

Johannes Ulrich Kümmel

**Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter
Berührungsfreier Wellendichtungen**

D 93
ISBN 978-3-936100-72-3

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Johannes Ulrich Kümmel

aus Schwäbisch Hall

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2017

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2017

Meinem himmlischen Vater gewidmet

*Setzt euch zuerst für Gottes Reich ein
und dafür, dass sein Wille geschieht.
Dann wird euch alles andere dazugegeben.*
Matthäus 6,33

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Die Untersuchungen waren Teil eines Forschungsvorhabens der AiF, das vom Forschungskuratorium Maschinenbau am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart initiiert wurde.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Haas, Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am Institut für Maschinenelemente, für das mir und meinen wissenschaftlichen Fähigkeiten entgegengebrachte Vertrauen, sowie für seine persönliche und menschliche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger, Leiter des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim, danke ich für sein großes Interesse an meiner Arbeit, die Durchsicht sowie für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des IMA, danke ich für das positive und offene Klima am Institut.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut danke ich für die schöne gemeinsame Zeit und dass sie mich mit Rat und Tat unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich bei allen wissenschaftlichen Hilfskräften und Studenten, die mit ihrem Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sowie in besonderem Maße den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Werkstatt und des Sekretariats.

Mein herzlicher Dank gebührt auch meiner Frau Carmen, meiner Familie und meinen Freunden, die mich in der Zeit der Entstehung dieser Arbeit stets unterstützt haben.

Naters, im Mai 2017

Johannes Kümmel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	2
3	Ziel der Arbeit.....	13
4	Untersuchungseinrichtungen.....	14
4.1	Prüfstände	14
4.1.1	Prüfstand BFWD I.....	14
4.1.2	Prüfstand BFWD III	15
4.2	Hilfseinrichtungen	16
4.2.1	Staubbeaufschlagungseinheit und Staubkammer für Prüfstand BFWD III.....	16
4.2.2	Druckkammer für Prüfstand BFWD III	17
4.2.3	Flüssigkeitsbeaufschlagungseinheit für Prüfstand BFWD III	18
4.2.4	Pneumatische Kleinmengen-Fettfördereinheit.....	19
4.2.5	Fettpresse.....	19
4.2.6	Kleinmengen-Fettspritze	19
4.2.7	Luft Druckregel- und Volumenstrommesseinheit.....	20
4.2.8	Stereomikroskop.....	20
4.2.9	Rheometer Viscolab LC 10 mit IMA Kegel-Platte Prüfeinrichtung.....	20
5	Untersuchungsmaterialien.....	21
5.1	Dichtsysteme.....	21
5.1.1	Radialspalt-Dichtsysteme	21
5.1.2	Axialspalt-Dichtsysteme.....	23
5.1.3	Kombinierte Dichtsysteme.....	26
5.1.4	Dichtsysteme mit Fettabfluss.....	27
5.2	Schmierfette	28
5.2.1	Definition, Aufbau, Einteilung und Rheologie von Fetten	29
5.2.2	Versuchsfette	34
5.3	Weitere eingesetzte Untersuchungsmaterialien.....	37
5.3.1	Prüfstaub	37
5.3.2	Prüfsand.....	38
5.3.3	Bespritzungsfluid	39
5.3.4	Versuchsschlamm	39
5.3.5	Farbe zur Fetteinfärbung.....	39
6	Untersuchungsmethodik.....	40
6.1	Untersuchungen an Standard-Dichtspaltgeometrien	40
6.1.1	Versuchsaufbau Standard-Dichtspaltversuche.....	40
6.1.2	Versuchsablauf Standard-Dichtspaltversuche.....	40

6.1.3	Eingesetzte Untersuchungsmaterialien	41
6.2	Untersuchung des Strömungsverhaltens von Fetten in Dichtspalten	42
6.2.1	Versuchsaufbau Strömungsversuche	42
6.2.2	Versuchsablauf Strömungsversuche	43
6.2.3	Eingesetzte Untersuchungsmaterialien Strömungsversuche beider Zyklen	44
6.3	Druckhalte- und Luftdurchsatzversuche	44
6.3.1	Versuchsaufbau Druckhalteversuche und Luftdurchsatzmessungen	45
6.3.2	Versuchsablauf Druckhalteversuche	45
6.3.3	Versuchsablauf Luftdurchsatzmessungen	45
6.3.4	Eingesetzte Untersuchungsmaterialien	46
6.4	Untersuchung der FBFWD bei Schmutzbeaufschlagung.....	46
6.4.1	Untersuchung FBFWD bei Staubbeaufschlagung.....	46
6.4.2	Untersuchung FBFWD bei Sandbeaufschlagung.....	49
6.4.3	Untersuchung FBFWD bei Flüssigkeitsbeaufschlagung	49
6.4.4	Untersuchung FBFWD bei Schlammbeaufschlagung.....	50
6.5	Untersuchung kombinierter Dichtsysteme.....	51
6.5.1	Verschmutzungsuntersuchungen	51
6.5.2	Fett-Förderversuche.....	52
6.6	Untersuchung Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtsysteme mit Fettabfluss.....	54
6.6.1	Fettaustrittsuntersuchungen an FBFWDA.....	54
6.6.2	Schmutzbeaufschlagungsversuche an FBFWDA.....	55
7	Untersuchungsergebnisse.....	56
7.1	Untersuchungen an Standard-Dichtspaltgeometrien.....	56
7.1.1	Versuchsergebnisse Radialspalt-Dichtsysteme innenrotierend.....	56
7.1.2	Versuchsergebnisse Radialspalt-Dichtsysteme außenrotierend.....	72
7.1.3	Versuchsergebnisse Axialspalt-Dichtsysteme EIN (einfördernd).....	81
7.1.4	Versuchsergebnisse Axialspalt-Dichtsysteme AUS (ausfördernd)	85
7.2	Versuchsergebnisse der Strömungsversuche von Fett in Dichtspalten und Strömungs- analyse.....	89
7.2.1	Ergebnisse der Strömungsversuche Zyklus 1	89
7.2.2	Ergebnisse der Strömungsversuche Zyklus 2.....	93
7.2.3	Analyse der am Prüfstand festgestellten Strömungsverhältnisse.....	95
7.3	Druckhalte- und Luftdurchsatzversuche	104
7.3.1	Versuchsergebnisse Druckhalteversuche	104
7.3.2	Luftdurchsatzmessungen	105
7.4	Untersuchung FBFWD bei Schmutzbeaufschlagung.....	112
7.4.1	Versuchsergebnisse bei Staubbeaufschlagung.....	112
7.4.2	Sandbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen.....	127
7.4.3	Flüssigkeitsbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen.....	138

7.4.4	Schlammbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen.....	139
7.4.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse bei Schmutzbeaufschlagung.....	142
7.5	Untersuchung kombinierter Dichtsysteme	143
7.5.1	Fett-Förderversuche.....	143
7.5.2	Verschmutzungsversuche bei Kombinierten Dichtsystemen.....	145
7.6	Versuchsergebnisse der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen mit Fett- abfluss (FBFWDA).....	147
7.6.1	Fettaustrittsuntersuchung FBFWDA.....	147
7.6.2	Schmutzbeaufschlagung an FBFWDA.....	149
7.6.3	Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse an Fettgefüllten Berührungs- freien Wellendichtsystemen mit Fettabfluss.....	156
8	Konstruktion, Betrieb und Wartung von FBFWD(A)	157
8.1	Grundlagen zur Funktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen	157
8.2	Konstruktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen.....	159
8.2.1	Standardbauformen	159
8.2.2	Dichtelemente für erschwerten Einsatz	167
8.2.3	Dichtkonzepte für die Abdichtung zweier unterschiedlicher Fluide.....	168
8.2.4	Oberflächengüte der Dichtungsbauteile	169
8.3	Der sichere Betrieb von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen	170
8.3.1	Drehzahlspektrum von FBFWD	170
8.3.2	Abdichtbare Medien.....	171
8.3.3	Abdichtbare Druckdifferenz	171
8.3.4	Für die Abdichtung geeignete Fette.....	171
8.4	Wartung von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen.....	171
8.5	Zusammenfassung der Konstruktionshinweise	173
9	Zusammenfassung	174
10	Literaturverzeichnis	177

Formelzeichen und Abkürzungen

A	mm ²	Kontrollfläche an bewegter Platte
BFWD		Berührungsfreie Wellendichtung
d _a	mm	Außendurchmesser Hauptlabyrinth
d _i	mm	Innendurchmesser Hauptlabyrinth
d _m	mm	Mittlerer Durchmesser Hauptlabyrinth
$\dot{\gamma}$	s ⁻¹	Schergeschwindigkeit, Geschwindigkeitsgefälle
FBFWD		Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtung
FBFWDA		Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtung mit Fettabfluss
FKM		Forschungskuratorium Maschinenbau
F _F	N	Fliehkraft
F _t	N	Tangentialkraft an bewegter Platte
m	kg	Masse
NLGI		Konsistenzklasse von Schmierfetten
n	s ⁻¹	Drehzahl
η	Pa s	Viskosität
η_{ef}	Pa s	Scheinbare dynamische Viskosität
p	Pa, mbar	Druck
RWDR		Radialwellendichtring
T	°C	Temperatur
t	s	Zeit
τ_{xy}	N/mm ²	Scherspannung
v	m/s	Gleitgeschwindigkeit

Kurzzusammenfassung

Seit einigen Jahren geht der Trend zu immer mehr fettgeschmierten Wälzlagern. In vielen Anwendungen werden diese an Maschinen eingesetzt, die starker Verschmutzung ausgesetzt sind. Besonders bei starker Schmutzbeaufschlagung können hier aufgrund der abrasiven Wirkung keine berührenden Dichtungen eingesetzt werden. Stattdessen kommen hier bislang Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen zum Einsatz, die mitunter durch fehlende Konstruktionserfahrung später im Betrieb durch das Nachschmieren mit Unmengen an Fett am Leben erhalten werden müssen. Dieser Zustand ist aufgrund wachsender Umweltauflagen und aus wirtschaftlicher Sicht nicht mehr tragbar. Um dieser Entwicklung mit sehr guten konstruktiven Lösungen begegnen zu können, wurden im Rahmen eines zweieinhalbjährigen Forschungsprojektes am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart Erkenntnisse über das Abdichtverhalten von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen unter Einwirkung von starker Schmutzbeaufschlagung gesammelt und diese in praxisgerechte Konstruktionsrichtlinien umgesetzt. Wie Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen funktionieren, konnte durch umfangreiche Versuchsreihen experimentell ermittelt werden. Daraus wurden detaillierte Gestaltungsrichtlinien abgeleitet.

Im Gegensatz zu den Vermutungen über die Funktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen in der Literatur, wo empfohlen wird den Fettspalt durch häufiges Nachschmieren geschlossen zu halten, hat sich im Rahmen der durchgeführten Versuche genau das Gegenteil gezeigt. Voraussetzung für die sichere Funktion ist ein geöffneter Labyrinthspalt bei dem die Wände mit einer klebrigen Fettschicht überzogen sind. Im Betrieb wird eingedrungener Schmutz so vom Fett nahe des Dichtspalteingangs aufgenommen und nicht weiter in das Dichtsystem hineintransportiert. Kommt es hingegen nicht zu einer Trennung von Stator und Rotor durch einen dünnen Luftspalt und der Labyrinthspalt bleibt vollständig mit Fett gefüllt, so wird vom Fett aufgenommener Schmutz durch Strömungsvorgänge im gesamten Dichtsystem verteilt.

Richtig gestaltete und betriebene Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen sind dazu geeignet, Wälzlager zuverlässig, dauerhaft und bei minimalem Fetteintrag in die Umgebung gegen starke Schmutzbeaufschlagung abzudichten.

Abstract

In many applications sealing systems are heavily polluted from the outside, or they have very large diameters. Seals in construction and agricultural machinery, mining, wind turbines as well as in electric machines are polluted by dirt in various forms. Radial lip seals are not applicable due to the destructive dirt with its abrasive particles.

For spindles of machine tools, non-contact shaft seals are widely used. These contactless seals require a high precision of the shaft as well as small gap heights, which are essential for a reliable operation. Non-contact seals are also frequently used for applications other than machine tools, where the shaft bearings are less precise.

In this case, grease filled non-contact shaft seals are typically used. There are several geometries of sealing gaps, which are filled with grease for a use in dirty environments. The grease is supposed to prevent the dirt from penetrating through the sealing system. Until now, there was no scientifically verified and universally accessible knowledge about the operation performance of grease filled sealing gaps.

In this doctoral dissertation was analysed which processes are necessary in the sealing gaps of grease filled non-contact shaft seals to protect bearings against the intrusion of abrasive dirt particles.

According to the state of the art standard geometries for the sealing gaps were chosen and with them were designed construction kits for seals. Thus enabled the examination of the different greases' behaviour in these standard geometries for the sealing gaps. Tested were seals with gaps in radial direction, in which were varied the length of the radial gap, the axial height of the gap, and the number of disks. The rotation speed was measured, yet mainly the variation of the friction torque caused by the grease in the sealing gaps during the testing time was of special interest. Here the friction torque acts as an indicator of the sealing gaps' condition. The question was if the sealing gap rests completely closed or if it opens during the test.

In general could be found out that greases of low viscosity, many disks in-line and a small axial height of the gap will rise the retention time of the grease in the sealing gap. Also tested were seals with gaps in axial direction, in which were varied the height of the sealing gap, the axial length of the gap and the direction of the gap (rising or decreasing diameter from inside to outside). In this case could be found out as well that the gap will be opened earlier with greases of higher viscosity. For the first time, it was possible to regulate the flow direction of the grease through the orientation of the sealing gap. This was another very important result. So it was possible to generate a specific condition of the sealing gap (open or closed). This result determined the further approach of the research studies.

For the observation of the flow of grease in the gap, it was necessary to use transparent seals with gaps in radial direction and to inject various coloured greases. The tests were filmed and the flow was analysed afterwards.

The flow behaviour of grease is affected by the apparent dynamic viscosity which itself is influenced by the shear strain of the grease in the sealing gap. If there are dirt particles or air intruded through the gap, the flow behaviour of the grease will also be affected.

Asserting the fundamental behaviour of grease in standard sealing gaps now the actual part of the work began, which was the search for the sealing mechanism during dirt admission. For this selected radial gap and axial gap sealing systems filled with different greases were exposed to a one-sided dust admission.

After few tests it showed up that these combinations of grease and sealing systems, whose gap did not open rapidly after beginning of attempt, were unsuitable for the sealing against fine dust. The grease had taken up dust and had distributed dirty grease in the entire sealing system. With sealing systems whose gap opened, a narrow air gap with sticky surfaces was formed in the sealing system. Through this gap particles could not penetrate the sealing system.

With axial gap sealing systems it is possible in contrary to radial gap sealing systems to add fresh grease after a saturation of the grease surface with particles without a mixture with dirty grease

takes place. For this reason axial gap sealing systems, which promote the grease to the dirt side, are clearly superior to radial gap sealing systems. With the discovery of this principle sealing mechanism the research work was not terminated, rather the borders of the sealing effect had to be examined.

Further kinds of contamination, which could impair the sealing effect, were selected and the necessary equipment to the application developed. Tests were carried out on the sealing system with various greases and operating parameters. As further critical contamination sand, water and mud were selected. Sand is particularly critical for the function, since the particle size of the sealing gap height approximates here and can wedge the particles in the gap with the result that the opened grease gap gets closed.

Generally it can be said for all kinds of contamination that the sealing function remains, as long as the sealing gap is completely opened and the grease surface is not completely saturated with dirt. During the operation the grease of the sealing system has to be exposed to a minimum centrifugal force and a minimum shearing. It must be prevented by a so-called covered gap entrance that dirt did not penetrate the sealing system. The grease must in each operating condition keep its yield point and further may not be diluted by liquids from outside or inside.

For heavy duty operations e.g. with one-sided (gas) positive pressure were made additional tests. For this purpose various sealing systems consisting of a contacting sealing element and a grease-filled non-contact shaft seal were examined.

During re-lubrication of grease-filled non-contact sealing system develops at the outside gap entrance a thick grease dirt collar, which either has to be removed by hand or stays as grease leakage in the environment or can get dangerous for other machine parts in the closer environment, such as belt drives. Finally a grease support range could be realised by a stage gap.

Thus it got possible to reduce the grease withdrawal and to catch dirty grease in a collector.

In the last part of the work as quintessence of the accomplished research work practical guidelines were prepared for the construction, operation and maintenance of grease-filled non-contact shaft seals in an additional chapter. Thus the constructing engineer gets a tool to design new sealing systems in a simple manner, to evaluate existing sealing systems and to measure the borders of the system.

The accomplished investigations are limited to sealing systems with horizontal shaft situation in single arrangement without other machine parts e.g. bearing. Further open questions are:

How do sealing systems have to be arranged with vertical shaft?

Which further demands are made on the sealing system, if the system consists of more components such as two sealing systems and a bearing?

1 Einleitung

Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen (FBFWD) werden häufig bei Wellendurchtrittsstellen mit starker Schmutzbeaufschlagung eingesetzt. Hierbei handelt es sich um Spaltdichtungen aller möglicher Geometrien, deren Spalte mit Fett gefüllt sind. Übliche Bezeichnungen in der Literatur oder bei Dichtungsherstellern für diesen Dichtungstyp sind auch fettgefüllte Schutz- oder Labyrinthdichtungen. Das Fett soll den Schmutz am Durchdringen der Dichtspalte hindern. Diese Dichtungsbauform ist zunächst nichts grundlegend Neues, doch die Anforderungen haben sich radikal verändert. Während es in früheren Zeiten als Qualitätsmerkmal galt, wenn sich an Wälzlagern und Dichtstellen ein dicker Fettkragen bildete, der auf eine gut gemeinte Fettfüllung vom Hersteller oder Anlagenbetreiber hindeutete, so wird diese „Entsorgung“ von Schmierstoffen in die Umwelt heute zu Recht nicht mehr akzeptiert. Schmierstoffe waren wenig additiviert und damit viel günstiger als heutige Hochleistungsfette und standen so in großen Mengen für die reichliche Nachschmierung von Wälzlagern und Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen zur Verhinderung von Schmutzeintritt zur Verfügung.

Darüber hinaus ist diese Bauform für viele Jahre scheinbar in Vergessenheit geraten. Erst im Zuge des verstärkten Einsatzes fettgeschmierter Lager, der allgemeinen Rohstoffverknappung und der damit angefachten Suche nach reibungsarmen bzw. reibungsfreien Abdichtlösungen für Dichtstellen mit teilweise sehr großen Durchmessern und Dichtspalthöhen, wurden Berührungsfreie Wellendichtungen wiederentdeckt.

Gefragt sind jetzt also Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen mit bester Wirksamkeit bei Schmutzbeaufschlagung, minimalem Verlustmoment und geringstem Fettverbrauch.

Allerdings stellte sich sehr schnell heraus, dass eine Konstruktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen mit den Anforderungen von „heute“ auf Basis der verfügbaren Konstruktionsvorschläge von „gestern“ nicht erfolgreich ist. Es gibt zwar vielerlei Geometrien - auch mit Anwendungsvorschlägen, jedoch ist in keiner Quelle beschrieben, wie der Fettspalt beschaffen sein muss, damit dieser vor Schmutzdurchtritt zum Lager schützen kann. Doch ohne diese Information ist die Bewertung der Bauform einer Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtung schlichtweg unmöglich. Hier bestand eine erhebliche Wissenslücke über die eigentliche Abdichtfunktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen (FBFWD).

Die Untersuchung der Funktionsweise solcher Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen in Einzelanordnung und bei horizontaler Wellenlage ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

So entstand unter anderem das AiF Forschungsvorhaben Nr. AiF 15591N/1 mit dem Titel „Berührungsfreie Wellendichtungen (BFW) mit Fettfüllung zur Schmutzabdichtung“, das das Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) zur Beantwortung der offenen Fragestellungen am Institut für Maschinenelemente initiiert hatte (1).

