum, H.; Mosbach, C. Methodik zur Beurteilung des Schmierstoffeinflusses auf das Reibschwingverhalten nasslaufender Lamellenkupplungen. VDI-Berichte, Band 1786 (2003), Seite 455-468, Düsseldorf: VDI-Verlag

Jäger / Hofmann / Dimmig / Oehler 1990 Jäger, G; Hofmann J.; Dimmig T.; Oehler R.: Neue schwefelhaltige Additivkomponenten für Getriebeöl. Tribologie & Schmierungstechnik 37. Jahrgang 5/1990 S. 258- 215

Kapl 1991 Kapl, G.: Hochbelastete Graphit-Reibbeläge. Antriebstechnik 30 (1991) 2, S. 50-53

Kragelski 1971 Kragelski, J.W. 1971 Reibung und Verschleiß. Carl Hanser Verlag München 1971

Matsumoto T. 1995 Matsumoto, T.: A Study of the Durability of a Paper-Based Friction Material Influenced by Porosity Journal of Tribology April 1995 Vol 117, S. 272-278

Mosbach 2002 Mosbach Chr.: Das Reibungs-und Reibschwingverhalten nasslaufender Lamellenkupplungen Dissertation 2002 TU München FZG

Oertel / Böhle 2002 Oertel jr., H. ;Böhle M. Strömungsmechanik. 2. Auflage 2002 Vieweg Verlag

Oerleke / Funk 2003 Oerleke, C.; Funk, W.: Einflußgrößen auf die Schleppmomente schnelllaufender Lamellenkupplungen in Automatgetrieben VDI-Berichte, Band 1786 (2003), Seite 469-488, Düsseldorf: VDI-Verlag

Perponcher 1998 Perponcher, Chr. v: Einfluß der Reibflächentopographie und Beanspruchungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. Diss. TU München 1998

Perponche / Höhn / Pflaum 1998 Perponcher Chr. v.; Höhn, B.-R; Pflaum, H.: Einfluß der Oberflächentopographie auf das Reibungsverhalten von Synchronisierungen unter Dauerbeanspruchung. VDI Berichte 1470 (1998), S. 229-242.

Ferstl 2003 Ferstl, F.: Reibung, Wärme, Verschleiß Autokinematische Mechanismen und Modelle in der Tribologie Dissertation (2003) FH Zittau/Görlitz, Shaker Verlag Aachen

Pfleger 1998 Pfleger, F.: Schalt- und Lebensdauerverhalten von Lamellenkupplungen Dissertation 1998 TU München FZG

Pfetscher1995 Pfetscher, A.: Experimentelle und numerische Untersuchung einer Spaltströmung unter hohem Druck und Temperaturen Dissertation (1995) TH Universität Karlsruhe

Razzaque / Kato 1999 Razzaque, M. M.; Kato, K.: Effects of Groove Orientation on Hydrodynamic Behavior of Wet Clutch Coolant Films. Journal of Tribology 121 (1999), S. 56-61

Rohm / Reißer 2004 Rohm A.; Reißer W. ZF Sachs AG Schweinfurt: Thermische Festigkeit von nasslaufenden Doppelkupplungen für Extrembelastungen – Auslegung, Simulation, Versuch. Konferenz-Einzelbericht: VDI-Berichte 2004

Santner 2004 Santner, E.: Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen Tribologische Optimierung und Schadensbekämpfung Kontakt & Studium Band 602 (2004) Expert Verlag

Schlünder / Martin 1955 Schlünder E-U.; Martin H.: Einführung in die Wärmeübertragung. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden,1995

Severin / Kleinlein 2003 Severin, D. ; Kleinlein, C.: Beziehungen zwischen den Vorgängen in der Kontaktfläche trockenlaufender Reibpaarungen und deren Verhalten im praktischem Betrieb: VDI-Berichte, Band 1786 (2003), Seite 243-263, Düsseldorf: VDI-Verlag

Severin / Dörsch 2001 Severin, D.; Dörsch St.: Mechanismen im Reibkontakt trockenlaufender Bremsen und Kupplungen Forschungsbericht, ZF Wear 249, 2001

Severin 2002 Severin D.: Der Reibmechanismus in thermisch hochbelasteten Reibkupplungen und Scheibenbremsen. Forschungsbericht, TU Berlin, 2002

Shell & DEA Oil GmbH 2004 Datenblatt des untersuchten Öls Shell ATF 1357.4, Herausgegeben durch die Shell AG 2004

Trepte 2003 Trepte, St.: Verschleißvorausberechnung und Lebensdauerprognose für Reibwerkstoffe VDI-Berichte, Band 1786 (2003), Seite 699-718, Düsseldorf: VDI-Verlag

Trepte 2001 Trepte, St.: Einlaufverhalten technischer Reibbeläge ATZ 12/2001, Jahrgang 103, Seite 1168-1177

Terauchi / Kohno / Nadano / Nakamoto 1988 Terauchi, Y.; Kohno, M.; Nadano, H.; Nakamoto Y. Scorino Resistance of Spur Gears with Various Coatings Bulletin of JSME Vol. 29 No. 247 January 1988 S. 235-240

Winkelmann / Harmuth 1985 Winkelmann, S.; Harmuth H.: Schaltbare Reibkupplungen Grundlage, Eigenschaften, Konstruktion Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1985