2 Stand der Technik

Bei vielen Anwendungen sind Wellendurchtrittsstellen abzudichten, die von außen stark verschmutzt werden oder sehr große Durchmesser haben. Bei Dichtungen in Bau- und Landmaschinen, im Bergbau, aber auch in Windenergieanlagen und bei Elektromotoren treten Verschmutzungen in unterschiedlichster Form auf. Eindringender Schmutz, Staub und Wasser führen durch Verschleiß und Korrosion zu schweren Schäden an Maschinenteilen wie Zahnrädern, Kupplungen und Lagern.

Lebensdauer und Zuverlässigkeit verringern sich dadurch teilweise drastisch. Berührende Dichtungen sind für diesen Einsatzzweck aufgrund des zerstörerisch wirkenden Schmutzes (abrasive Partikel) nicht geeignet. Bei Großlagern können häufig wegen des Durchmessers und der damit verbundenen hohen Umfangsgeschwindigkeiten ebenfalls keine berührenden Dichtungen eingesetzt werden. Infolge der Reibung im Kontaktbereich berührender Dichtungen entsteht schädliche Wärme, die bei fettgeschmierten Anwendungen nur schwer abgeführt werden kann. Die thermische Schädigung und damit der Ausfall solcher Dichtsysteme droht. Abhilfe schaffen Berührungsfreie Wellendichtungen (BFWD) in Form von engen Drossel- oder Labyrinthspalten.

Bei der Spindelabdichtung von Werkzeugmaschinen haben sich Berührungsfreie Wellendichtungen als Standard durchgesetzt. Durch die besondere Gestaltung des Dichtspaltes wird hier der aus dem Bearbeitungsraum in das Dichtsystem eingedrungene und oft mit Spänen durchsetzte Kühlschmierstoff zurückgefördert oder durch Abführkanäle aus dem Dichtsystem abgeleitet.

Solche berührungsfreien Wellendichtsysteme wurden maßgeblich am Institut für Maschinenelemente entwickelt und dort seit über 20 Jahren erforscht (2), (3), (4), (5), (6).

Bei Werkzeugmaschinen werden in der Trockenbearbeitung Berührungsfreie Wellendichtungen mit Sperrluft eingesetzt. In den Dichtspalt eingedrungene Partikel werden hier durch Sperrluft in den Arbeitsraum zurückgefördert (7).

Bei beiden Varianten sind eine hohe Laufpräzision der Welle und kleine Spalthöhen Voraussetzung für die sichere Funktion. Dazu wird ein Schmutz transportierendes Medium benötigt, der Kühlschmierstoff, Öl oder die Prozessluft. Berührungslose Wellendichtungen werden auch häufig an Dichtstellen außerhalb von Werkzeugmaschinen, bei Anwendungsfällen mit unpräziser Wellenlagerung eingesetzt. Oft können oder sollen aus diesen Gründen die Dichtspalte nicht so eng ausgeführt werden ($\leq 0,2$ mm), dass man Sperrluft als Hilfsfluid einsetzen könnte.

In der Praxis kommen hier Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um Spaltdichtungen aller möglicher Geometrien, die für den Einsatz in verschmutzter Umgebung mit Fett gefüllt sind. Übliche Bezeichnungen in der Literatur oder bei Dichtungsherstellern für diesen Dichtungstyp sind auch fettgefüllte Schutz- oder Labyrinthdichtungen. Das Fett soll den Schmutz am Durchdringen der Dichtspalte hindern.

In der Literatur gibt es zahlreiche Konstruktionsbeispiele wie fettgeschmierte Lagerstellen mit Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen abgedichtet werden können. Es sind dort viele oft widersprüchliche Geometrien zu finden. Angaben zu Einsatzgrenzen sind meist nicht vorhanden. Auch Konstruktionshinweise oder Maße sind selten zu finden. Die Funktionsweise von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen ist in der Literatur nirgendwo beschrieben.

Nachfolgend werden einige bedeutende Konstruktionsvorschläge aus der Literatur näher vorgestellt.

Schutzdichtungen - Karl Trutnovsky (8)

In seinem Buch „Schutzdichtungen“ in der Ausgabe von 1977 führt Karl Trutnovsky zunächst allgemein in das Thema der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen (Labyrinthdichtungen) ein. Dort heißt es:

„Labyrinthdichtungen werden zur Dichtung fettgeschmierter Lager als Einstufen-, Zweistufen- und (selten) als Mehrstufenlabyrinth gebaut. Einstufige Labyrinth werden vielfach als Ersatz für Filzdichtungen verwendet und zwar dort, wo keine allzu großen Ansprüche an die schützende Eigenschaft der Dichtung gestellt werden. Zweistufige Labyrinth gelangen zur Anwendung, wenn z. B. Wasserspritzer das Lagergehäuse treffen können oder die umgebende Luft feinverteilte Unreinigkeiten enthält. Gegen Öl sind Schutzlabyrinth nur bei sehr engen Spalten wirksam. Wie bei allen

Spaltdichtungen wird auch beim Labyrinth die Wirksamkeit meist durch Fettfüllung erhöht“ ... „für deren Erhaltung Sorge zu tragen ist (Nachfülleinrichtungen).“

Schon bei der Montage sollten daher die Labyrinthgänge mit einem geeigneten Fett (meist ein wasserabstoßendes Kalkseifenfett) gefüllt werden. Für wichtige Dichtungen sei eine Nachschmiermöglichkeit vorzusehen, die so anzuordnen sei, dass durch das Nachpressen von frischem Fett das verschmutzte Fett herausgedrückt oder ein evtl. ausgewaschenes Fett wieder ersetzt werde. Ob ein axiales oder radiales Labyrinth geeigneter sei, ergebe sich aus der Bauart der betreffenden Maschine. Die Spaltweite betrage etwa 0,5 bis 0,75 mm. Im Speziellen schreibt er zu Schutzlabyrinthfolgendes:

„Die Bezeichnung als Labyrinth, Bild 1 und Bild 2, sei insofern irreführend, als es sich hier um keine Dichtungen im Sinne von Strömungsdichtungen handle, sondern um verlängerte Kriechwege, bei denen die Fliehkräfte von Einfluss seien.“ In Abhängigkeit der Anordnung unterscheidet Karl Trutnovsky die nachfolgend abgebildeten Grundtypen (Bild 1 und Bild 2).

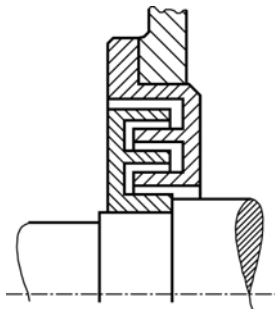


Bild 1: Axialspalt-Dichtsystem (8)

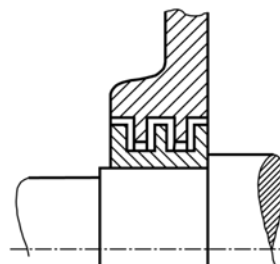


Bild 2: Radialspalt-Dichtsystem (8)

In der vorliegenden Arbeit werden die Labyrinthformen nach der Vorzugsrichtung der Einzelspalte mit der größten Spaltlänge benannt. Folglich stellt Bild 1 ein Axialspalt-Dichtsystem dar. In Bild 2 ist ein Radialspalt-Dichtsystem zu sehen. In der Literatur wird häufig nicht die vorherrschende Spaltform sondern die Richtung der gesamten räumlichen Ausdehnung der Dichtung für die Unterscheidung in Radial- oder Axiallabyrinth herangezogen. Dies ist aber eher ungünstig, da, wie im Verlauf der vorliegenden Arbeit gezeigt wird, sich radiale und axiale Spalte ganz unterschiedlich verhalten. Mit der in dieser Arbeit verwendeten Einteilung nach der vorherrschenden Spaltform, stimmen grundlegende Dichtsystemeigenschaften und die Namensgebung überein.

Wälzlagerpraxis Paul Eschmann, Ludwig Hasbargen, Karl Weigand (9)

Im Buch „Die Wälzlagerpraxis“ in der Ausgabe von 1953 der Autoren Eschmann, Hasbargen und Weigand werden im Kapitel Dichtungen zunächst einige Grundgeometrien Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen vorgestellt und beschrieben. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die beschriebenen Geometrien und weitere Dichtungsvarianten Einsatzbeispielen zugeordnet. Ein Auszug dieser Zusammenstellung mit den für die Fettfüllung geeigneten Geometrien ist nachfolgend abgebildet (Bild 3).

Im Buch wird die „Einfache Spaltdichtung“ Bild 3a als eine für viele Fälle ausreichende Abdichtung aufgeführt, für deren Spalthöhe allein der Schlag der Welle und die Exzentrizität der Durchgangsbohrung ausschlaggebend sei. Konzentrische Rillen in der Durchgangsbohrung Bild 3b würden die Dichtwirkung weiter erhöhen. Bei Fettschmierung fände der Fettkragen, der die von außen kommenden Verunreinigungen festhalte, in diesen Rillen einen Halt.

Ein mehrstufiges Labyrinth der Bauform von Bild 3c habe eine sehr gute Dichtwirkung, wenn die Gänge mit steifem Fett gefüllt würden. Bei schmutzigem Betrieb wird Fett nachpressen von Zeit zu Zeit empfohlen. Labyrinth mit mehreren radial angeordneten Stegen Bild 3j hätten den Vorteil, dass nach außen geschleudertes Fett von den U-förmigen Nuten im Gehäuse gehalten würde.

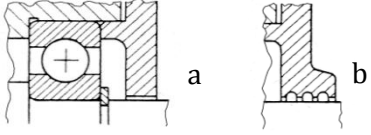
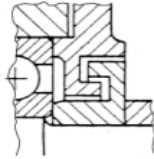
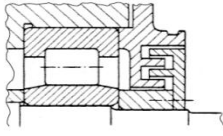
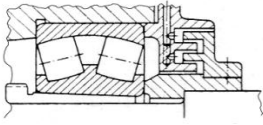
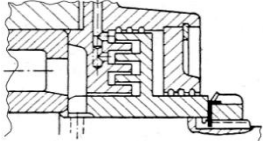
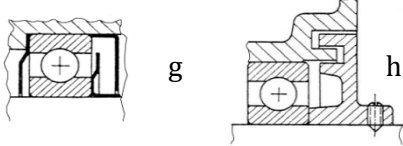
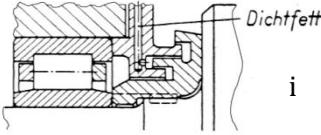
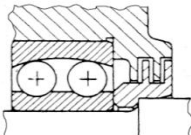
Dichtungsaufgabe					hohe Temperatur	Kennzeichnender Betriebsfall	Konstruktionsbeispiel		
von außen				von innen					
Feste Verunreinigungen				Wasser				Schmiermittel	
gering	mäßig	stark	sehr stark	Tropf-				Spritz-	Fett
•						•	<p>Kleine Elektromotoren Transmissionen Ventilatoren Kleine Getriebe</p> 		
	•					•	<p>Kreissäge einfacher Schleifbock</p> 		
	•					•	<p>elektrischer Fahrmotor</p> 		
			•			•	<p>Schlägermühle</p> 		
			•			•	<p>Kollergangläufer</p> 		
			•	•		•	<p>Förderbandrolle</p> 		
		•			•	•	<p>Warmwalzen</p> 		
	•					-	<p>Trockenöfen</p> 		

Bild 3: „Typische Beispiele für die Lösung von Dichtungsaufgaben“ (Auszug) (9)

Handbuch der Wälzlagertechnik - Deutsche Koyo Wälzlager Verkaufsgesellschaft mbH (10)

Die Dichtwirkung der Berührungsfreien Dichtungen basiert gemäß der Deutschen Koyo Wälzlager Verkaufsgesellschaft mbH auf der Dichtwirkung eines begrenzten Spaltes, welcher axial, radial oder in beiden Richtungen angeordnet ist. Zu dieser Gruppe gehörten auch die auf der Fliehkraftwirkung beruhenden Schleuderdichtungen, wie Spritzkanten, Spritzringe oder Schleuderscheiben, die oft zur Erhöhung der Dichtwirkung beider Gruppen zusätzlich eingesetzt würden. Der enge Spalt am Durchtritt der Welle (Bild 4a) durch das Gehäuse sei eine sehr einfache und in vielen Fällen ausreichende Dichtung. Der Spalt könne je nach Lagerung sehr eng (0,05 ... 0,3 mm) ausgeführt werden. Je enger und länger die Spalte ausgeführt würden, desto besser sei die Dichtwirkung. Konzentrische Rillen in der Durchgangsbohrung (Bild 4b) erhöhten die Dichtwirkung des Spaltes. In Bild 4c sind die Maße für die Gestaltung der Rillen angegeben.

Die Wirksamkeit der Dichtung lasse sich durch Labyrinth (Bild 4d-f) beträchtlich steigern. Die Labyrinth seien vorteilhaft mit steifem, wasserabweisendem Fett (Sperrmedium) zu füllen und bei großem Schmutzanfall über Schmierkanäle in bestimmten Zeitabständen nachzuschmieren. Bild 4d und Bild 4e zeigen Labyrinth für starken Schmutzanfall. In Bild 4f bis Bild 4l sind weitere Bauformen zu sehen: Bild 4f bei geteiltem Gehäuse, Bild 4g schräg für Pendellager, Bild 4h mit Schleuderring und Stauscheibe, Bild 4i aus Pressteilen. In Bild 4j sei zur Steigerung der Dichtwirkung der Labyrinthdichtung ein Kolbenring nachgeschaltet. Auch die Kombination aus V-Ring und Labyrinth wird genannt (Bild 4k). In Bild 4l kommt eine Lamellen-Scheibendichtung zum Einsatz.

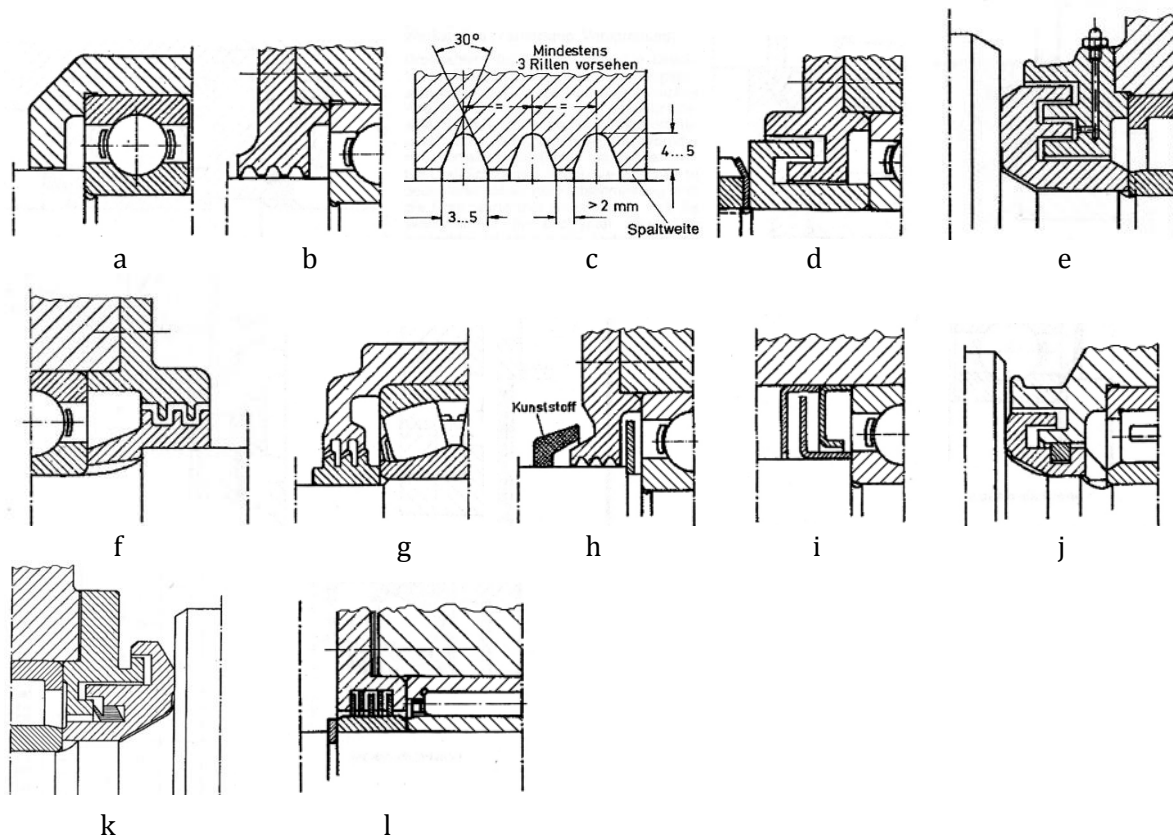
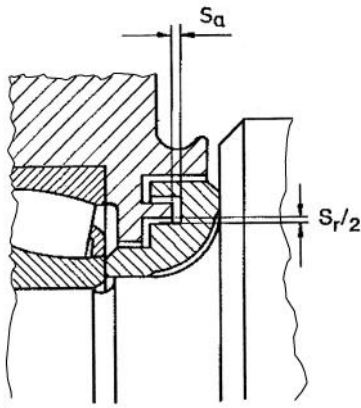


Bild 4: Dichtspaltgeometrien nach der Deutschen Koyo Wälzlager Verkaufsgesellschaft mbH (10)

Für die Gestaltung der Radial- (S_r) und Axialspalte (S_a) eines Labyrinths werden von der Deutschen Koyo Wälzlager Verkaufsgesellschaft mbH die in nachfolgender Abbildung (Bild 5) von der Labyrinthbohrung abhängigen Spalthöhen empfohlen.



Labyrinthbohrung		Breite des Labyrinthspaltes	
über	bis	S_r	S_a
		Maße in mm	
	40	<0,3	2
40	80	0,4	2,5
80	120	0,5	3
120	180	0,6	3,5
180	250	0,7	4
250	315	0,8	5
315	400	0,9	5
400	500	1,0	5
500	630	1,1	5
630	800	1,2	5
800	1000	1,3	5
1000	1250	1,4	5

Bild 5 Dichtspalthöhen (10)

Die Wälzlager - Dr.-Ing. Giovanni Conti (11)

Dr.-Ing. Giovanni Conti vermittelt in seinem 1963 erschienenen Buch „die Wälzlager“ umfangreiches Grundlagenwissen zur Auslegung und Gestaltung von Lagerstellen. In Bild 6a-g und Bild 7 sind die wichtigsten Dichtungsvarianten zur Abdichtung von Fetten nach Dr.-Ing. Giovanni Conti abgebildet.

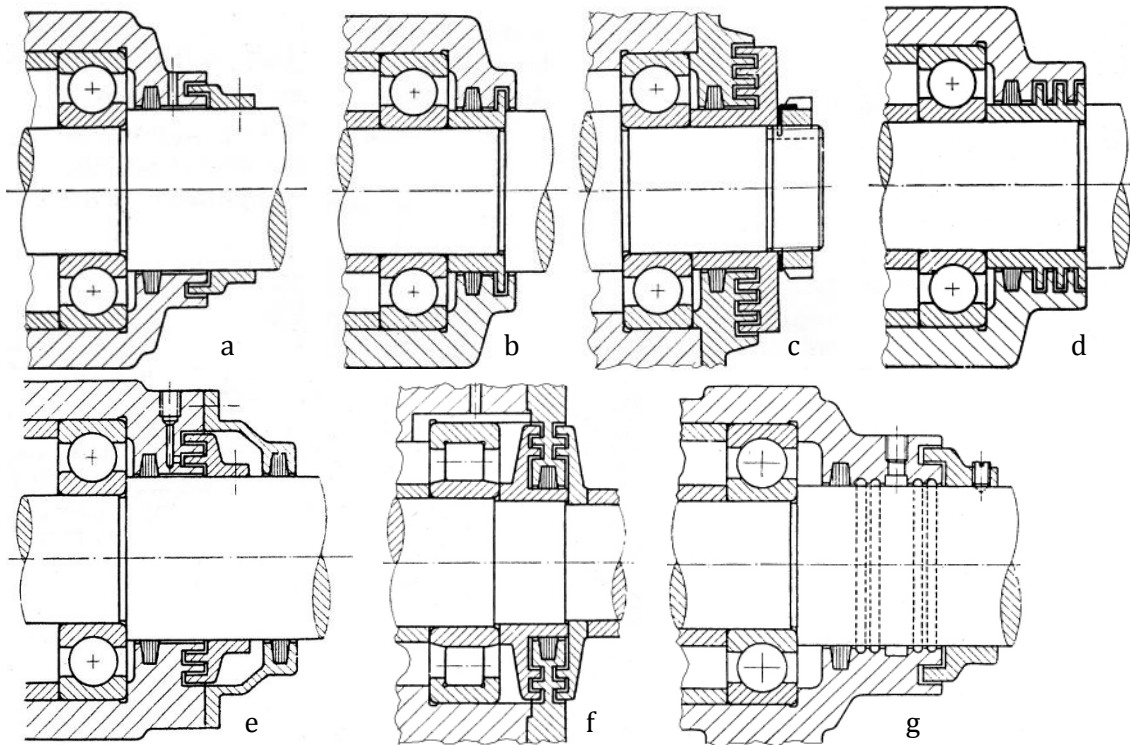
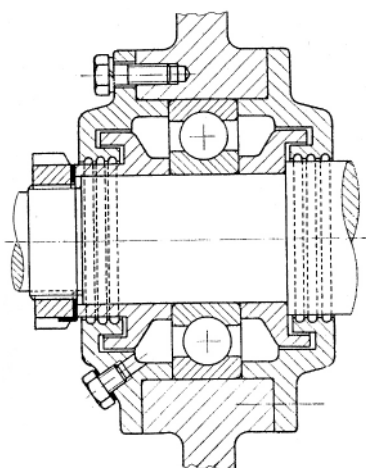


Bild 6: Dichtungsgeometrien nach Giovanni (11)

Neben der mit anderen Literaturstellen übereinstimmenden Meinung, dass durch einen fettgefüllten Dichtspalt das Eindringen von Staub oder Feuchtigkeit ins Lagerinnere verhindert werden könne, legt Conti großen Wert auf die Dichtspaltgestaltung. Hier sei bei der Konstruktion besonders darauf zu achten, dass eine Druck- bzw. Saugwirkung im Lagerinnern entstände, je nachdem ob das Eindringen von Fremdstoffen oder der Schmiermittelaustritt besonders verhindert werden solle. In manchen Fällen bei doppelten Labyrinthdichtungen (Bild 6f und Bild 7) sei ein Gleichgewichtszustand anzustreben, damit die Schleudervirkung auf der einen Seite nicht zu unerwünschten Fördervorgängen führen könne.

Für Lager, die einer besonders guten Abdichtung bedürfen, werden von Conti doppelte Labyrinthdichtungen oder kombinierte Dichtungsanordnungen (Filzring und Labyrinth, Bild 6a-f) empfohlen.



Zu den Labyrinthdichtungen würden auch zusätzlich mit Fett gefüllte Ringnuten verwendet, die nach Conti, zu einer wirksamen Abdichtung beitragen könnten (Bild 7).

Bild 7: Gesamtsystem (Lager + beidseitiges Labyrinth) (11)

Patent DE 1525805 vom 24. Juli 1969 (12)

Mit dem Patent DE 1525805 aus dem Jahre 1969 der Rheinischen Braunkohlewerke AG sollte die damals schon bekannte (Grund) -spaltform eines fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtsystems mit mehreren Axialspalten (Bild 8) weiter verbessert werden. Die Spaltoptimierung beinhaltet die Anbringung von zwei radialen spitz ausgeführten „Dichtlippen“ und einer axialen „Dichtlippe“ im Dichtspalt. Durch die Spaltoptimierung solle eine Verdrängung des in den Gängen der Dichtung befindlichen Fettes beim Zusammenbau vermieden werden. Die axiale „Dichtlippe“ soll als axiale Montagebegrenzung dienen. Über verbleibende Dichtspalthöhen oder Materialkombinationen ist im Patent nichts zu lesen.

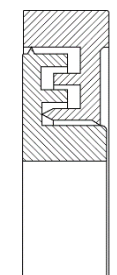


Bild 8: Patent DE 1525805 (12)

Die Gestaltung von Wälzlagerungen - Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG (13)

Mit der Broschüre „Die Gestaltung von Wälzlagerungen“ stellt die Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG dem Konstrukteur Konstruktionsbeispiele aus dem Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau zur Verfügung. Neben der Schnittzeichnung und der Lagergröße werden auch entsprechende Maschinenkenngrößen wie Drehzahl und Leistung und entscheidende Hinweise zur Lagerdimensionierung, Abdichtung und Schmierung (auch während der Betriebsphase des Produkts) vermittelt. Damit wird einzig durch diese Literaturstelle dem Konstrukteur ein grober Einblick über das Betriebsverhalten und die Einsatzbedingungen von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen an konkreten Beispielen gegeben..

Daher werden nachfolgend fünf Lagerungen mit den für die ausgeführten Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen relevanten Parametern vorgestellt:

Lagerung eines Antriebmotors für Bahn Nahverkehrstriebwagen

Die folgende Abbildung (Bild 9) zeigt einen eigenbelüfteten Mischmotor, der bei einer Drehzahl von 1820 min^{-1} eine Dauerleistung von 200 kW aufbringt. Die maximale Drehzahl wird mit 3030 min^{-1} angegeben. Die Motorwelle hat am Lagersitz des Zylinderrollenlagers (FAG NU320E.M1.P64.F1) einen Durchmesser von 100 mm. Laut Schaeffler werden die Lager, wie bei Fahrmotoren üblich, mit FAG Wälzlagerfett Arcanol L71V geschmiert. Die Möglichkeit zur Nachschmierung und ein Fettregler zum Schutz vor Überschmierung seien vorgesehen. Betriebserfahrungen zeigten, dass Nachschmierintervalle von 250000 Fahrkilometern oder längstens 5 Jahre zugelassen werden könnten. Die Lager sind auf beiden Seiten mit mehrgängigen Labyrinth (axial gerichtete Stege) abgedichtet.

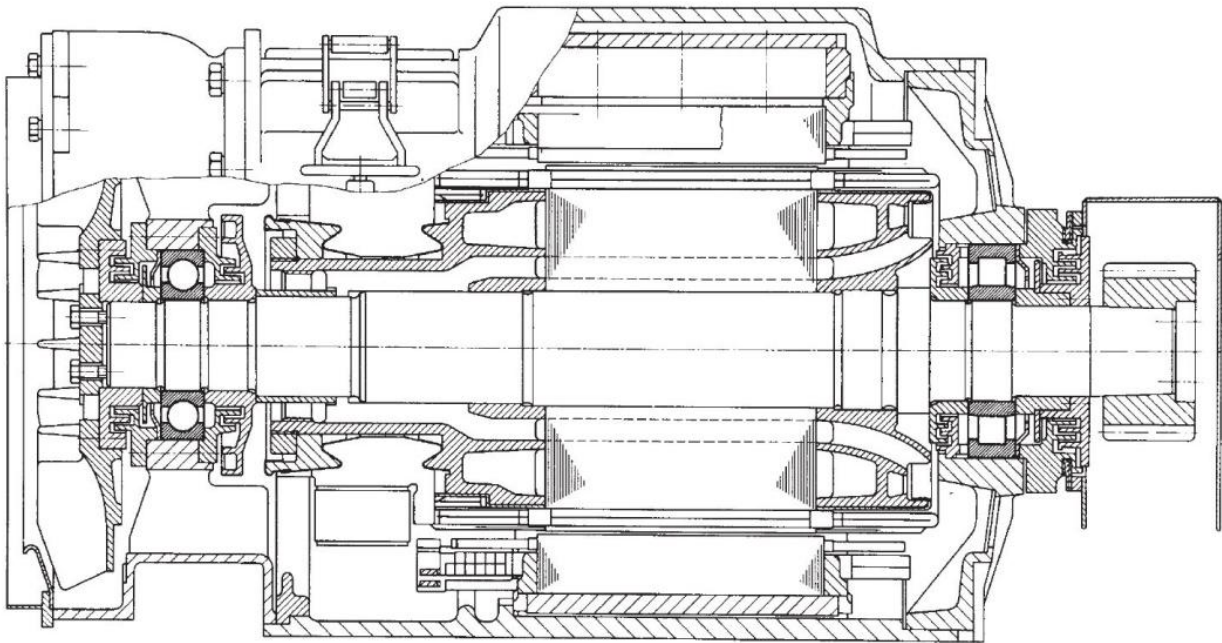


Bild 9: Lagerung eines Antriebmotors für Bahn Nahverkehrstriebwagen (13)

Lagerung einer Förderseilscheibe für einen Förderturm im Bergbau

Nachfolgend abgebildet (Bild 10) ist die Lagerung einer Förderseilscheibe im Bergbau. Die Scheibe hat einen Durchmesser von 6,3 m und dreht sich mit 60 min^{-1} . Der Lagerinnendurchmesser beträgt 260 mm. Die nominelle Lebensdauer betrage ca. 75000 Stunden, jedoch sei hier zu berücksichtigen, dass nur in seltenen Fällen die Lager der Förderseilscheiben durch Werkstoffermüdung unbrauchbar würden. Meist würde ihre Gebrauchsdauer durch Verschleiß beendet. Geschmiert würden die Lager mit FAG Wälzlagerfett Arcanol L186V. Zum Schutz der Lager vor Verunreinigungen ist ein mehrgängiges Labyrinth vorgesehen in dessen Labyrinthspalte im Abstand von 4 bis 6 Wochen Fett nachgepresst würde.

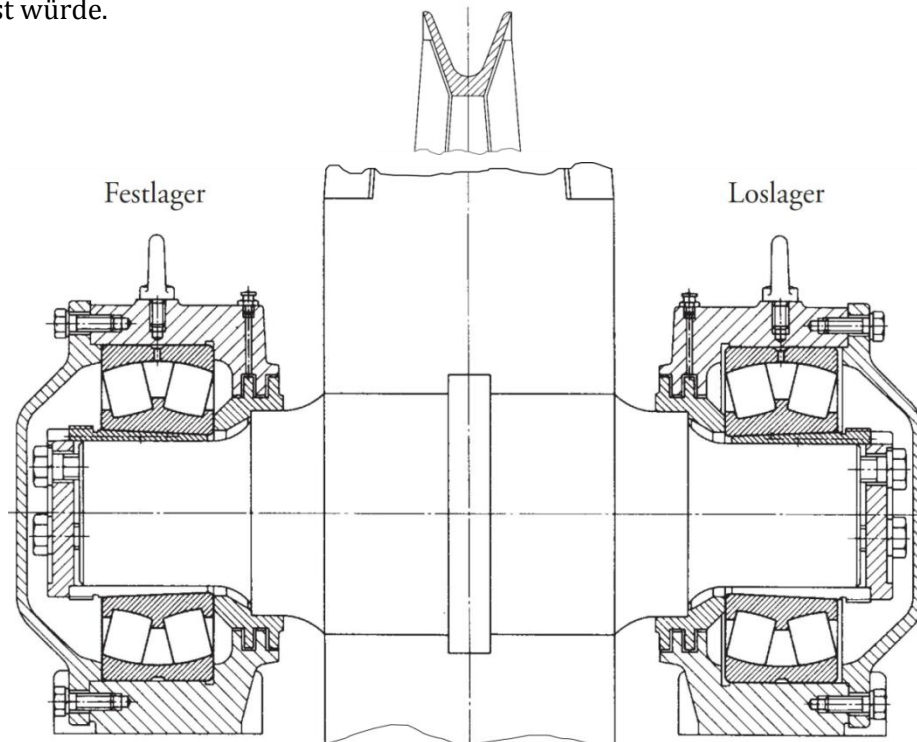


Bild 10: Lagerung einer Förderseilscheibe für einen Förderturm im Bergbau (13)

Lagerung eines Kran Laufrades

Die nebenstehende Abbildung (Bild 11) zeigt die Lagerung eines Kran Laufrades. Beim Verfahren erreiche das Kranrad eine Drehzahl von 50 min^{-1} . Das Lager (FAG 22220E) hat einen Innendurchmesser von 100 mm. Geschmiert würde das Lager mit einem FAG Wälz-lagerfett Arcanol L186V. Das Nachschmierintervall betrage ca. ein Jahr. Zur Abdichtung seien Spaltdichtungen oder einfache berührende Dichtungen fast immer ausreichend.

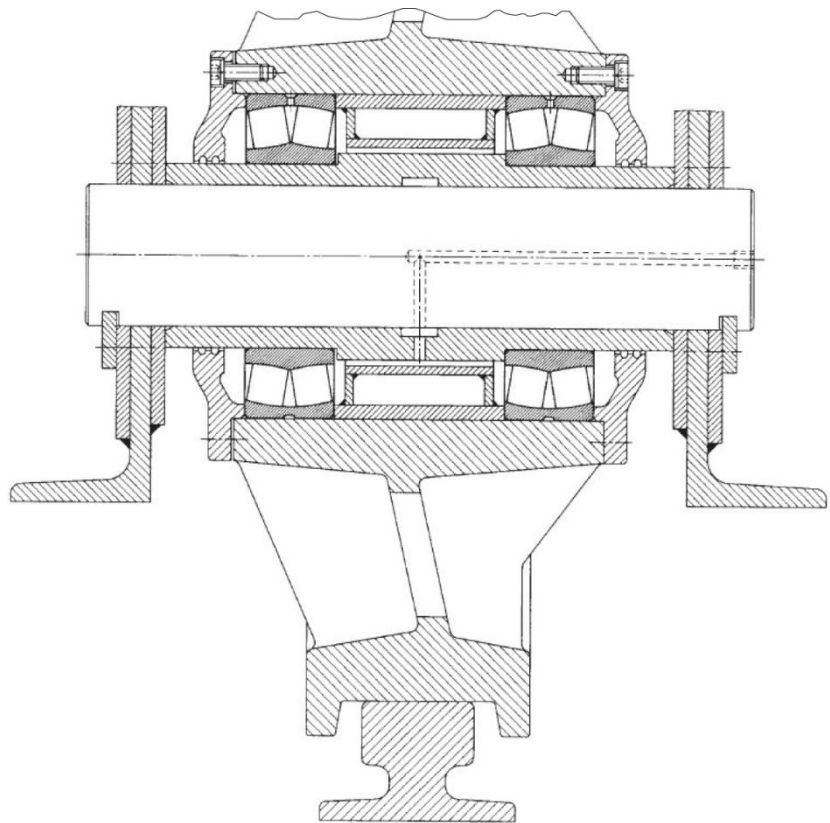


Bild 11: Lagerung eines Kran Laufrades (13)

Förderband Tragrollenlagerung

Nachfolgend abgebildet (Bild 12a-c) sind 3 Varianten von Lagerabdichtungen für die Tragrollenlagerung von Förderbändern in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen der Tragrolle. Einfach abgedichtete Tragrollen (Bild 12a und b) würden in sauberer Umgebung verwendet. Bild 12c zeigt die Abdichtung einer Tragrolle im Braunkohletagebau.

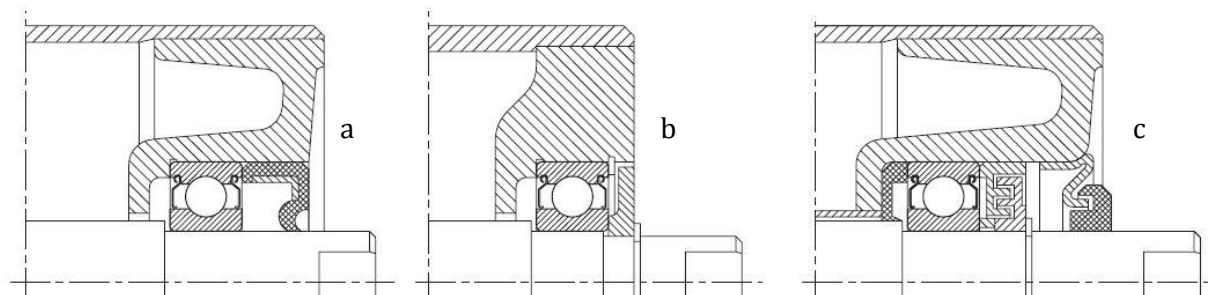


Bild 12: Förderband Tragrollenlagerung (13)

Die Tragrollenlagerung ist meistens als Innenlagerung (Nabenlagerung) ausgeführt, d. h., die Rolle dreht sich um eine feststehende Achse mit ca. 530 min^{-1} . Der Innendurchmesser der verbauten Lager FAG 6209.2ZR.C3 beträgt 45 mm.

Laut Schaeffler endete im Allgemeinen die Gebrauchsdauer der Lager nicht durch Ermüdung, sondern durch Verschleiß an Laufbahnen und Rollkörpern. Werkseitig würden die Lager mit einem Lithiumseifenfett der Konsistenzklasse 2 lebensdauer geschmiert. Für die Reduzierung der erreichbaren Lebensdauer sowie der Schmierstoffgebrauchsdauer sei bei Tragrollen die Verschmutzung des Fetts im Laufe des Betriebs ausschlaggebend, so dass der Abdichtung entscheidende Bedeutung zukomme.

Doppelwellen-Hammerbrecher Lagerung

Ein Doppelwellen-Hammerbrecher wird in Steinbrüchen zur Zerkleinerung der Bruchsteine eingesetzt. Bei der in Bild 13 dargestellten Lagerung kommen Lager vom Typ FAG 23234EASK.M zum Einsatz, deren Bohrungsdurchmesser 170 mm beträgt. Laut Schaeffler betrage die Wellendrehzahl 395 min^{-1} . Bei der vorliegenden Drehzahl genüge Fettschmierung mit FAG Wälzlagerfett Arcanol L71V. In Zeitabständen sei Nachschmierung notwendig. Ein Fettregler schütze das Lager vor Überschmierung. Wegen der ungünstigen Umgebungsbedingungen sei eine zweigängige Labyrinthabdichtung vorgesehen deren Wirksamkeit durch häufiges Nachpressen von Fett in die Labyrinthgänge unterstützt würde.

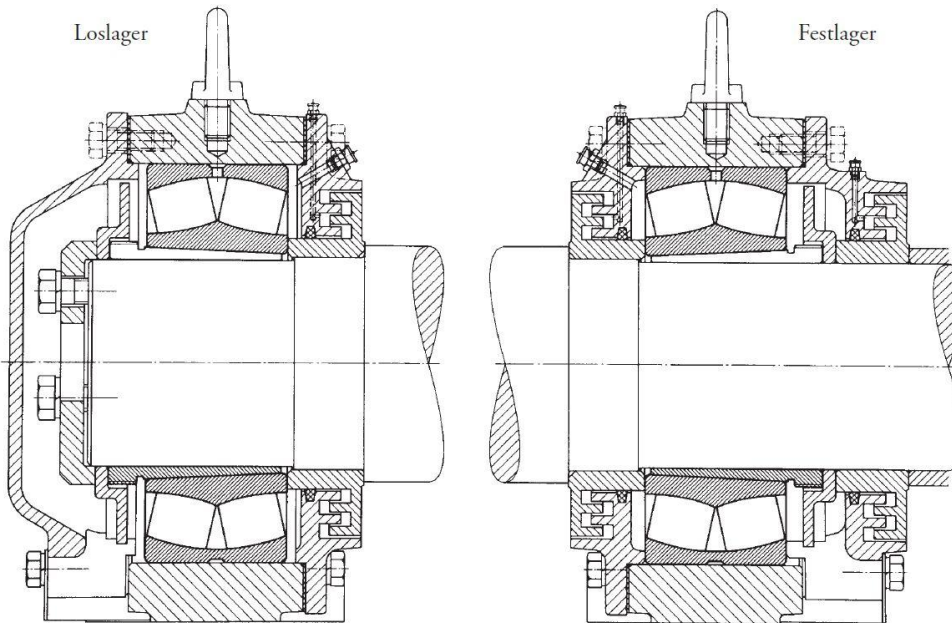


Bild 13: Doppelwellen-Hammerbrecher Lagerung (13)

GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG (14)

Die GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG gehört zu den Herstellern, die einbaufertige berührungslose Dichtungen herstellen. Die Dichtungen werden direkt in Lagergröße angeboten und sollen die Wälzlager von flüssigen und festen Verunreinigungen schützen. Die für die Fettfüllung prinzipiell geeigneten Dichtungstypen (Bauform L und Bauform S) sind auf Bild 14 und Bild 15 dargestellt.