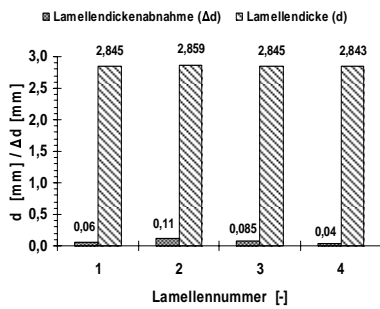
Weigand 1988 Weigand, M.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Betriebsverhalten einer nasslaufender Lamellenbremse Deutsche Dissertation (1988), TU Karl-Marx-Stadt, DDR

13 Anhang

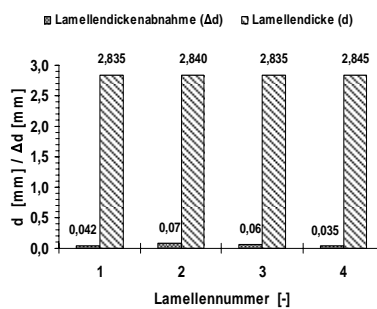
Dokumentation Papierlamelle der Baugröße I

Bremsbetrieb (BB)

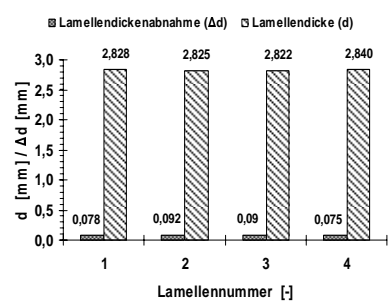
Lamellendickenabnahme der Lamellenpaketen A1_BB, A4_BB, und A7_BB an der Leistungsgrenze



A.1:Lamelledickenabnahme (A1_BB)



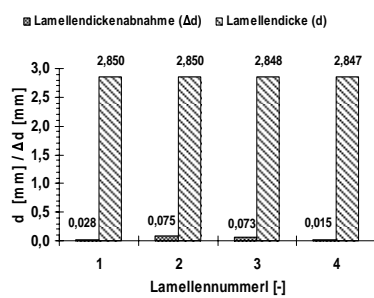
A.2:Lamelledickenabnahme (A4_BB)



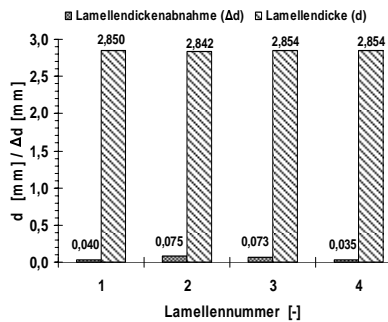
A.3:Lamelledickenabnahme (A7_BB)

Kupplungsbetrieb (KB)

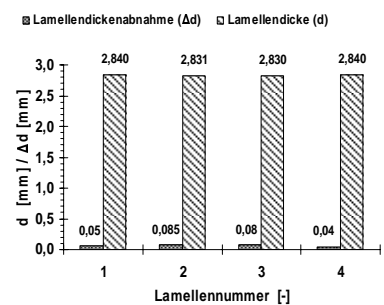
Lamellendickenabnahme der Lamellenpaketen A2_KB, A5_KB, und A8_KB an der Leistungsgrenze



A.4:Lamelledickenabnahme (A2_KB)

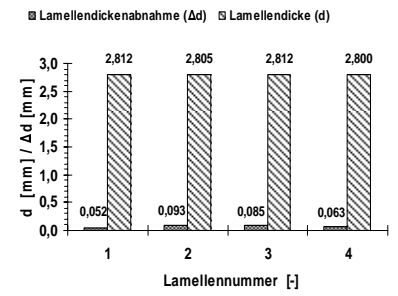
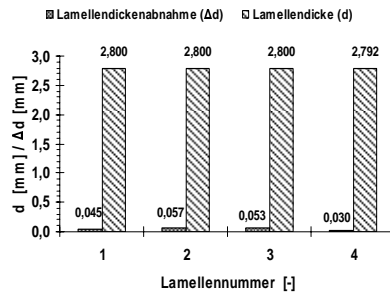
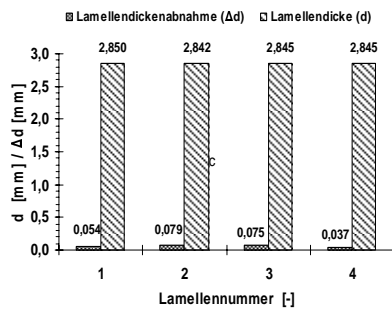


A.5:Lamelledickenabnahme (A5_KB)



A.6:Lamelledickenabnahme (A8_KB)

Lamellendickenabnahme der Lamellenpaketen B1_KB, B2_KB, und B3_KB an der Leistungsgrenze

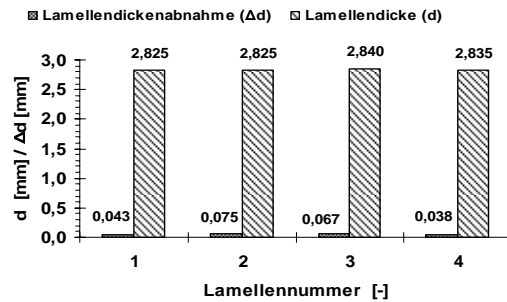
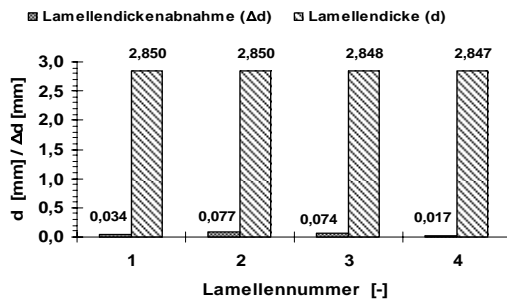