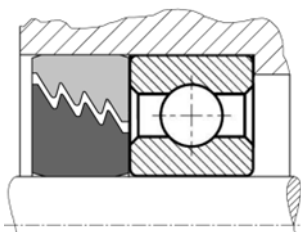


Bild 14: GMN Bauform L (14)

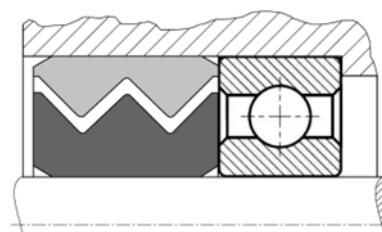


Bild 15: GMN Bauform S (14)

Die von GMN angebotenen Dichtungen sind entweder komplett aus Kunststoff (Bauform L) oder einer Stahl - Aluminium Kombination (Bauform S) hergestellt. Beide Dichtungen können für reine Flüssigkeitsbeaufschlagung auch mit Ablaufnuten bestellt werden. Gegenüber berührenden Dichtungen zeichnen sie sich laut GMN durch sehr hohe Drehzahlfestigkeit und einer prinzipbedingten Reibungsfreiheit aus, was von GMN mit einer unbegrenzten Lebensdauer, Leistungseffizienz, Abriebfreiheit und Erwärmungsfreiheit beworben wird. Beide Dichtungen besitzen einen engen

Dichtspalt mit gezacktem Verlauf, der eine wirkungsvolle Abdichtung gegenüber anspritzenden Flüssigkeiten und guten (Bauform L) bzw. sehr guten Schutz gegen Stäube (Bauform S) bieten soll. Beim Schutz gegen Stäube wird von GMN die Füllung des Dichtspaltes der Bauform S mit Fett empfohlen und dieser auch bereits fettgefüllt angeboten.

Ziller GmbH & Co. KG Wälzlagerabdichtungen (15)

Die Firma Ziller GmbH & Co. KG Wälzlagerabdichtungen fertigt neben einigen Varianten von berührenden NILOS-Ringen auch die Stahlscheibendichtung der Bauform LSTO (Bild 16). „NILOS-Ringe Typ LSTO sind berührungsfreie, fettgefüllte Labyrinthdichtungen, die als einbaufertige Elemente für den jeweiligen Wellen- und Gehäusedurchmesser bestimmt sind“. Nach Ziller sollten sie vor allem angewendet werden, wenn fettgeschmierte Lager ungewöhnlich starken Verschmutzungen ausgesetzt seien, z. B. Baumaschinen, landwirtschaftliche Maschinen, Holzbearbeitungsmaschinen, Förderrollen usw. Diese Abdichtelemente erfüllten annähernd die idealen Bedingungen einer Wälzlagerabdichtung: Reibverluste und Lagererwärmung seien vernachlässigbar gering, das Austreten von Schmiermitteln und das Eindringen von Schmutz würde verhindert.

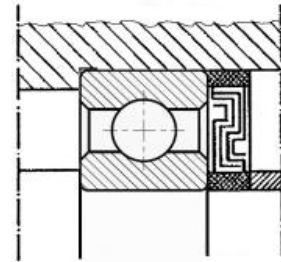


Bild 16: NILOS-Ring LSTO

SKF GmbH (16)

Die SKF GmbH vermittelt in ihrem Hauptkatalog „Wälzlager“ Konstruktionshinweise zur Gestaltung von Lagerstellen. Dort heißt es über ins Gehäuse integrierte berührungsfreie mehrstufige Axial- oder Radialspaltlabyrinth (Bild 17): Ein- oder mehrgängige Labyrinthdichtungen hätten eine wesentlich bessere Dichtwirkung als einfache Spaltdichtungen, erforderten jedoch auch einen größeren Fertigungsaufwand. Die Dichtwirkung könne noch gesteigert werden, indem von Zeit zu Zeit ein wasserunlösliches Schmierfett, z.B. ein Lithium-Kalzium-Seifenfett, durch einen Schmierkanal in die Labyrinthgänge eingepresst würde. Als Alternative zu gehäuseintegrierten Labyrinthdichtungen schlägt die SKF GmbH vor, wirksame und preiswerte Labyrinthdichtungen mit handelsüblichen, berührungsfreien Dichtelementen aufzubauen, z. B. mit den aus Stahlblech gepressten Dichtungslamellen von SKF (Bild 18). Die Dichtwirkung dieser Labyrinthdichtungen nehme mit der Zahl der eingebauten Lamellensätze zu oder könne durch Einlegen beflockter Dichtscheiben verstärkt werden.

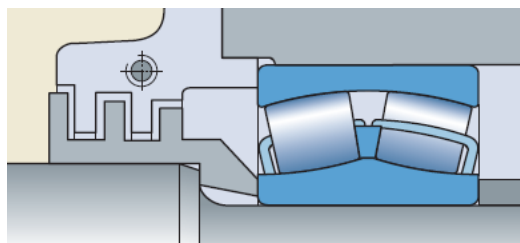


Bild 17: Radialspaltlabyrinth (16)

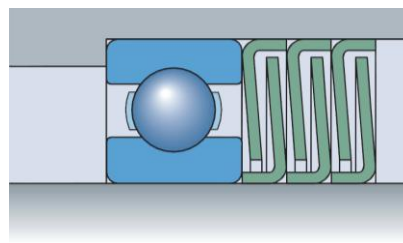


Bild 18: SKF Dichtungslamellen (16)

Fey Lamellenringe GmbH & Co. KG (17)

Die Firma Fey Lamellenringe fertigt Lamellendichtringe aus Federbandstahl bzw. Flachdraht in ganz unterschiedlichen Ausführungen. Die Dichtringe werden durch „Einspiralen“ in eine Nut in Welle oder Bohrung eingebracht und sind entweder innen-, außenspannend oder eine Kombination aus beidem. Fey Lamellenringe verbänden ein berührungsaarmes multiples Labyrinth mit sehr ge-

ringen Spaltweiten. Sie seien besonders deshalb wirksam zur Fettabdichtung und zum Ausschluss von flüssigen Medien, Schmutz- und Staubeintritt sowie anderen Verunreinigungen, so der Hersteller. Zusätzlich zu ihren hervorragenden Dichteigenschaften bei rotierenden Bauteilen, führten die berührungsarmen Lamellenringe mit geringer Reibung zu einer deutlichen Reduzierung von Eigenwärme und Verschleiß, was diese Dichtelemente für Hochgeschwindigkeitseinsätze und Anwendungen in temperatur- und/oder reibungsempfindlichen Einbaustellen geeignet mache. Bild 19 und Bild 20 zeigen zwei wichtige Vertreter für die Schmutzabdichtung mittels fettgefülltem Dichtspalt. Beide Dichtringe sind doppelt gewickelt und besitzen somit keinen Stoßspalt. Der Dichtring „FK 6 ASD“ (ist außenspannend. Der Dichtring „FK 6 ASKD“ besteht aus zwei außenspannenden Ringen und einem innenspannenden Ring. An „FK 6“ Lamellenringe würden besondere Abdichtungsansprüche gegen Fettaustritt und gegen Staub-, Schmutz- und Spritzwassereintritt gestellt. Bei den „FK 6 ASKD“ Dichtringen (zusätzliche Abdichtung des Nutgrunddurchmessers) sei die Abdichtung infolge des vergrößerten Umlenkungseffektes verbessert. Sie könnten laut Fey aber nur bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von 10 m/s eingesetzt werden.

1 Satz = 2 ASD-Ringe

1 Satz = $\begin{cases} 2 \text{ ASD-Ringe} \\ \text{und} \\ 1 \text{ ISD-Ring} \end{cases}$

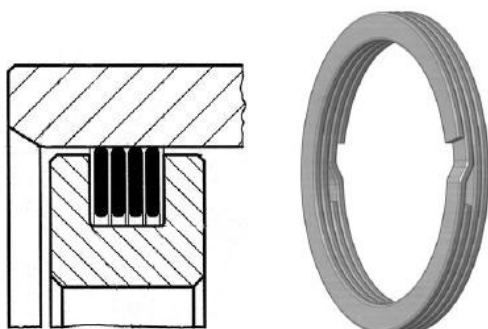


Bild 19: Fey „FK 6 ASD“-Dichtring (17)

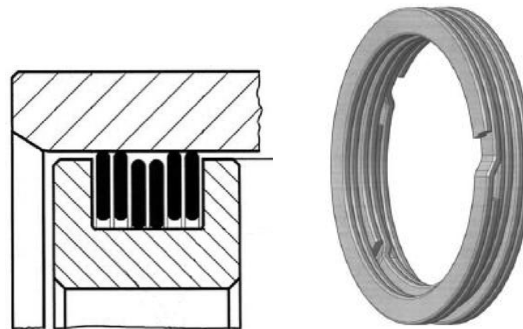


Bild 20: Fey „FK 6 ASKD“-Dichtring (17)

Zusammenfassung

Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen müssen vom Konstrukteur häufig selbst ausgewählt, entworfen und an die vorherrschenden Platzverhältnisse angepasst werden. In der Literatur gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen z. T. auch mit Einsatzempfehlungen. Vielfach wird durch häufiges Nachschmieren und mit konstruktivem Aufwand versucht, den Fettspace des Labyrinths vollständig mit Fett gefüllt und damit, nach den Vorstellungen vieler Autoren, in einem für Dichtungszwecke brauchbaren Zustand, zu halten. An dieser Stelle soll bereits angemerkt werden, dass genau diese Vorstellung sich bei den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt hat, sondern das Gegenteil festgestellt wurde. Was tatsächlich während des Betriebes in den jeweiligen Spaltabschnitten passiert und wie der Abdichtmechanismus von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen überhaupt funktioniert, beantwortet die Literatur nicht ansatzweise. Doch genau diese Informationen werden für eine zuverlässige Auslegung einer effektiven Abdichtung und einen ressourcenschonenden Umgang mit Fett benötigt.

3 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung und Quantifizierung der Funktionsweise von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen zur Schmutzabdichtung in Einzelanordnung (d. h. ohne Wälzlager) und bei horizontaler Wellenausrichtung sowie die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse in praxisgerechte Konstruktionsrichtlinien. Die Arbeit gliedert sich in folgende Teilbereiche:

- Erarbeitung des Stands der Technik
- Aufbau einer Prüfumgebung für die experimentelle Untersuchung an Dichtungen und Entwicklung von Analysemethoden für die Bewertung der Dichtgüte
- Analyse des Verhaltens von Fetten in Dichtsystemen aus Standard-Dichtspalten
- Strömungsanalyse von Fetten in Radialspalten
- Analyse des Dichtmechanismus bei Radial- und Axialspalt-Dichtsystemen bei unterschiedlichen Fetten unter der Beaufschlagung von Staub, Sand, Wasser und Schlamm
- Luftdurchsatzmessungen durch Dichtsysteme unterschiedlicher Geometrien
- Untersuchung von Kombinierten Dichtsystemen bestehend aus berührendem Dichtelement und Fettgefülltem Berührungsfreiem Wellendichtsystem
- Weiterentwicklung der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsysteme, um Altfett gezielt auffangen und entsorgen zu können, anstatt es als Fettleckage an die Umgebung abzugeben
- Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse in praxisgerechten Konstruktionsrichtlinien

4 Untersuchungseinrichtungen

Im folgenden Kapitel werden die eingesetzten Prüfstände und alle notwendigen Hilfseinrichtungen vorgestellt.

4.1 Prüfstände

Für die Erstellung der vorliegenden Arbeit konnten 2 Universalprüfstände des Instituts für Maschinenelemente genutzt werden. Der Grundaufbau ist bei beiden Prüfständen ähnlich und im folgenden Bild 21 dargestellt.

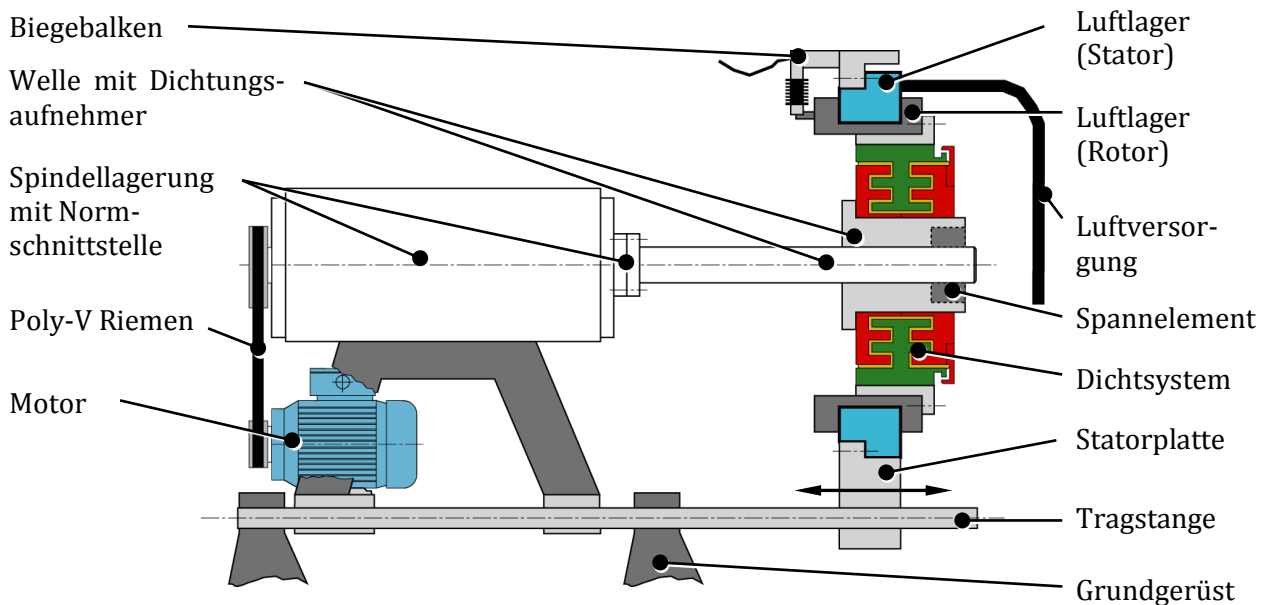


Bild 21: Aufbau IMA Universalprüfstände

Bei beiden Prüfständen erfolgen die Drehzahlsteuerung und die Messdatenerfassung über einen Mess-PC. Als Messsoftware wird Labview der Firma National Instruments verwendet. Der Antrieb erfolgt vom Motor über einen Poly-V Riemen auf eine präzise gelagerte Hauptspindel mit genormter Spindelschnittstelle. An diese Spindel kann die Welle der Prüfichtung angeflanscht werden. Die Statorteile der Prüfichtung werden auf einer Trägerplatte eines aerostatischen Lagers montiert, das auf mehreren achsparallel angeordneten zylindrischen Stangen geführt ist. Über diese Stangen ist es möglich die Statorteile in axialer Richtung zur Versuchswelle zu positionieren. Der bewegliche Teil des aerostatischen Lagers stützt sich über einen Hebelarm auf einem Biegebalken ab. So ist es möglich das bei Wellendrehung von der Dichtung hervorgerufene Moment verlustfrei zu erfassen. Die Reibmomentmessung ist im Bereich von 0,1 Nmm - 8 Nm möglich. Das gemessene Drehmoment ist bei Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen ein Maß für den Füllungsgrad des Dichtspaltes mit Fett oder Schmutz. Je nach Art der Dichtungsuntersuchung können die Prüfstände mit weiteren Zusatzeinrichtungen wie Druckkammer, Schmutzbeaufschlagungs- und Bespritzungskammer und zugehöriger Messtechnik ausgerüstet werden.

4.1.1 Prüfstand BFWD I

Am Prüfstand BFWD I wurden die strömungstechnischen Grundlagenuntersuchungen mit durchsichtig ausgeführten Dichtsystemen und teilweise eingefärbtem Fett durchgeführt. Die Antriebsleistung des Prüfstandes beträgt 9 kW und die Spindeldrehzahl ist zwischen -20.000 und 20.000 min^{-1} stufenlos programmierbar. Für die Visualisierung der Fettströmung im durchsichtig ausgeführten Dichtsystem wurde hinter dem Luftlager eine Lichtquelle angebracht. Das Fett wurde hier mit einer Kleinfettpresse ins Dichtsystem eingebracht. Der für die Versuchsdurchführung verwendete Prüfstand gliedert sich in folgende Komponenten (Bild 22).

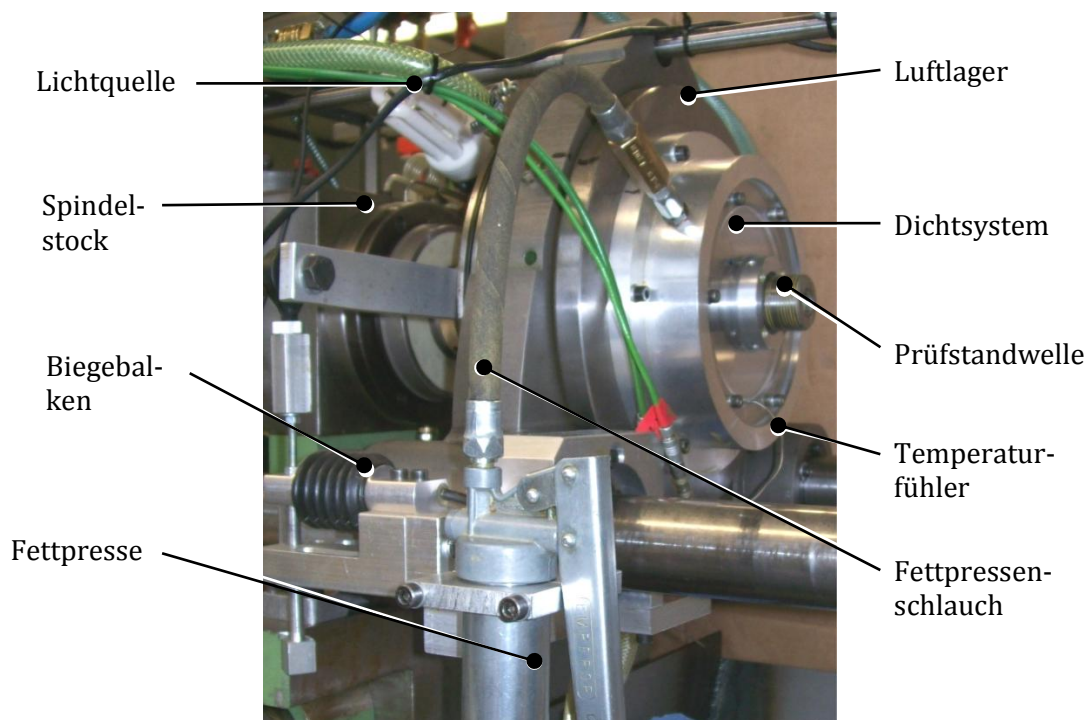


Bild 22: Prüfstand BFWD (18)

4.1.2 Prüfstand BFWD III

Für die Untersuchungen aller weiteren Dichtsysteme wurde der Universalprüfstand BFWD III verwendet. Der Spindeltrieb hat eine Antriebsleistung von 4,6 kW bei einem maximalen Antriebsmoment von 4,3 Nm. Bild 23 zeigt den Prüfstand BFWD III.

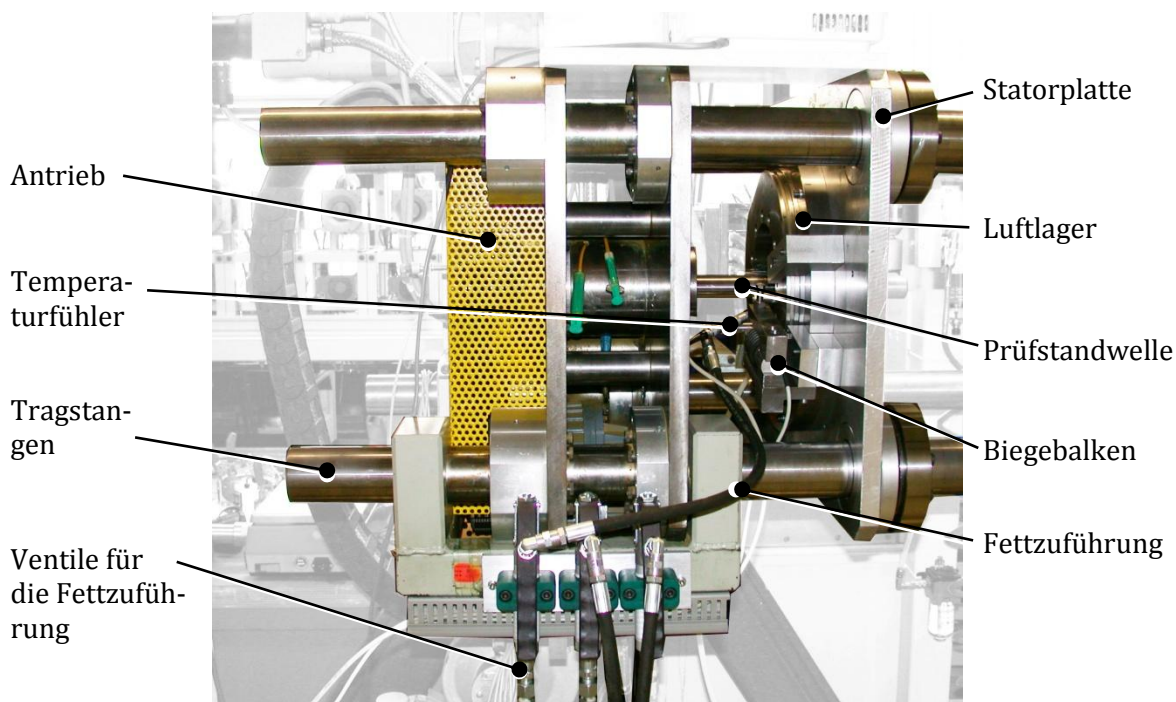


Bild 23: Prüfstand BFWD III

Die Drehzahl der Versuchswelle kann zwischen -3000 und 3000 min^{-1} stufenlos variiert werden. Mit einer pneumatischen Fettfördereinheit wird Fett durch Fettzuführungsbohrungen in das Dichtsystem eingebracht. Der Fettstrom wird durch Handventile gesteuert. Die Temperatur des Fettes im Dichtspalt wird mit einem Pt 100 Sensor, der in eine Bohrung des Dichtsystems eingeführt wird, gemessen.

4.2 Hilfseinrichtungen

Für die Durchführung der Versuche, deren Auswertung und zur Gewinnung weiterer Erkenntnisse waren unterschiedliche Hilfseinrichtungen notwendig.

4.2.1 Staubbeaufschlagungseinheit und Staubkammer für Prüfstand BFWD III

An der Vorderseite des Dichtsystems (rechts der Statorplatte) besteht bei diesem Prüfstand die Möglichkeit zur Schmutzbeaufschlagung. Für staubfähige Verschmutzung steht eine Beaufschlagungseinheit zur Verfügung. Die Anordnung am Prüfstand ist in Bild 24 dargestellt.

Die Beaufschlagungseinheit ist auf einer weiteren Trägerplatte am Prüfstand achsparallel verschiebbar montiert. Die äußere Grenze des Arbeitsraumes bildet ein zwischen den Platten angeordneter Plexiglaszylinder. Dieser ermöglicht das Dichtsystem auch während der Versuche zu beobachten. Das Prüfmedium, welches nicht ins Dichtsystem eingedrungen ist, kann nach unten durch einen Kugelhahn aus der Prüfzelle abgelassen werden. Diese Prüfzelle entspricht bei einer Lagerung einer Maschine der der Verschmutzung ausgesetzten Außenseite oder des Arbeitsraumes und wird im Folgenden „Arbeitsraum“ genannt.

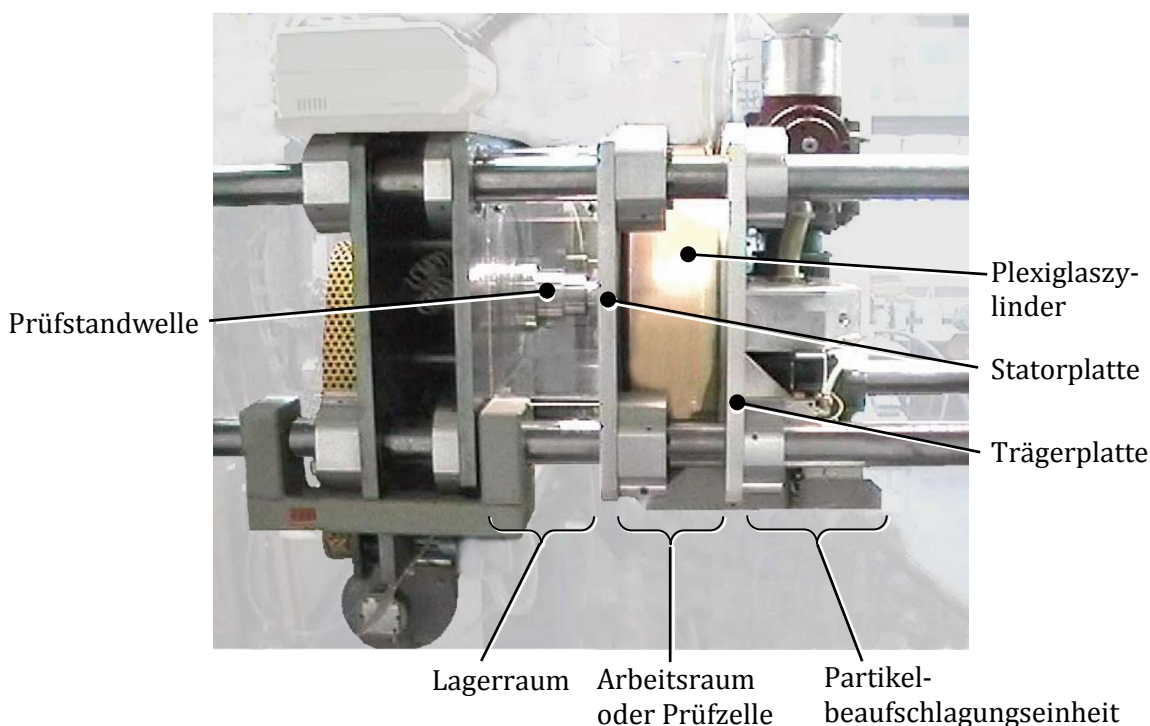


Bild 24: Raumordnung des Prüfstandes BFWD III bei Schmutzbeaufschlagung (Seitenansicht)

Als „Lagerraum“ wird der Raum hinter dem Versuchs-dichtsystem, in dem z. B. bei Arbeitsmaschinen die Wälzlager sitzen, bezeichnet. Partikel, die das Versuchs-dichtsystem passieren und in diesem Raum gefunden werden, werden im Folgenden als Leckagepartikel bezeichnet.

Bild 25 zeigt die Beaufschlagungseinheit im Detail. Diese besteht aus einem Partikelbehälter, aus dem mittels einer drehzahlgeregelten Dosierschnecke staubförmiges Verschmutzungsmedium zu einer rotierenden Streuscheibe zur Partikelbeschleunigung transportiert wird. Um eine „Brückenbildung“ des Verschmutzungsmediums im Partikelbehälter zu verhindern und so die Schmutzbeaufschlagung konstant halten zu können, ist der Vorratsbehälter mit einem Rührwerk ausgestattet.

Der auf das Dichtsystem aufgebrachte Schmutzmassenstrom ist über die Drehzahl der Dosierschnecke einstellbar. Die Partikelanfluggeschwindigkeit kann über die Drehfrequenz der Streuscheibe eingestellt werden. Hier wurde auf die vorhandenen Erfahrungen am Institut für Maschinenelement zurückgegriffen und die Partikelgeschwindigkeiten in einem Bereich zwischen 11 bis 40 m/s gehalten.

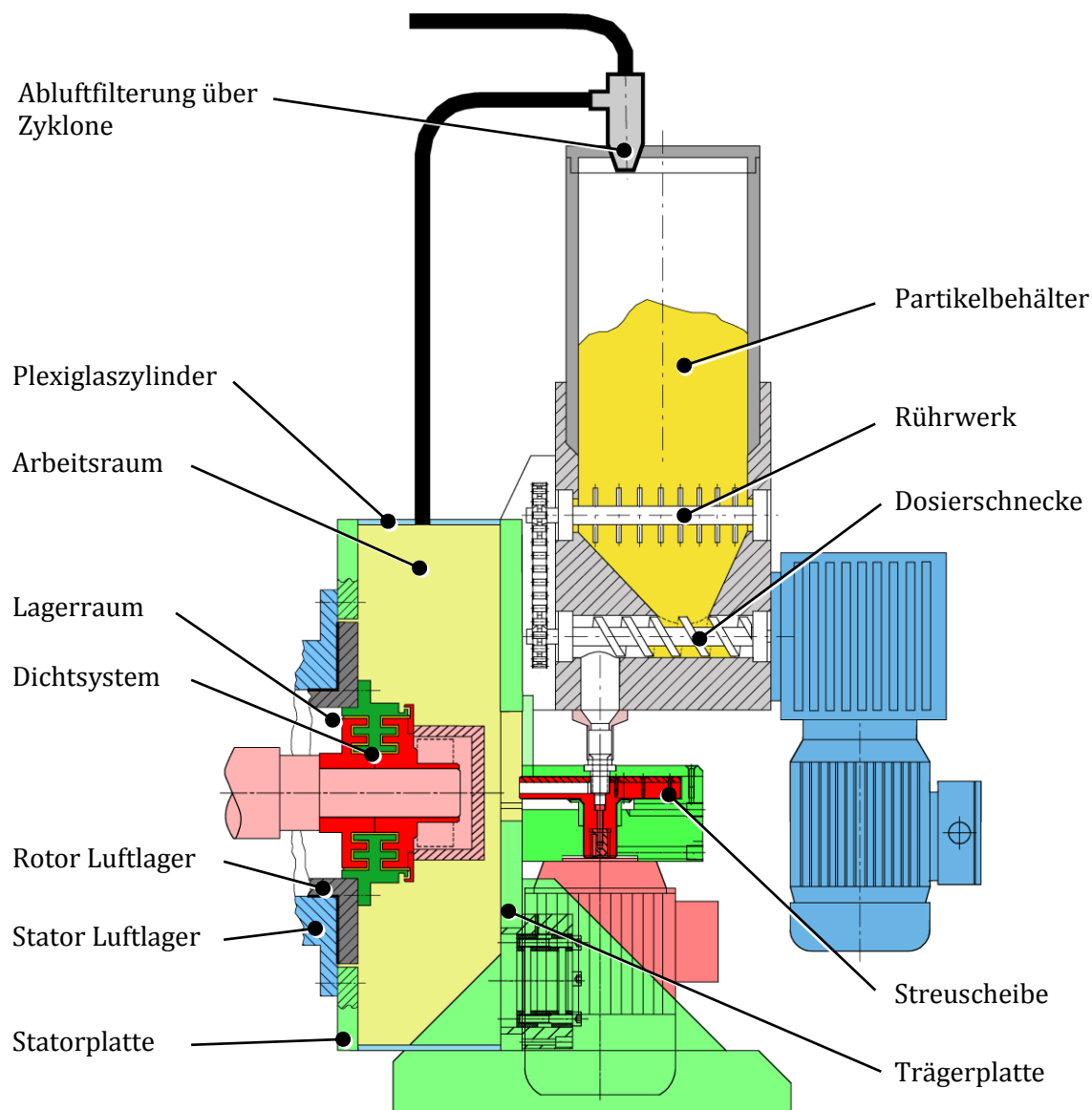


Bild 25: Beaufschlagungseinheit, Dosiereinheit 90° verdreht gezeichnet

4.2.2 Druckkammer für Prüfstand BFWD III

Für die Messungen unter einseitiger Druckbeaufschlagung und des Luftdurchsatzes durch das Dichtsystem kann am Prüfstand BFWD III eine Druckkammer vor die Dichtsysteme gesetzt werden. Diese besteht aus einem einseitig verschlossenen durchsichtigen Plexiglaszylinder, der auf das Dichtsystem aufgesetzt wird. In Bild 26 ist ein Schnittbild der Druckkammer dargestellt. Der Blick auf das Dichtsystem für die Beobachtung des vorderen Dichtspalteinganges bleibt so voll erhalten. Die Druckkammer ist auch völlig vom Luftlager abgeschlossen, so dass hier keine die Versuche verfälschenden Luftströmungen auftreten können. Die Druckbeaufschlagung erfolgt mit der in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Druckregel- und Volumenstrommeseinheit. Der Istdruck wird hierfür direkt in der Druckkammer gemessen und entsprechend dem Sollwert eingeregelt. In weiteren Versuchen wurde die Druckkammer für die Flüssigkeitsbespritzung modifiziert. Bild 27 zeigt die Druckkammer mit Bespritzungsausrüstung.

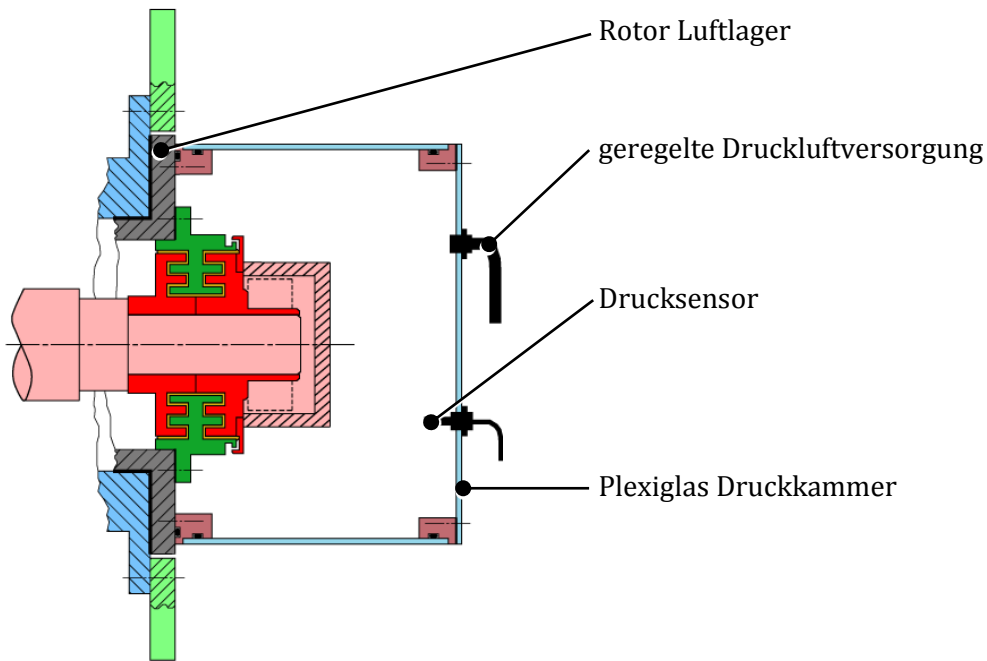


Bild 26: Druckkammer

4.2.3 Flüssigkeitsbeaufschlagungseinheit für Prüfstand BFWD III

Für die Flüssigkeitsbeaufschlagung wurde die zuvor beschriebene Druckkammer mit einem Ablauf und einer Keramik Hohlkegeldüse vom Typ „Albuz ATR lila“ versehen (Bild 27). Diese Düse hat einen Spritzwinkel von 80° und war mittig vor der zu untersuchenden Dichtung in der vorderen Kammerwand angebracht und hat ringförmig das Bespritzungsfluid auf den Spalteingang auf gesprüht. Der Druckausgleich erfolgte über Entlüftungsbohrungen an der Stirnwand.

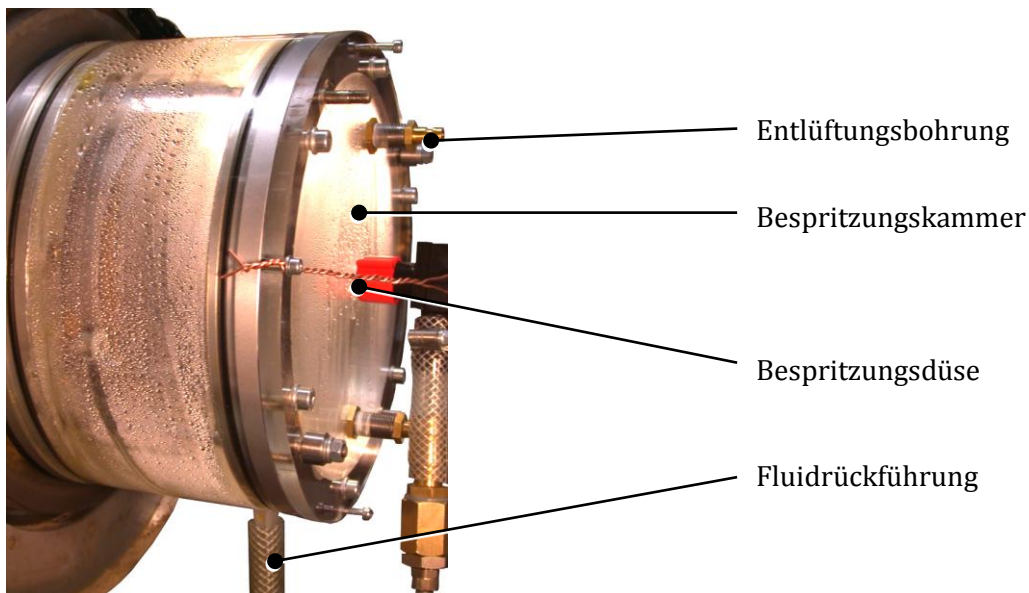


Bild 27: Flüssigkeitsbeaufschlagungseinheit mit Hohlkegeldüse „Albuz ATR lila“

4.2.4 Pneumatische Kleinmengen-Fettfördereinheit



Bei Vorversuchen hat sich gezeigt, dass das Fett möglichst durch einen kontinuierlichen Volumenstrom in das Dichtsystem eingebracht werden sollte. Nur so ist eine gleichmäßige Fettfüllung ohne Luftblasen erreichbar und es sind die Versuchsbedingungen bei allen Versuchen vergleichbar. Für die Befüllung der nicht durchsichtigen Dichtsysteme am Prüfstand BFWD III wurden 3 pneumatische Kleinmengen-Fettfördereinheiten (Bild 28) verwendet. So konnten ohne allzu großen Aufwand 3 Fettsorten nacheinander untersucht werden. Der Fettvolumenstrom ist bei diesen Geräten durch die Wahl des Luftdrucks einstellbar.

Bild 28: Kleinmengen-Fettfördereinheit

4.2.5 Fettpresse

Für die Befüllung der Dichtsysteme aus Plexiglas am Prüfstand BFWD I wurde eine handelsübliche Kleinfettpresse mit einem Volumen von 130 cm³ verwendet. Der Schlauch der Fettpresse war über eine Drehdurchführung vom Dichtsystem entkoppelt. Auf Bild 29 ist die Fettpresse dargestellt. Der häufige Wechsel der Fettsorte und die geforderte hohe Flexibilität bei den Versuchen zur Untersuchung der Fettströmung im Spalt machten den Einsatz von Kleinmengen-Fettfördereinheiten unmöglich. So wurde hier auf die Fettpresse zurückgegriffen. Die Zustände im Spalt waren hier durch die transparente Dichtsystemausführung jederzeit sichtbar und gegebenenfalls konnten Luftblasen im Spalt mit neuem Fett ausgepresst werden.



Bild 29: Fettpresse

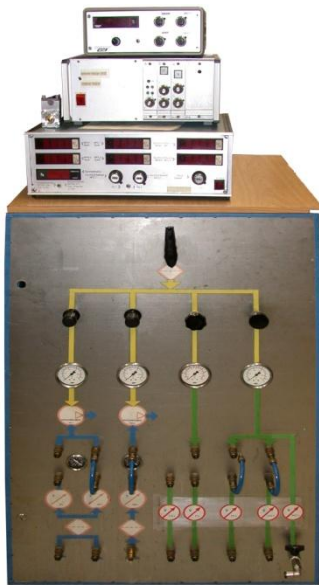
4.2.6 Kleinmengen-Fettspritze

Für die Versuche zur Ermittlung der Strömungsvorgänge wurde zur besseren Sichtbarkeit der Fettbewegung an definierten Stellen der Dichtsysteme gefärbtes Fett zugeführt. Dieses gefärbte Fett wurde mit Einwegspritzen in das Dichtsystem eingebracht. Auf Bild 30 ist die mit einem Krümmer aus Kunststoffschlauch modifizierte Einwegspritze dargestellt. Das Mundstück am Schlauchende wurde in eine Stufenbohrung in der Statorscheibe des Dichtsystems eingeführt.