A. 7 : Lamelledickenabnahme (B1_KB);R

A. 8 : Lamelledickenabnahme (B3_KB); GP

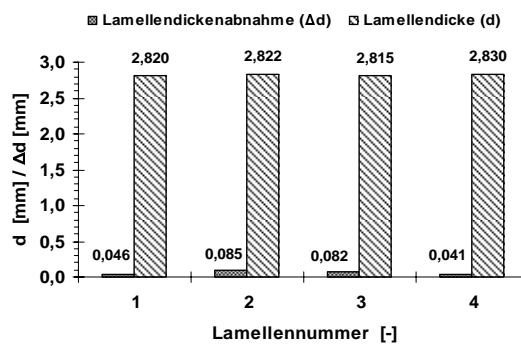
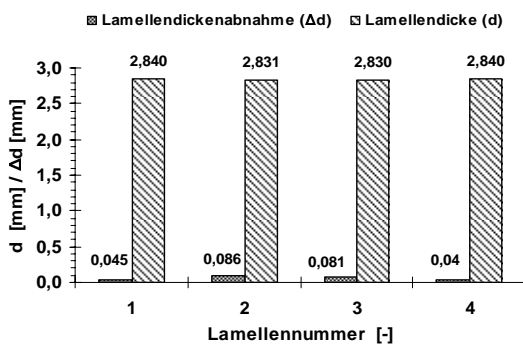
A. 9 : Lamelledickenabnahme (B2_KB); WM

Lamellendickenabnahme der Lamellenpaketen C1_KB, C2_KB, C3_KB und C4_KB an der Leistungsgrenze



A. 10: Lamelledickenabnahme (C1_KB) (plan)/ $V_{\dot{o}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

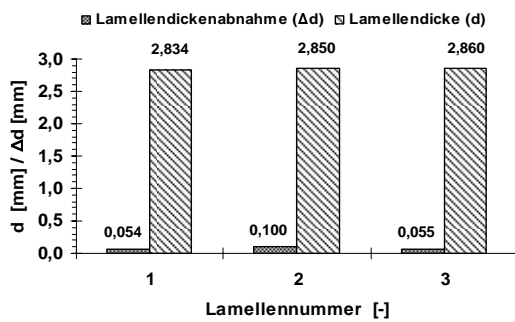
A. 11: Lamelledickenabnahme (C2_KB) (sinus)/ $V_{\dot{o}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$



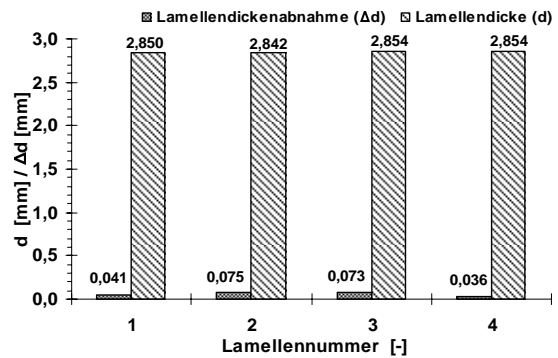
A. 12 : Lamelledicken-abnahme (C3_KB) (plan)/ $V_{\dot{o}} = 3\text{mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

A. 13 : Lamelledickenabnahme (C4_KB) (sinus)/ $V_{\dot{o}} = 3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

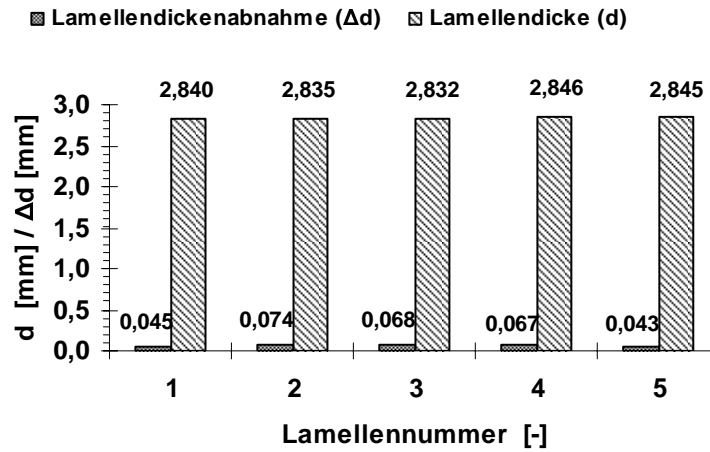
Lamellendickenabnahme der Lamellenpaketen D1_KB, D2_KB, D3_KB und D4_KB an der Leistungsgrenze



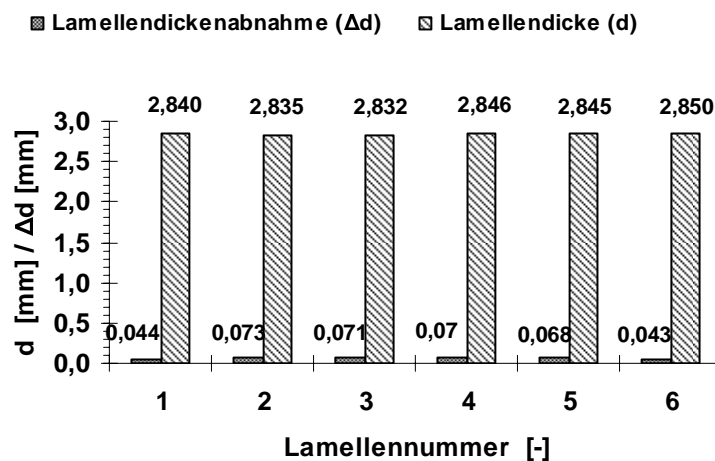
A. 14: Lamelledickenabnahme(D1_KB)
4 aktive Reibflächenpaare



A. 15: Lamelledickenabnahme(D2_KB) 6 aktive Reibflächenpaare

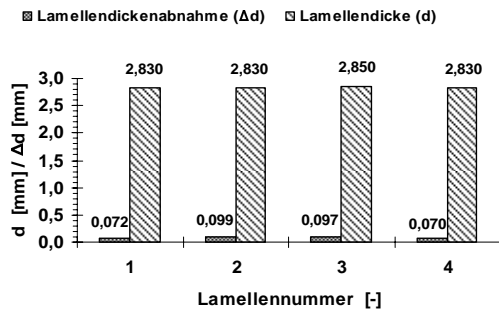


A. 16: Lamelledickenabnahme (D3_KB) 8 aktive Reibflächenpaare

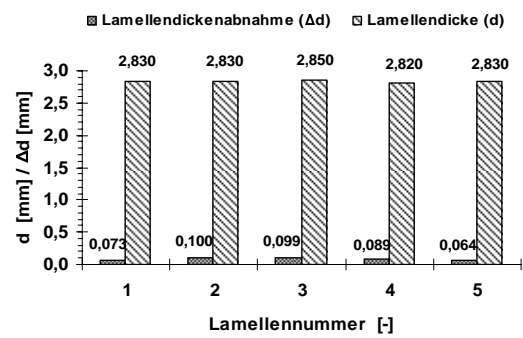


A. 17: Lamelledickenabnahme (D4_KB) 10 aktive Reibflächenpaare

Lamellendickenabnahme der Lamellenpaketen D5_KB, und D6_KB an der Leistungsgrenze



A. 18: Lamelledickenabnahme(D5_KB)
6 aktive Reibflächenpaare ÖI_B

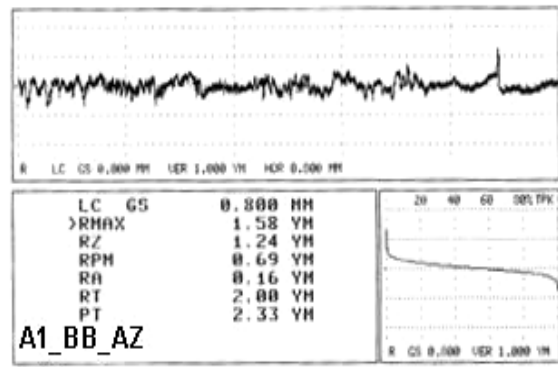
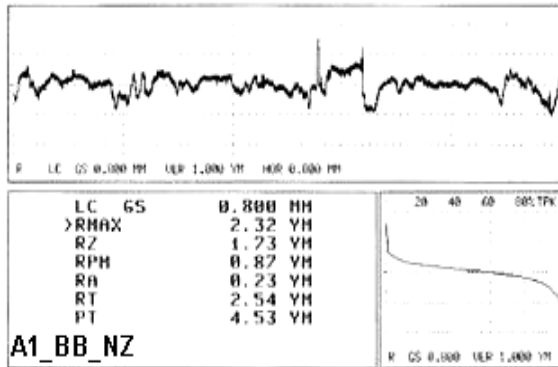


A. 19: Lamelledickenabnahme(D6_KB) 8 aktive
Reibflächenpaare ÖI_B

Dokumentation Stahllamellen der Baugröße I

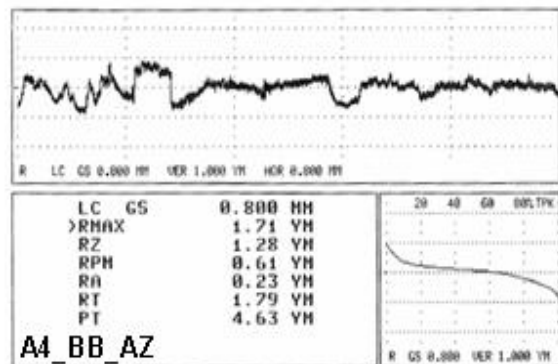
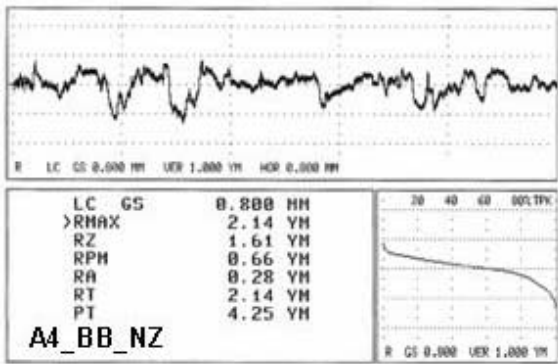
Bremsbetrieb (BB)