Bild 30: Kleinmengen-Fettspritze für die Farbeinbringung

4.2.7 Luft Druckregel- und Volumenstrommesseinheit



Bei den Versuchen mit einseitiger Druckbeaufschlagung und bei den Luftdurchsatzmessungen am Dichtsystem kam die auf Bild 31 dargestellte Druckregel- und Volumenstrommesseinheit zum Einsatz. Mit dieser Einheit ist es möglich, den Druck in der Kammer zu messen, zu regeln und / oder den Luftstrom durch das Dichtsystem zu erfassen. Das Gerät wird mit Haus-Druckluft versorgt, verfügt über einen Mikrofilter und besitzt mehrere getrennte Zuluftkanäle mit jeweils einem maximalen Volumenstrom von 0,2; 2; 10; 100; und 500 l/min. Die Volumenstromangaben beschreiben Normliter bezogen auf einen Normaldruck von 1013 mbar bei 20 °C.

Für die Versuche wurde das Dichtsystem hierfür auf der Überdruckseite mit der beschriebenen Druckkammer (Kap 4.2.2) versehen und an diese an die Druckregleinheit angeschlossen. Der Druckverlauf in der Druckkammer und der durch das Dichtsystem entweichende Luftstrom wurden vom Mess-PC erfasst.

Bild 31: Druckregel- und Volumenstrommesseinrichtung

4.2.8 Stereomikroskop

Für die Partikelanzahlbestimmung wurde das institutseigene Zeiss Stereomikroskop mit einem Vergrößerungsbereich von 8 bis 64 -fach verwendet.

4.2.9 Rheometer Viscolab LC 10 mit IMA Kegel-Platte Prüfeinrichtung

Mit dem Rheometer Viscolab LC 10 wurden vergleichende Messungen der scheinbaren dynamischen Viskosität der untersuchten Fette bei unterschiedlichen Scherraten und Temperaturen vorgenommen. Wird das Rheometer an den Messrechner angeschlossen, so sind mit einer Labview Steuerung voll automatisierte Messungen durchführbar. Der Messkegel hat einen Durchmesser von 30 mm. Mit der Temperierung können Fettproben zwischen 5 °C und 90 °C untersucht werden. Die Schergeschwindigkeit kann in Stufen zwischen 6 und 4800 1/s eingestellt werden. Bild 32 zeigt die im Rahmen der Forschungsarbeiten entstandene Prüfeinrichtung.

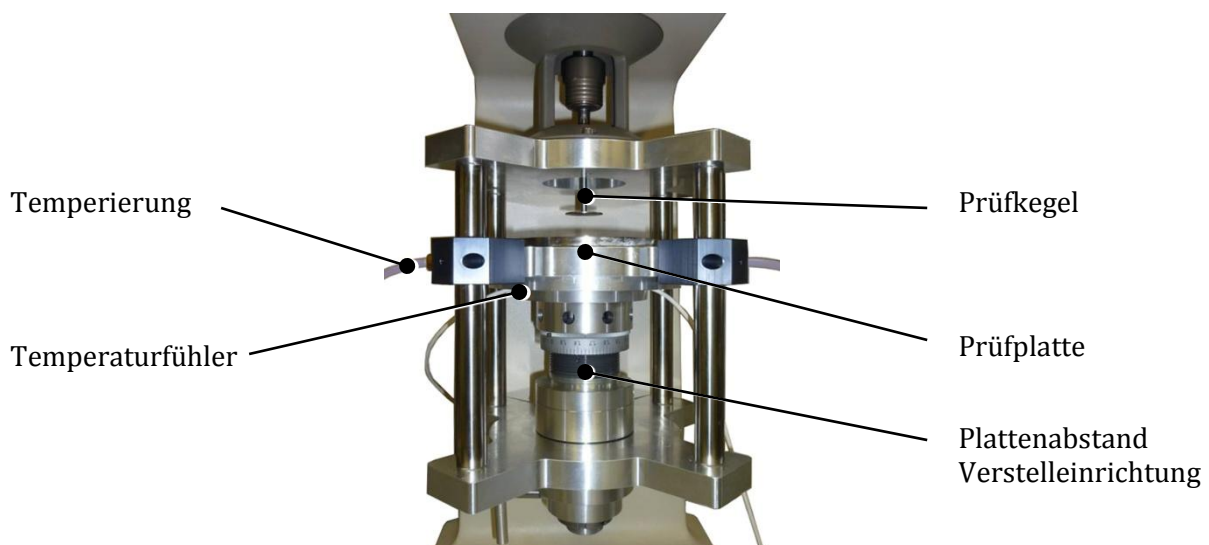


Bild 32: Kegel-Platte Rheometer

5 Untersuchungsmaterialien

Im folgenden Kapitel werden alle verwendeten Untersuchungsmaterialien vorgestellt.

5.1 Dichtsysteme

5.1.1 Radialspalt-Dichtsysteme

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen an Standard-Dichtspaltgeometrien vorgenommen. Diese wurden unterteilt in Radialspalt- und Axialspalt-Dichtsysteme. Für die systematische Untersuchung der Radialspalt-Dichtsysteme wurden zwei Radialspalt-Dichtsystembaukästen entworfen, die Innenrotor-Dichtsysteme und die Außenrotor-Dichtsysteme. Alle Teile der Radialspalt-Dichtsysteme waren aus Stahl durch Feindreihen gefertigt, die axialen Stirnflächen-Lamellen wurden zusätzlich überschleift. Der Einfluss der Oberflächenstruktur und Rauheit hat auf die Fettströmung wenig Einfluss (19).

5.1.1.1 Innenrotor-Dichtsysteme

Beim Innenrotor-Dichtsystembaukasten können durch die Variation der Lamellenanzahl, der Lamellendurchmesser, der Breite und dem Durchmesser von Distanzhülsen eine Vielzahl von Dichtspaltgeometrien ausgeführt werden. Auf Bild 33 ist der Innenrotor-Dichtsystembaukasten mit einigen Variationsmöglichkeiten dargestellt.

Das Dichtsystem besteht aus einer Stator-Grundeinheit, die am Prüfstand mit dem Rotor des Luftlagers verschraubt wird. Durch axiales Klemmen werden hier die stehenden Teile des Dichtsystems in der Stator-Grundeinheit befestigt. In dieser Statoreinheit sind auch die Fettzuführung und Bohrungen für den PT 100-Fühler zur Temperaturmessung untergebracht.

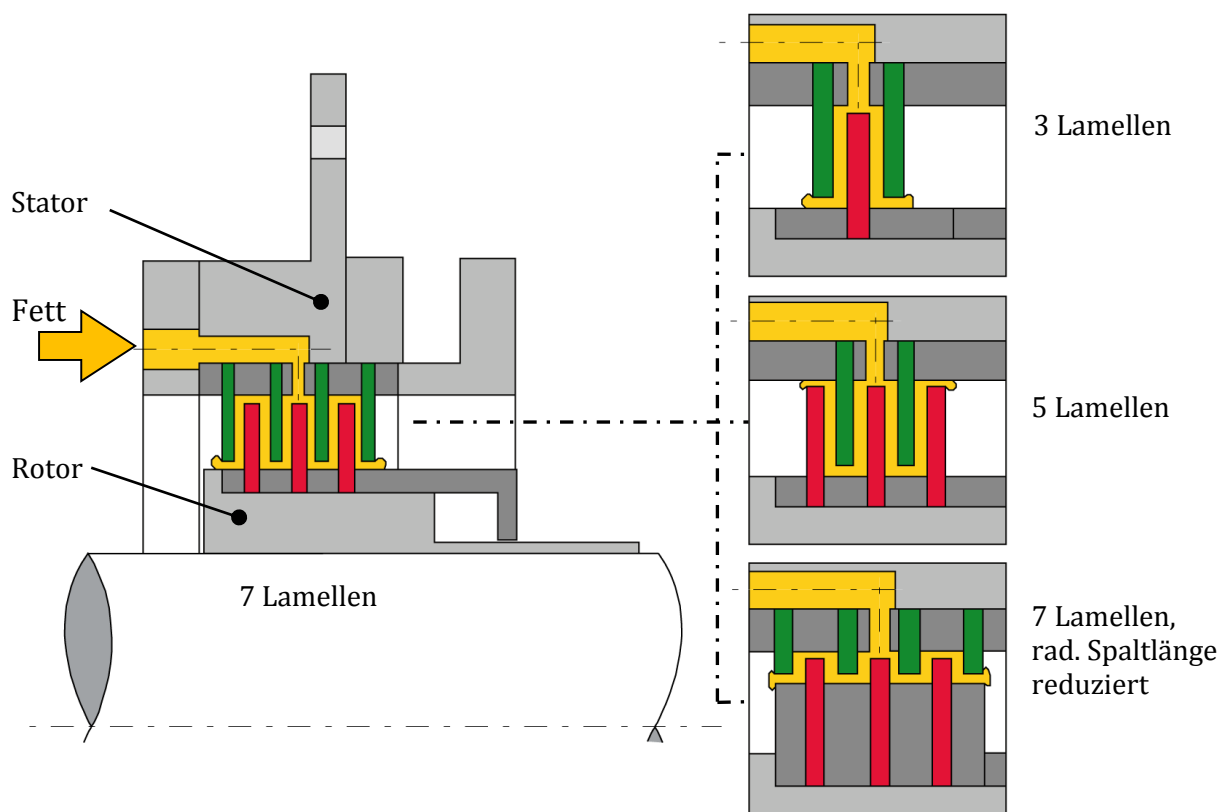


Bild 33: Innenrotor Dichtsystembaukasten

Die Rotoreinheit wird mittels eines Bikon Spannsatzes auf der Prüfstandwelle befestigt. Auch hier erfolgt die Befestigung der rotierenden Elemente des Dichtsystems durch axiales Verspannen. Das Dichtsystem selbst besteht aus einem individuell zusammenstellbaren Paket aus Lamellen für Rotor und Stator und den zugehörigen Distanzringen. Bei diesem Dichtsystem kann zwischen sieben,

fünf und drei Lamellen gewählt werden. Je nach Lamellenanzahl ist die jeweils äußere Decklamelle statorseitig oder rotorseitig befestigt. Dann kann durch Verändern des Innendurchmessers der Lamellen am Stator und der Distanzringe am Rotor die radiale Dichtsystemhöhe 3-fach variiert werden. Die axialen Dichtspalthöhen zwischen den Lamellen werden durch den Einsatz von Distanzringen mit unterschiedlicher Breite eingestellt, hier sind Spalthöhen zwischen 2 und 0,75 mm vorgesehen. Die radialen Dichtspalthöhen zwischen den Distanzringen und den Lamellen sind zwischen 1 und 2 mm wählbar. Insgesamt ergeben sich so 105 Geometrievarianten.

Bei den Versuchen wurden wesentliche Geometrievarianten untersucht. Es haben sich einige Einflüsse der Spaltgeometrie auf das Fetthaltevermögen eines Dichtspaltes herausgestellt. Die aussagekräftigen Versuche werden mit ihrer Geometrie und den zugehörigen Ergebnissen in Kapitel 7.1 vorgestellt. Spaltgeometrien, die durch positive Eigenschaften bei den Grundlagenuntersuchungen aufgefallen sind, wurden für weitere Untersuchungen unter Druck und Staubbeaufschlagung verwendet.

5.1.1.2 Außenrotor-Dichtsysteme

Bei den Außenrotor-Dichtsystemen ist der Innenteil des Dichtsystems stillstehend. Der Außenteil läuft um. So entstehen umgreifende und umlaufende fettgefüllte Dichtkammern. Der Einfluss der wirkenden Fliehkräfte auf das Fett ist hier im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Innenrotor-Dichtsystemen in umgekehrter Anordnung von besonderem Interesse. Die Spalthöhen wurden hier analog zu den Innenrotor-Dichtsystemen gewählt. Konzeptbedingt mussten hier 5- und 3-lamellige Dichtsysteme gewählt werden. Auf den folgenden Abbildungen (Bild 34 und Bild 35) ist die Geometrie der 5- und 3-Lamellensysteme dargestellt.

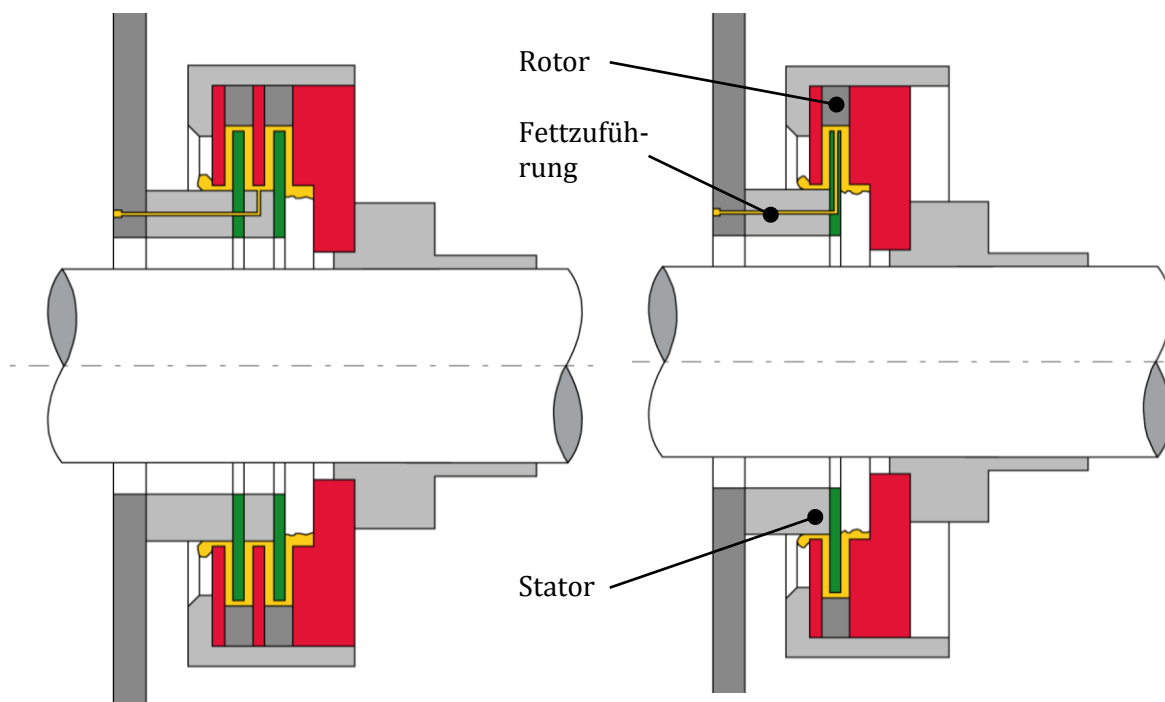


Bild 34: Außenrotor-Dichtsystem mit 5 Lamellen

Bild 35: Außenrotor-Dichtsystem mit 3 Lamellen

Die Fettzuführung ist jeweils in der Mitte der Dichtsysteme angeordnet. Bei drei Lamellen erfolgt diese durch die Statorlamelle, bei fünf Lamellen durch den mittigen Distanzring. Die Befestigung der Stator- und Rotorlamellen erfolgt hier auch durch axiales Verspannen. Die Bohrung für den Temperaturfühler und die Fettzuführung sind hier im Stator des Dichtsystems untergebracht. Die Verstellung der Dichtspalthöhen und der radialen Dichtspaltlänge erfolgt hier identisch wie beim Innenrotor-Dichtsystem. Die Systemgrundabmessung und die jeweilige Stufung wurden vom Innenrotor-Dichtsystem übernommen, so können die Ergebnisse beider Konzepte direkt miteinander verglichen werden.

5.1.1.3 Dichtsysteme zur Strömungsuntersuchung

Die Dichtsysteme zur Strömungsuntersuchung in fettgefüllten Spalten waren aus zwei Statorlamellen und einer mittig angeordneten Rotorlamelle aufgebaut. Alle Lamellen waren aus durchsichtigem Plexiglas. Die Lamellenplatten hatten eine Stärke von 10 mm. Zusätzlich waren an der vorderen Lamellenplatte mehrere kleine Bohrungen auf verschiedenen Durchmessern eingebracht. Durch diese Bohrungen wurden kleine Mengen von gefärbtem Fett in das Dichtsystem gepumpt. Mit Hilfe von gefärbtem Fett konnte die Fettströmung analysiert werden. In Bild 36 ist der Aufbau der verwendeten Dichtsysteme dargestellt. Alle Spalthöhen betragen 1 mm. Das Fett wurde über sechs radiale Bohrungen in das Dichtsystem eingebracht. Die Stator- und Rotorplatten wurden durch axiales Verspannen in den jeweiligen Aufnahmen befestigt.

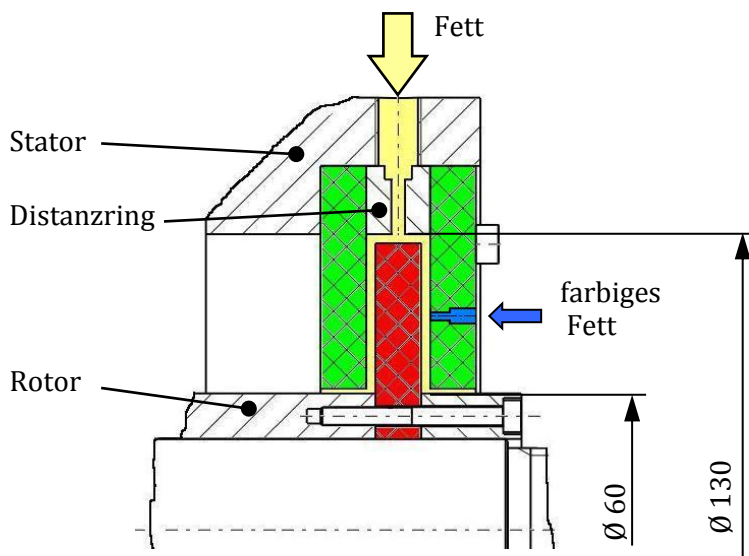


Bild 36: Dichtsystem zur Strömungsuntersuchung (18)

5.1.2 Axialspalt-Dichtsysteme

Die zweite Gruppe der Standard-Dichtspaltgeometrien stellen Axialspalte dar. Axialspalt-Dichtsysteme bestehen im Wesentlichen aus mehreren ineinander kämmenden Axiallamellen. Die Fertigung und auch die Montage dieser Systeme in axialer Richtung sind sehr einfach und deshalb für die Anwendung hochinteressant. Des Weiteren kann mit dieser Dichtspaltform ein gewisser axialer Längenausgleich im Dichtspalt realisiert werden. Werden in radialer Richtung mehrere Axiallamellen angeordnet, entsteht je nach Position der Spalteingänge bei Wellenrotation eine förderaktive Dichtspaltgeometrie. Es wurden insgesamt sechs Axialspalt-Dichtsysteme in Doppelanordnung entworfen. Durch den symmetrischen Aufbau der Doppelanordnung konnte das Fett mittig in die Dichtsysteme eingebracht werden. Es wurden jeweils drei Baugrößen mit Dichtspalthöhen von 2 mm, 1,5 mm und 0,75 mm realisiert. Hauptunterschied beider Bauformsätze ist die Befestigung des Innenteils. Der Innenteil ist bei der einen Bauform an der rotierenden Welle befestigt, bei der anderen dagegen mit der stehenden Dichtsystemaufnahme fest verbunden. Dadurch erhält man im einen Fall einen Spalt mit „Einfördertendenz“ im anderen mit Ausfördertendenz. Die Dichtsysteme mit rotierendem Innenteil und einförderndem Spalt werden nachfolgend mit der Buchstabenfolge „EIN“ bezeichnet, die anderen entsprechend mit „AUS“. Als Material wurde für die Labyrinthkörper aller Axialspalt-Dichtsysteme Aluminium gewählt.