Rauhigkeitsmessung der Stahllamellen der Lamellenpakete A1_BB, A4_BB und A7_BB an der Leistungsgrenze



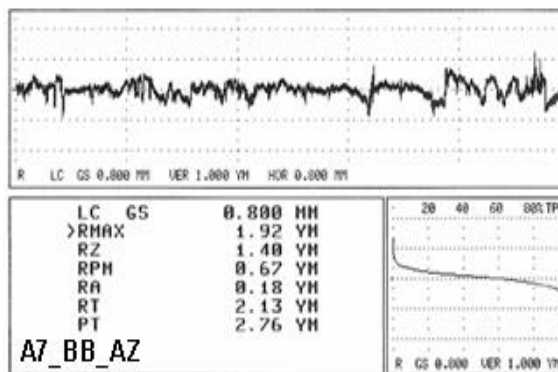
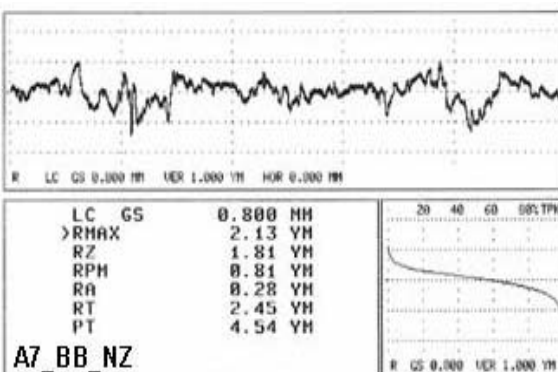
B.1: Rauhigkeitsmessung A1_BB Neuzustand

B.2: Rauhigkeitsmessung A1_BB eingelaufen



B.3: Rauhigkeitsmessung A4_BB Neuzustand

B.4: Rauhigkeitsmessung A4_BB eingelaufen

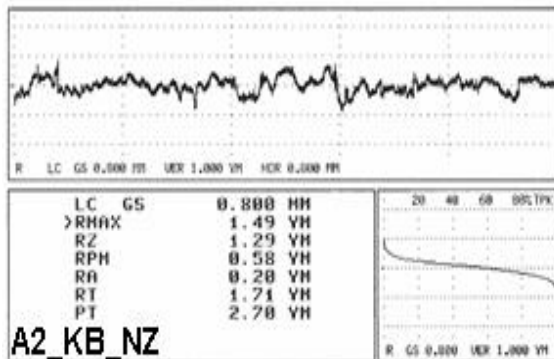


B.5: Rauhigkeitsmessung A7_BB Neuzustand

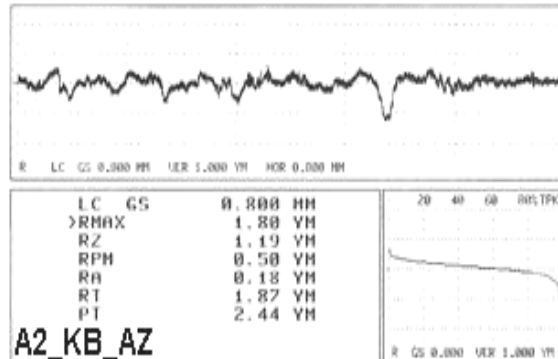
B.6: Rauhigkeitsmessung A7_BB eingelaufen

Kupplungsbetrieb (KB)

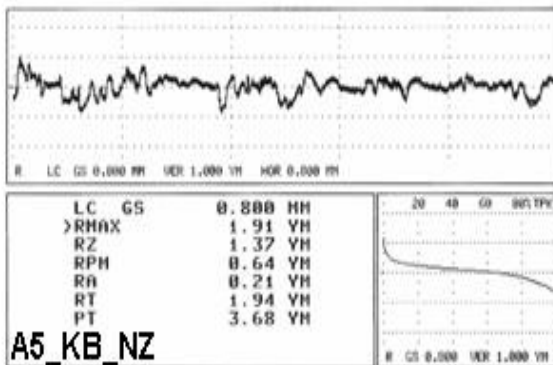
Rauhigkeitsmessung der Stahllamellen der Lamellenpaketen A2_KB, A5_KB, und A8_KB an der Leistungsgrenze



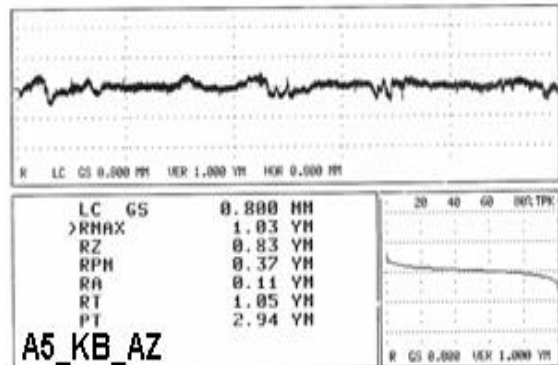
B.7: Rauigkeitsmessung A2_KB Neuzustand



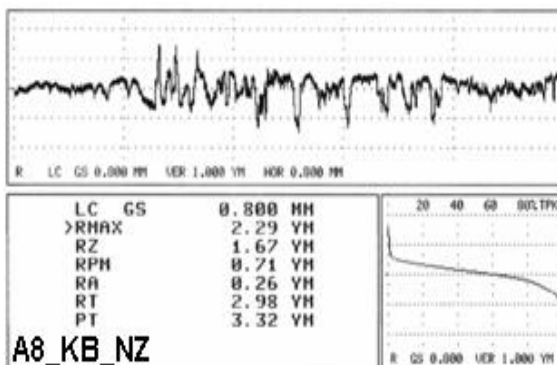
B.8: Rauigkeitsmessung A2_KB eingelaufen



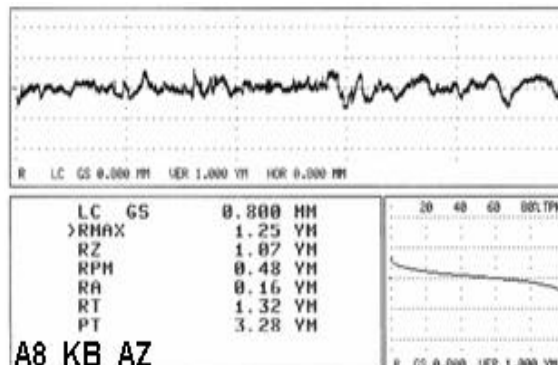
B.9: Rauigkeitsmessung A5_KB Neuzustand



B.10: Rauigkeitsmessung A5_KB eingelaufen

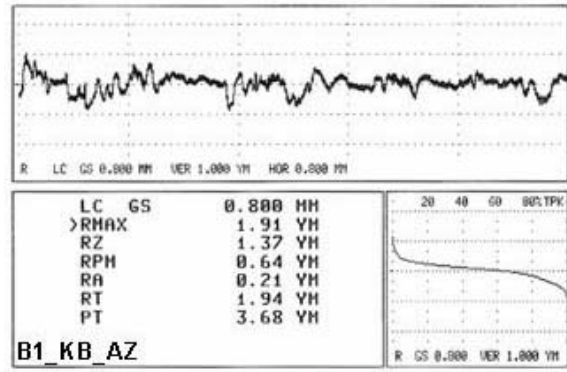
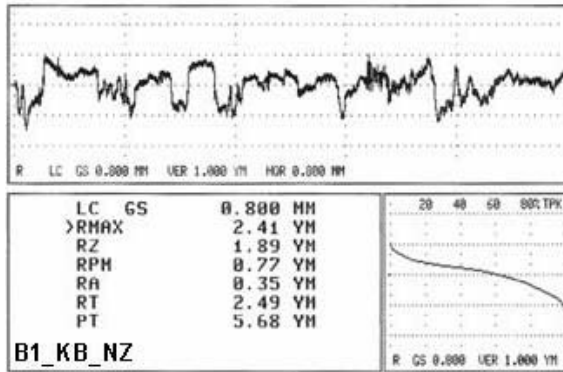


B.11: Rauigkeitsmessung A8_KB Neuzustand



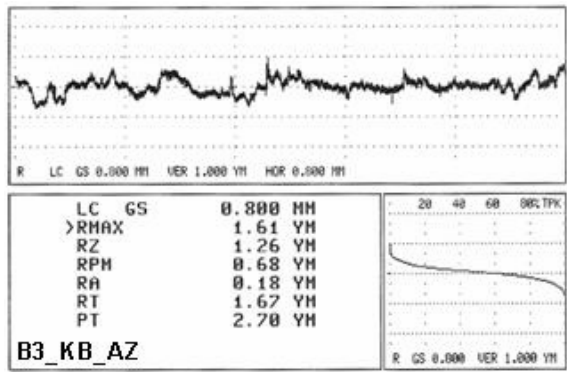
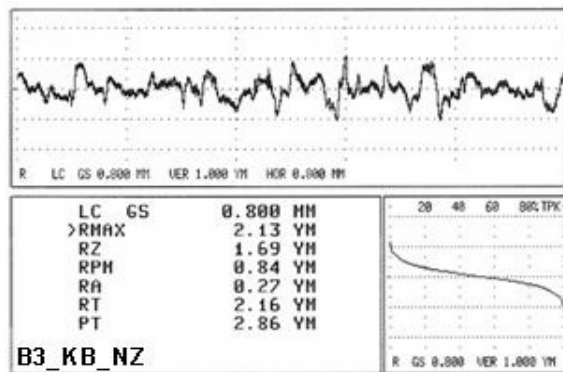
B.12: Rauigkeitsmessung A8_KB eingelaufen

Rauhigkeitsmessung der Stahlplatten der Lamellenpaketen B1_KB, B2_KB, und B3_KB an der Leistungsgrenze