5.1.2.1 Dichtsystem EIN 01

Das Dichtsystem EIN 01 ist in Bild 37 dargestellt. Der Spalteingang befindet sich am Innendurchmesser und so entstehen zwei kämmende Axialspalt-Anordnungen, die ein Ausfördern von Fett aus dem System verhindern sollen. Der schmutzbeaufschlagte Spalteingang ist als sogenannter abge-

deckter Spalteingang (2) ausgeführt. Schnell anfliegende Partikel werden so am direkten Eindringen in den sich dahinter befindenden Axialspaltbereich gehindert. Die Dichtspalthöhen betragen alle 2 mm. Der Rotor wird axial auf der Welle verspannt. Über eine Bohrung am stehenden Außen teil wird Fett in das Dichtsystem eingebracht. Die genaue axiale Position des Rotors und der vorde ren Spaltabdeckung wurde mit Hilfe einer digitalen Messuhr eingestellt.

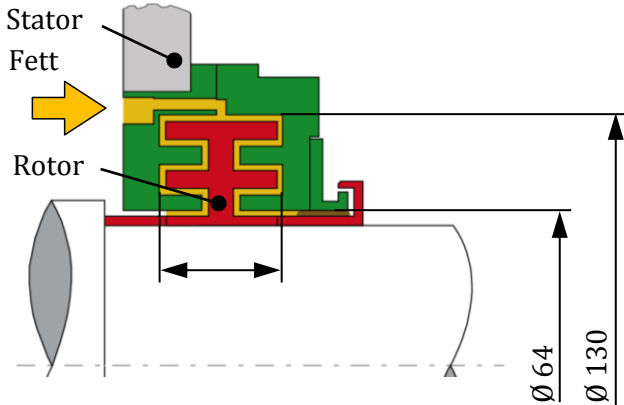


Bild 37: Dichtsystem EIN 01

5.1.2.2 Dichtsystem EIN 02

Der Aufbau von Dichtsystem EIN 02 ist identisch zu EIN 01. Die Abmessungen sind in Bild 38 dargestellt. Die Dichtspalthöhe beträgt hier 1,5 mm.

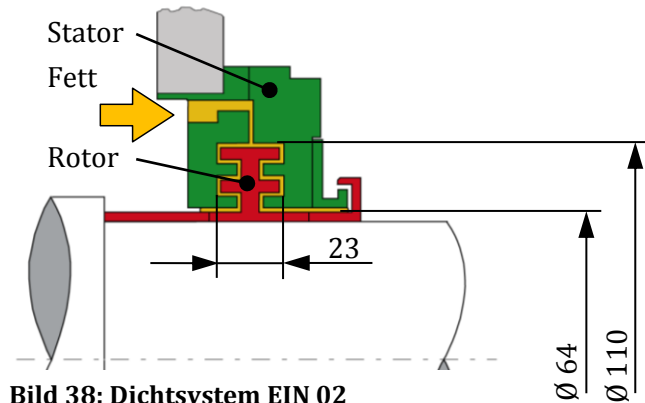


Bild 38: Dichtsystem EIN 02

5.1.2.3 Dichtsystem EIN 03

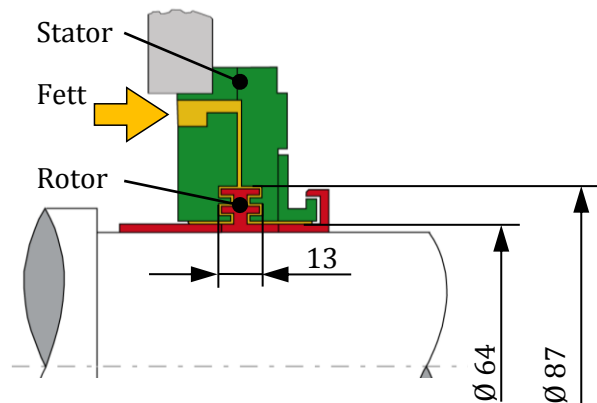


Bild 39: Dichtsystem EIN 01

Das Dichtsystem EIN 03 ist das kleinste untersuchte Axialspalt-Dichtsystem. Der Aufbau entspricht ebenfalls dem von EIN 01. Die Spalthöhen sind bei diesem Dichtsystem 0,75 mm groß (Bild 39)

5.1.2.4 Dichtsystem AUS 01

Das Dichtsystem AUS 01 ist genau anders herum aufgebaut wie die drei zuvor beschriebenen Dichtsysteme der Bauform EIN. Der Innenteil ist hier der Stator und der zweiteilige Rotor besteht ebenfalls aus zwei sich kämmenden Axialspaltanordnungen. Das jeweilige Spaltende befindet sich dabei stets am größten Durchmesser. Insgesamt besteht hier eine Förderwirkung aus dem Dichtsystem heraus. Die Größen der Einzelelemente wurden bei beiden Dichtsystembauarten (EIN und AUS) innerhalb einer Baugröße (01, 02 oder 03) bestmöglich beibehalten, so dass eine sehr gute Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse beider Bauarten innerhalb einer Baugröße besteht. Beim Dichtsystem AUS 01 wurden zusätzlich unterschiedliche Geometrien des Spalteinganges untersucht. Aus diesem Grund gibt es bei diesem Dichtsystem noch die ebenfalls in Bild 40 auf der rechten Seite dargestellten Spalteingangsformen mit den Namensendbezeichnungen „rad“ und „ax“. „rad“ steht für radialer Spalteingang. „ax“ für axialer Spalteingang. Der Abgedeckte Spalteingang hat keine Sonderbezeichnung.

Die Spalthöhe aller Spalte beträgt bei diesem System 2 mm.

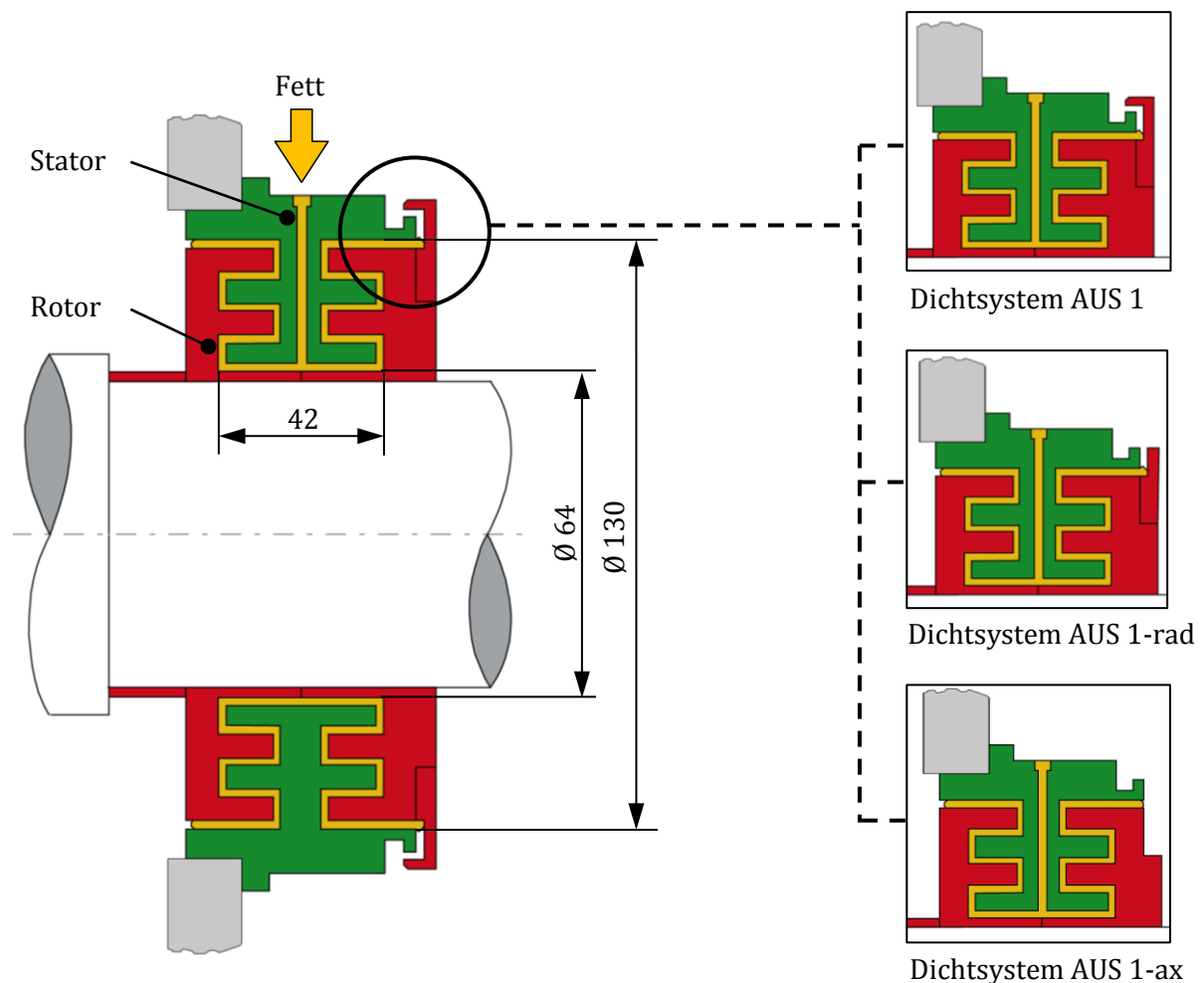


Bild 40: Dichtsystem AUS 01 mit Variationen am Spalteingang

5.1.2.5 Dichtsystem AUS 02

Das Dichtsystem AUS 02 ist vom Aufbau gleich wie AUS 01. Die Dichtspalthöhe beträgt hier 1,5 mm. In Bild 41 ist AUS 02 dargestellt.

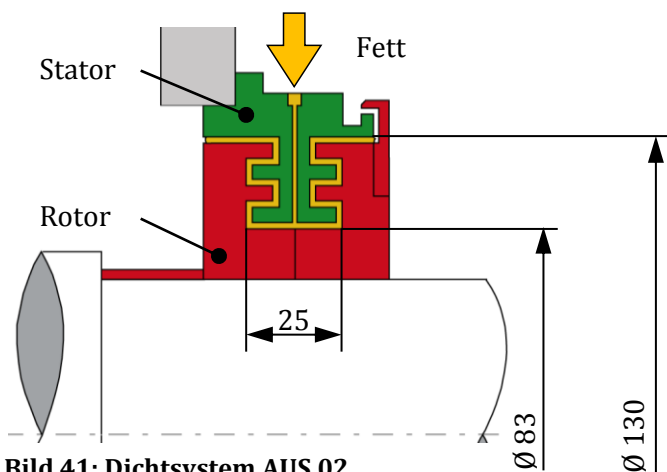


Bild 41: Dichtsystem AUS 02

5.1.2.6 Dichtsystem AUS 03

Der Aufbau des Dichtsystems AUS 03 ist identisch zu AUS 01. Auf Bild 42 ist AUS 03 dargestellt. Die Dichtspalthöhe beträgt hier 0,75 mm.

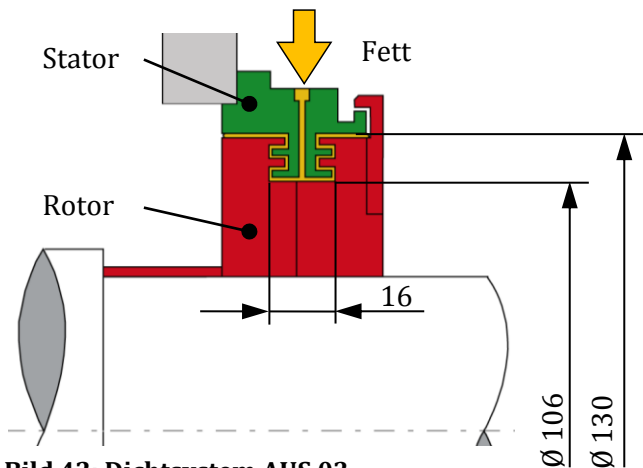


Bild 42: Dichtsystem AUS 03

5.1.3 Kombinierte Dichtsysteme

Die kombinierten Dichtsysteme sind aus zwei Teilen aufgebaut: Der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtung (FBFWD) und einer nachgeschalteten berührenden Dichtung. Die Funktion „Abdichtung gegen Verschmutzung von außen“ wird bei diesen Kombidichtsystemen in zwei Funktionsbereiche aufgeteilt. Die FBFWD soll Staub und Schmutz von der berührenden Dichtung abhalten. Die berührende Dichtung dahinter hat die Aufgabe einen möglichen Luftzug durch das Kombisystem zu verhindern. Als Geometrie für den berührungsfreien Teil wurden bereits vorgestellte BFWWD mit Axialspalt leicht modifiziert, so dass die berührenden Elemente in das Kombisystem integriert werden konnte. Als Basis für den berührungsfreien Teil diente das System „AUS 02“. Für die berührenden Dichtungen wurden Dichtlippengeometrien herangezogen, die für die Fettversorgung der vorgeschalteten FBFWD geeignet sind. Ihre Dichtlippe muss also ein „Durchschmieren“ durch Anheben der Lippe ermöglichen. Als berührende Dichtelemente wurden ein Radial-Wellendichtring (RWDR) vom Typ BAU5X2 (20) von Freudenberg und ein V-Ring mit folgender Typenbezeichnung TWVS00750-N6T50 (21) von Trelleborg ausgewählt. Beide Dichtungen bestehen aus NBR. Als Gegenaufläßen wurden beim RWDR geschliffene Wellenreparaturhülsen mit einem Durchmesser von 80 mm eingesetzt. Für den V-Ring wurde als Gegenaufläßen eine geschlif-

fene Stahlscheibe verwendet. Auf den folgenden Bildern (Bild 43 und Bild 44) sind die untersuchten Kombidichtsysteme dargestellt.

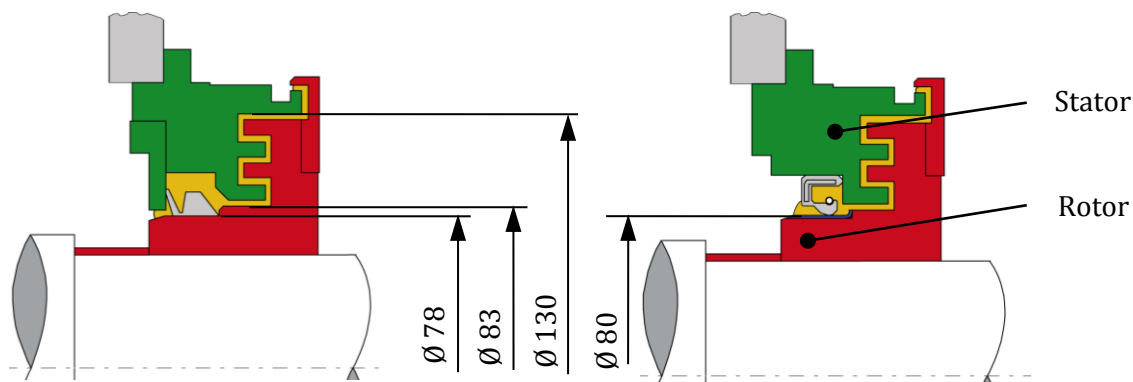


Bild 43: Kombidichtsystem AUS 02-V-Ring (22) **Bild 44: Kombidichtsystem AUS 02-RWDR (22)**

Die Spalthöhen der berührungsfreien Wellendichtungen wurden von den Axialspalt-Dichtsystemen übernommen. Die Kombidichtsysteme „AUS 02-V-Ring/RWDR“ haben eine Spalthöhe von 1,5 mm.

5.1.4 Dichtsysteme mit Fettabfluss

Die Dichtsysteme „ECO 01“ bis „ECO 05“ entstanden aus dem Dichtsystem „EIN 01“. Es wurde nach einer Dichtspaltgeometrie gesucht, die vollen Schutz vor Verschmutzung bieten kann und gleichzeitig zeitgemäßen Anforderung, wie die vorschriftsmäßige Entsorgung von Altschmierstoffen ermöglichen und die Vermeidung des Eintrags toxischer Stoffe in die Umwelt, gerecht werden kann. In Bild 45 bis Bild 49 sind die Dichtsysteme zu sehen.

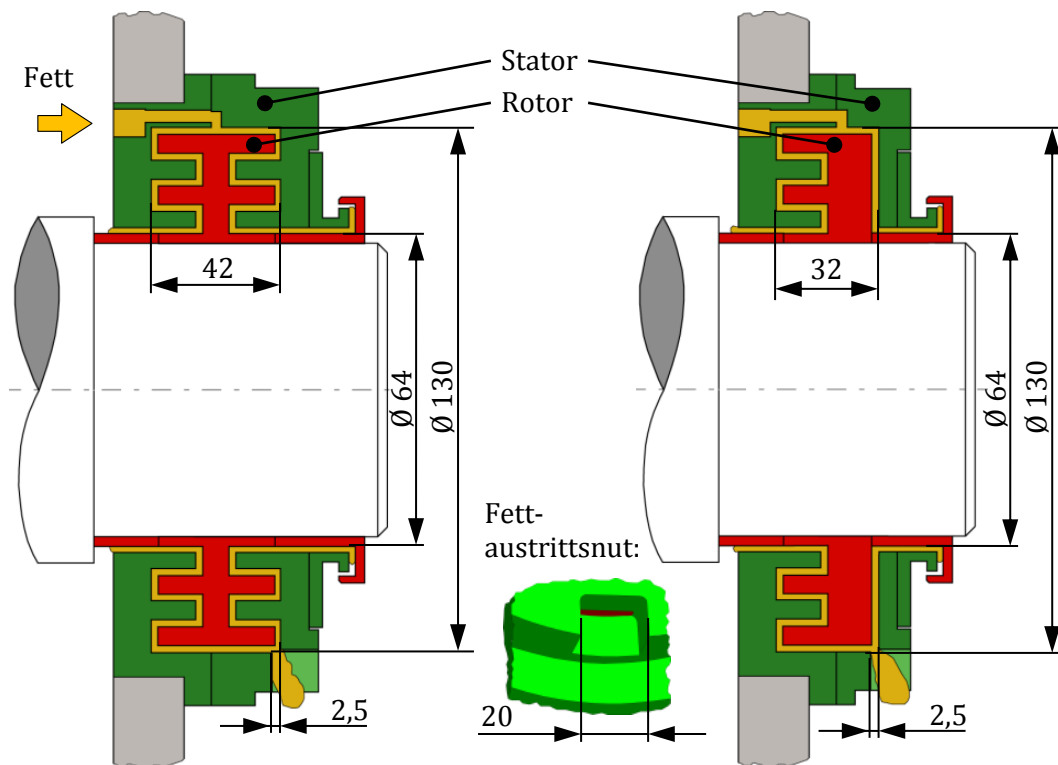


Bild 45: Dichtsystem ECO 01

Bild 46: Dichtsystem ECO 02

Die Dichtsysteme ECO 01 und ECO 02 haben beide eine Fettablaufnut. Bei Dichtsystem ECO 01 soll der linke Teil der Axialspaltgeometrie den Schutz vor Verschmutzung übernehmen. Der rechte Teil

hat die Aufgabe, den Fettaustritt am abgedeckten Spalteingang (ganz rechts) zu minimieren und überschüssiges Fett über die Fettabführnut aus dem Dichtsystem zu „entsorgen“. Altfett kann so mittels einer geschlossenen Box an der Fettaustrittsnut gezielt aufgefangen werden und richtet keinen Schaden z. B. an Riementrieben durch abgeschleuderte Fettklumpen an. Bei ECO 02 ist der rechte Teil bauraumoptimiert ausgeführt. Die Fettzufuhr erfolgte bei allen ECO-Dichtsystemen gegenüber der Fettabführung, die im unteren Teil angeordnet war.