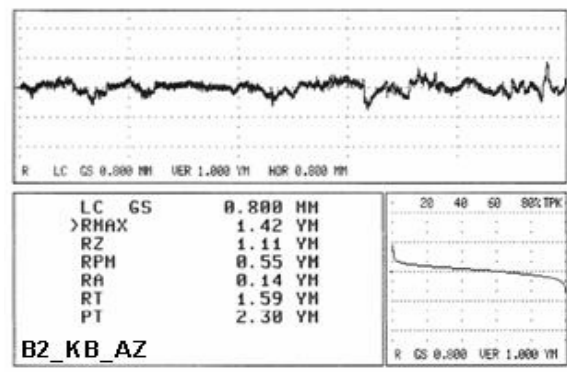
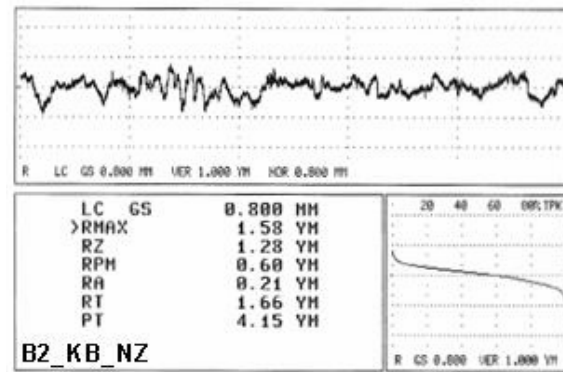
B.13: Rauigkeitsmessung B1_KB Neuzustand

B.14: Rauigkeitsmessung B1_KB eingelaufen



B.15: Rauigkeitsmessung B3_KB Neuzustand

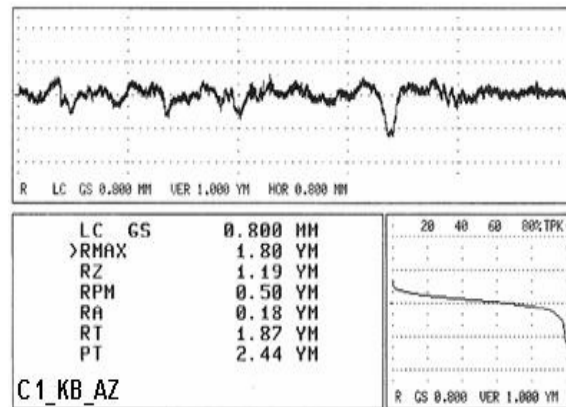
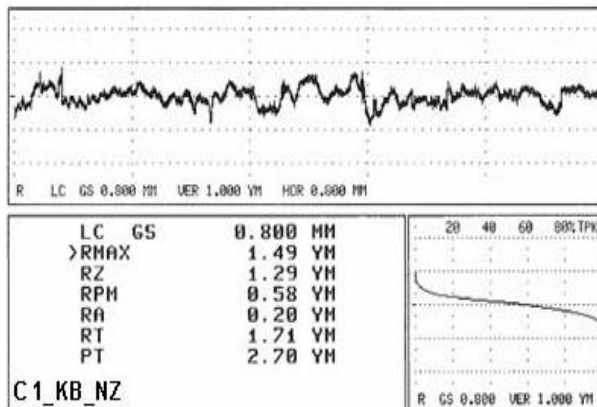
B.16: Rauigkeitsmessung B3_KB eingelaufen



B.17: Rauigkeitsmessung B2_KB Neuzustand

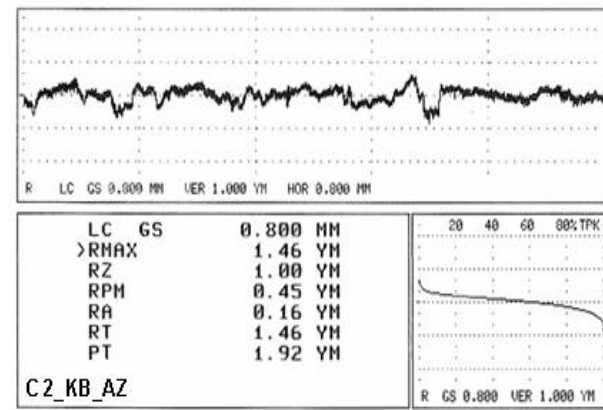
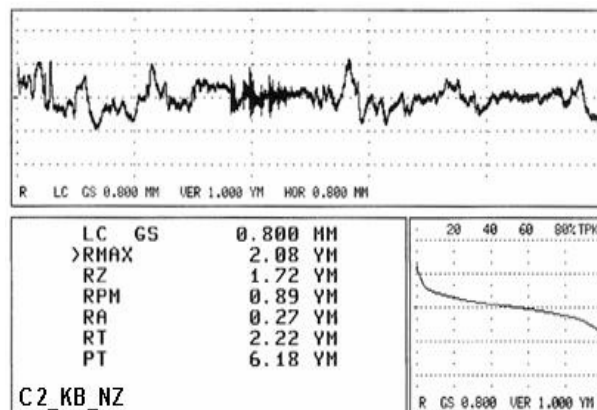
B.18: Rauigkeitsmessung B2_KB eingelaufen

Rauhigkeitsmessung der Stahlplatten der Lamellenpakete C1_KB, C2_KB, C3_KB und C4_KB an der Leistungsgrenze



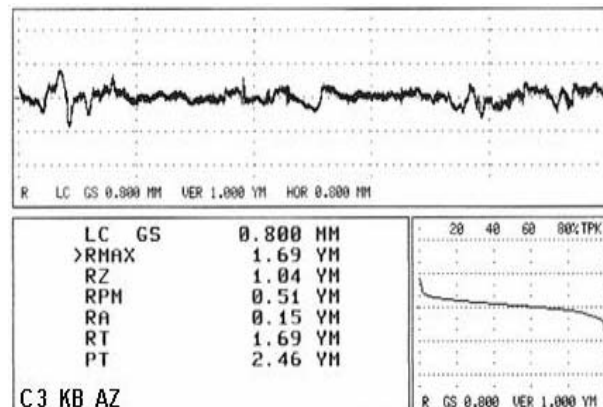
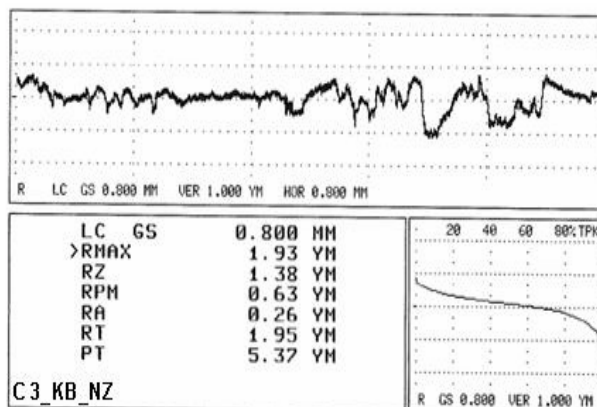
B.19: Rauigkeitsmessung C1_KB Neuzustand/
(plan)/ $V_{\dot{o}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

B.20: Rauigkeitsmessung C1_KB eingelaufen/
(plan)/ $V_{\dot{o}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$



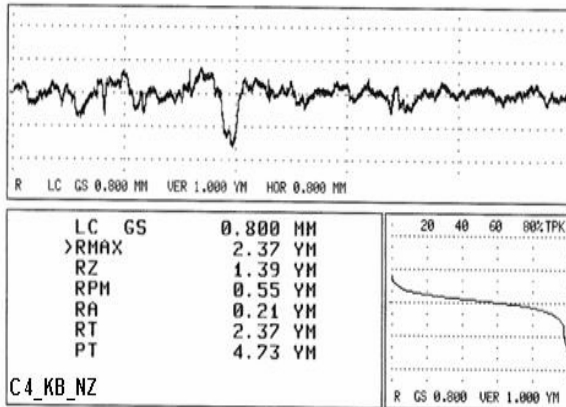
B.21: Rauigkeitsmessung C2_KB Neuzustand/
(sinus)/ $V_{\dot{o}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

B.22: Rauigkeitsmessung C2_KB eingelaufen/
(sinus)/ $V_{\dot{o}} = 0,5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

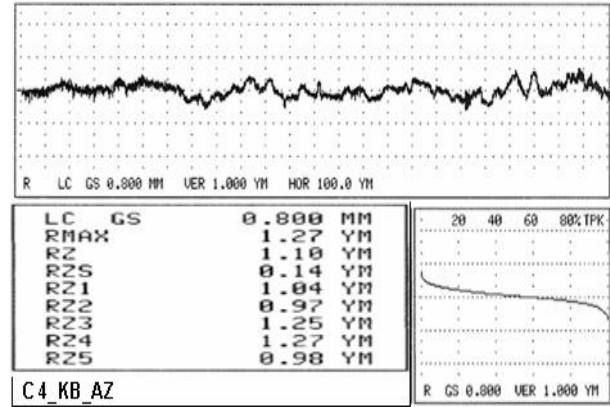


B.23: Rauigkeitsmessung C1_KB Neuzustand/
(plan)/ $V_{\dot{o}} = 3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

B.24: Rauigkeitsmessung C1_KB eingelaufen/
(plan)/ $V_{\dot{o}} = 3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$



B.25: Rauheitsmessung C4_KB Neuzustand/
(sinus)/ $V_{\dot{\sigma}} = 3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$



B.26: Rauheitsmessung C4_KB eingelaufen/
(sinus)/ $V_{\dot{\sigma}} = 3 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{s}$

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Khalid Abu Snima
Geburtsdatum: 6. Mai 1973
Geburtsort: in Gazastreifen/ Rafah (Palästina)
Staatsangehörigkeit: Palästinenser
Familienstand: Ledig

Bildungsgang:

1980 - 1986 Grundschule in Rafah (Palästina)
1986 - 1988 Mittelschule in Rafah (Palästina)
1989 - 1991 Gymnasium in Rafah (Palästina)
1992 - 1993 Studienkolleg der Universität Karlsruhe (TH)
1994 - 2001 Studium des Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe (TH)
Studienarbeit: „Entwicklung und Konstruktion einer Schalteinheit für Handschaltgetriebe“ bei dem IPEK Institut der Universität Karlsruhe (TH)
Diplomarbeit: „Prozessbeschreibung des Papierlaufes am Anleger einer Bogendruckmaschine und problemspezifische Lösungsgenese“ Fa. Heidelberger Druckmaschinen AG

Berufstätigkeit

01/1998-03/2000 Wissenschaftliche Hilfskraft (Hiwi) am Institut für Produktentwicklung (IPEK)
Thema:“ Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur Untersuchung von Trockenkupplungen“
06/1999-05/2000 Industrie-Grundpraktikum bei der Phi- GmbH CAD Entwicklung & Konstruktion
Thema: „Entwicklung und Konstruieren von Bauteile im Bereich Automobilbau sowie Maschinen- und Anlagebau“
01/2002-06/2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH)
Promotionsprüfung am 06.Oktober.2005