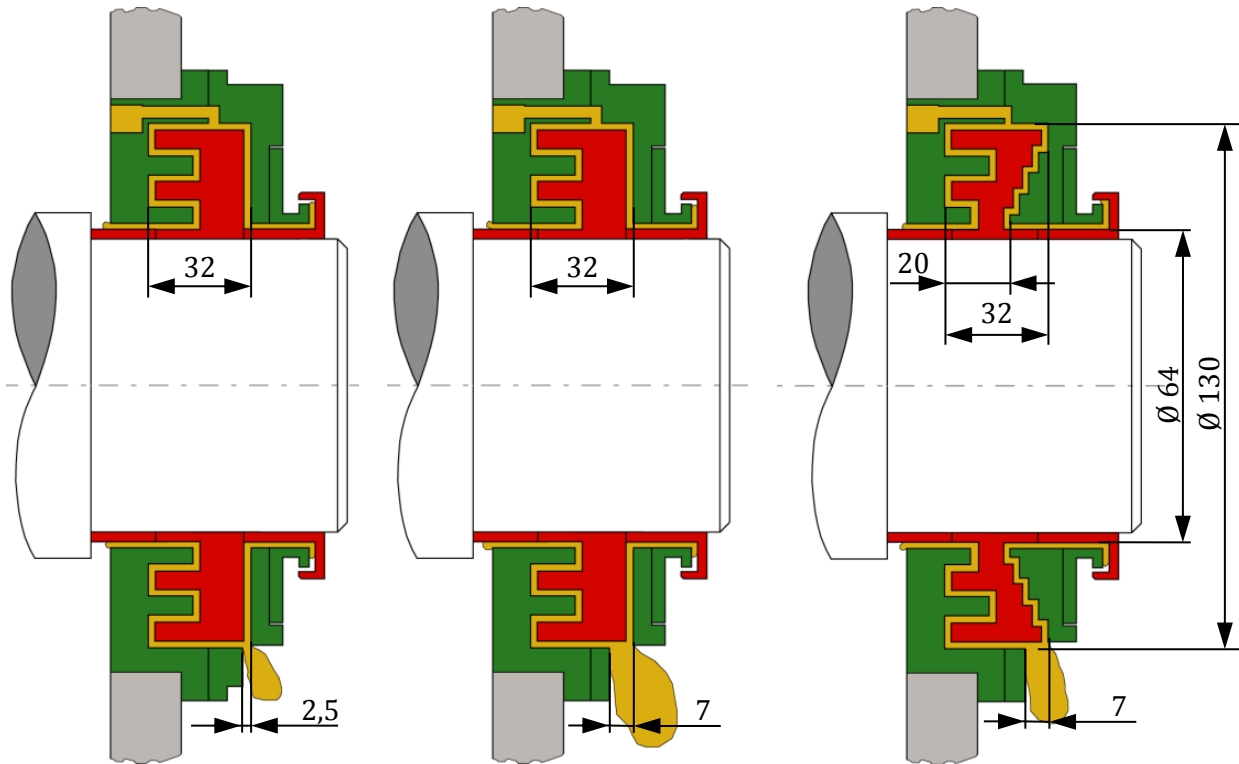


Bild 47: Dichtsystem ECO 03

Bild 48: Dichtsystem ECO 04

Bild 49: Dichtsystem ECO 05

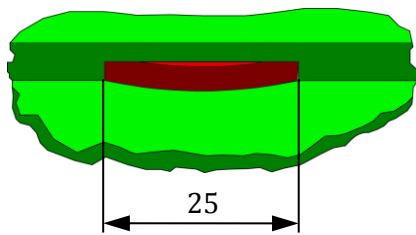


Bild 50: Fettabführöffnung Dichtsysteme ECO 03 und ECO 04

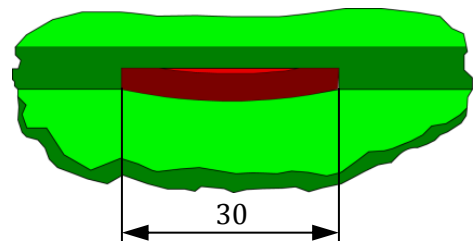


Bild 51: Fettabführöffnung Dichtsystem ECO 05

Die gestufte Geometrie des Dichtsystems ECO 05 soll ein Austreten von Altfett aus dem Dichtspalt gegenüber den Dichtspaltgeometrien ECO 01 bis ECO 04 weiter reduzieren. Die Fettabführöffnungen der Dichtsysteme ECO 03 bis ECO 05 sind in Bild 50 und Bild 51 dargestellt.

5.2 Schmierfette

Die Wahl der Schmierfette hat auf deren Verhalten in den Spalten von berührungsfreien Wellendichtsystemen einen sehr großen Einfluss. Aus diesem Grund wurde die Auswahl der zu untersuchenden Fette gemeinsam mit Lager- und Fettherstellern sowie auf Basis der am Institut für Maschinenelemente vorliegenden Erfahrungen (19), (23) getroffen.

5.2.1 Definition, Aufbau, Einteilung und Rheologie von Fetten

5.2.1.1 Definition

Vereinfachte Definition:

Schmierfette sind durch Dickungsmittel am Wegfließen gehinderte Schmieröle (24).

Definition nach DIN 51 528:

Schmierfette sind konsistente Schmierstoffe, die aus Mineralöl oder Syntheseöl sowie einem Dickungsmittel bestehen (25).

5.2.1.2 Aufbau von Schmierfetten

Die Grundflüssigkeit bildet mit etwa 70 bis 95 Gew.-% mengenmäßig den Hauptbestandteil des Fettes. Der Eindicker ist nicht oder nur sehr begrenzt in der Grundflüssigkeit löslich, so dass eine Dispersion fester Teilchen in einem flüssigen Dispergens vorliegt (24). Darüber hinaus kann Fett noch in der Grundflüssigkeit lösliche Zusätze oder Festschmierstoffpartikel enthalten. Nach W. J. Bartz erfolgt die Klassifizierung von Schmierfetten häufig nach drei Gesichtspunkten (24):

- Nach der Zusammensetzung, wobei meistens nur der Eindicker und bei Seifenfetten dessen Kation genannt wird, z. B. Lithiumfett.
- Nach bestimmten Eigenschaften des Schmierfetts, z. B. Fließfett, Hochtemperaturfett, usw.
- Nach dem Anwendungsgebiet des Schmierfetts, z. B. Getriebefett usw.

Die konventionellen Fette sind die Seifenfette. Man spricht von gemischtverseiften Fetten, wenn zwei Seifen unterschiedlicher Metallbasis und von Komplexseifenfetten, wenn zur Herstellung der Seife zwei verschiedene Fettsäuren verwendet werden. Gelfette sind dadurch gekennzeichnet, dass sie als feste Phase keine Seife, sondern ein Gel oder Bentonit enthalten. Bei Synthesefetten werden anstelle des Mineralöls als flüssige Phase eine synthetische Flüssigkeit eingesetzt (24). In Bild 52 ist der Aufbau der Schmierfetttypen dargestellt:

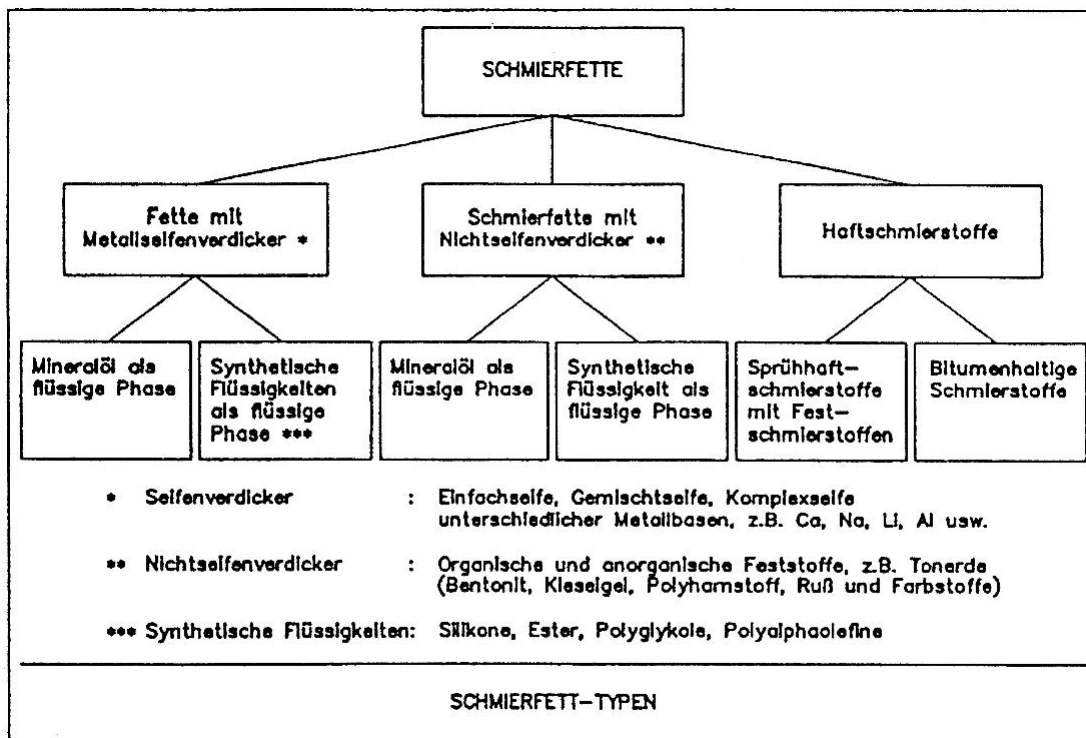


Bild 52: Schmierfett Typen (24)

Eindicker:

Der Eindicker bindet das Grundöl und hindert dieses am Weglaufen. Je größer die Oberfläche des Eindickers ist, desto mehr Öl kann dieser im Prinzip binden. Hierbei handelt es sich nicht um chemische Bindungen, sondern es sind vorwiegend unterschiedliche physikalische Kräfte, die zu Nebenvalenzbindungen führen. Daneben wird ein Teil des Schmieröls von den Poren der Eindicker aufgenommen und so rein mechanisch immobilisiert (24). Für die Oberflächen der Eindicker sind die Faserabmessungen von Bedeutung. In Bild 53 sind die Geometriedaten einiger wichtiger Eindicker aufgeführt.

Eindicker	Länge µm	Durchmesser µm
Natronseife langfaserig	100	1
Lithiumseife mittellang	25	0,2
Lithiumseife kurzfasrig	2	0,2
Natronseife kurzfasrig	1,5	0,15
Kalkseife	1	0,1
Aluminiumseife		0,1
Bentonit organophil	0,5 (Kantenl.)	0,1 (Dicke)

Bild 53: Abmessungen von einigen Eindickern (24)

Nach Bartz können die Längen der Fasern recht groß sein, sie sind aber beim Einsatz nicht stabil und werden recht schnell durch Scherung und andere mechanische Beanspruchungen zerkleinert. Dadurch kann sich der Fließwiderstand des Fettes verändern. Wird er kleiner, spricht man von Thixotropie. Wird er größer, so wird dieses Phänomen Rheopexie genannt.

In Bild 54 ist eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Mizellen eines Lithiumfettes zu sehen.

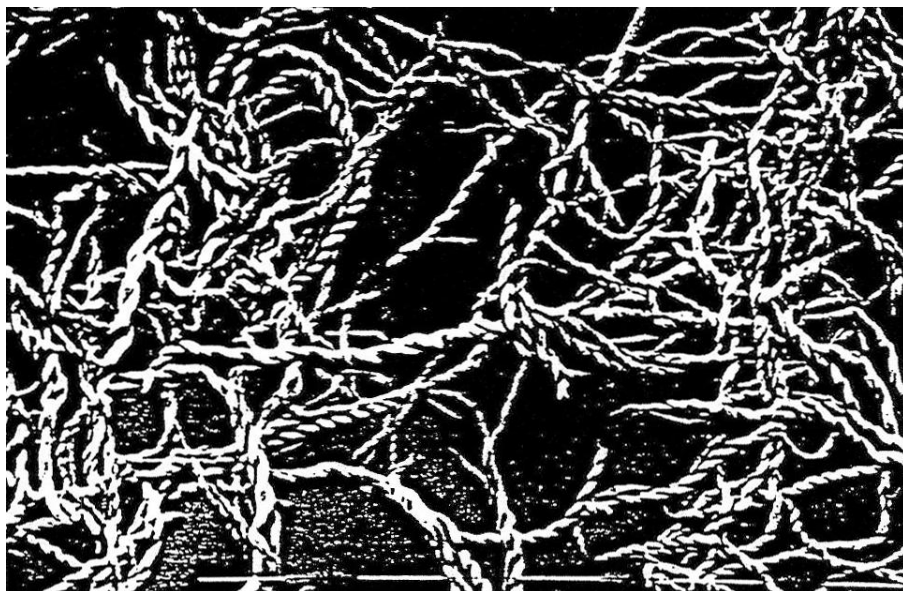


Bild 54: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Mizellen eines Lithiumfettes (24)

Grundöl:

Die Grundöle stellen die Hauptkomponentengruppe und Trägersubstanz der Schmierfette und bestimmen als solche maßgeblich deren Gebrauchseigenschaften. Die Grundölviskosität von Schmierfetten ist ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des geeigneten Produkts für den jeweiligen Anwendungsfall. Grundsätzlich werden bei hohen Drehzahlen/ niedrigen Belastungen/ tiefen Tempe-

raturen Grundöle geringer Viskosität und bei niederen Drehzahlen/ großen Belastungen/ hohen Temperaturen Grundöle höherer Viskosität eingesetzt.

5.2.1.3 Einteilung nach der Konsistenz

Die Konsistenz von Schmierfetten wird durch die Penetration gekennzeichnet. Gemessen wird die in 5 Sekunden erreichte Eindringtiefe in 0,1 mm Schritten eines genormten Prüfkegels unter seinem Eigengewicht in eine definierte Schmierfettmenge (24). Da Schmierfette ihre Konsistenz mit der Ruhezeit verändern, werden sie vor der Konsistenzprüfung im Schmierfettknetter durch 60 Doppelhübe definiert vorgewalkt. In DIN 51 818 ist die Penetration NLGI-Klassen von 000 bis 6 zugeordnet. Bild 55 zeigt die Konsistenzenteilung nach DIN 51 818 mit einer groben Zuordnung der Schmierfettanwendungsgebiete.

NLGI-Klasse (DIN 51 818)	Walkpenetration in Einheiten (Zehntelmillimeter)	Allgemeine Konsistenz- beurteilung	Anwendungs- gebiete
000	445 bis 475	fließend	GE, Z
00	400 bis 430	schwach fließfähig	GE, Z
0	355 bis 385	halbflüssig	GE, Z
1	310 bis 340	sehr weich	GE, WL, GL, Z
2	265 bis 295	weich	WL, GL, Z
3	220 bis 250	mittelfest	WL, GL
4	175 bis 205	fest	WL, WP
5	130 bis 160	sehr fest	WP
6	85 bis 115	hart	GL

GL = Gleitlagerschmierung
 WL = Wälzlager-, Radlagerschmierung
 WP = Wasserpumpenschmierung
 GE = Getriebeschmierung
 Z = geeignet für Zentralschmieranlagen

Bild 55: Konsistenzklassen von Schmierfetten (24)

5.2.1.4 Rheologie von Schmierfetten

Die Rheologie umfasst ein Teilbereich der Physik und beschreibt das nicht-ideale Verhalten eines Körpers bei mechanischer Beanspruchung durch nicht in alle Richtungen gleich wirkende Kräfte. Dies hat eine reversible (elastische) oder irreversible (viskose) Verformung des Körpers zur Folge. Die Art der Verformung hängt hierbei von der Intensität der einwirkenden Kraft ab. Bei strukturierten Systemen spielt ggf. auch die Einwirkzeit eine Rolle. (26)

Dynamische Viskosität:

Werden Fluide einer Formänderung unterzogen, so zeigen diese dabei einen gewissen Widerstand. Die bei der Verformung auftretenden unterschiedlichen Wechselwirkungen in der molekularen Struktur des Fluids sind die Ursache hierfür und können als eine Art innere Reibung betrachtet werden. (26)

Wird die „bewegte Platte“ am Dichtspalt mit konstanter Geschwindigkeit verschoben (vgl. Bild 56), so ruft die Tangentialkraft F_t an der Fläche A eine Scherspannung τ_{xy} hervor. Dies hat eine Scherströmung, mit der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ zur Folge. Diese wird auch als Couette-Strömung bezeichnet. (26)

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \tag{1}$$

In der Literatur sind für die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ auch die Begriffe Geschwindigkeitsgradient, Geschwindigkeitsgefälle und Schergefälle gebräuchlich.

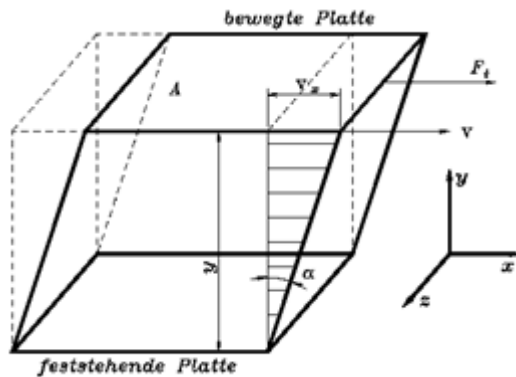


Bild 56: Einfache Scherverformung eines viskosen Körpers (27)

Die Tangentialkraft F_t ist proportional zur Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ und zur Fläche A (26).

$$F_t = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

Die in dieser Gleichung eingeführte Stoffkonstante η wird dynamische Viskosität genannt. Ihre Einheit ist Pa s.

Newtonsches Fließverhalten:

Als newtonsches Fließverhalten wird das ideale Fließverhalten aus der Physik bezeichnet. Hier wird die Viskosität η als Stoffkonstante betrachtet. Dies ist die einfachste Form, wie das Fließverhalten von Fluiden beschrieben werden kann. Die Viskosität wird bei Fluiden, die dieser Gesetzmäßigkeit entsprechen nicht durch die Höhe und den zeitlichen Verlauf von Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ verändert. (26)

In der Literatur werden sie daher als „newtonsche“ Flüssigkeiten bezeichnet.

Der newtonsche Schubspannungsansatz lautet:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

Nicht Newtonsches Fließverhalten:

Entsprechen Fluide in ihrem Fließverhalten dem newtonschen Schubspannungsansatz nicht, werden sie „nicht-newtonsche“ Flüssigkeiten genannt. Insbesondere hochmolekulare Flüssigkeiten, Lösungen und disperse Fluide weichen vom idealviskosen newtonschen Fließverhalten durch ihre Struktur auf Mikroebene ab. (26)

Der Ansatz, in der die Viskosität als konstanter Stoffkennwert als Maß für die innere Reibung eines Fluids angesehen werden kann und nur von Druck und Temperatur abhängig ist, gilt hier nicht mehr.

Bei Fetten kann die Viskosität η von folgenden Parametern abhängig sein (24):

$$\eta = f(T, \dot{\gamma}, t, p)$$

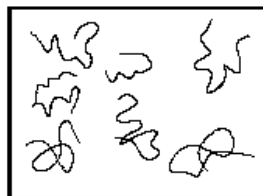
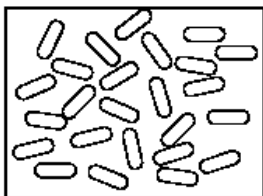
- „T“ Durch T wird die Temperatur T des Mediums beschrieben. Die Viskosität ist stark temperaturabhängig
- „ $\dot{\gamma}$ “ Die Viskosität wird bei vielen Flüssigkeiten durch die „Schergeschwindigkeit“ $\dot{\gamma}$ beeinflusst. Eine Erhöhung der Schergeschwindigkeit kann sowohl eine Ab- oder Zunahme der Viskosität bewirken.
- „t“ Der Parameter steht für die „Zeit“ t und beschreibt den Effekt, das die Behandlungsdauer oder die Ruhezeit eines Fluids die Viskosität verändert.
- „p“ Der Parameter „Druck“ p führt allgemein bei hohen Drücken zu deutlich erkennbaren Viskositätsänderungen. Er spielt bei der normalen Viskosimetrie bei Atmosphärendruck im Allgemeinen keine Rolle.

Soll nun das Fließverhalten von Fetten beschrieben werden, kann zunächst die Temperatur, die Zeitdauer und der Druck als konstant angesehen werden. Die Viskosität, hier also eine nicht newtonsche Stoffgröße, ist eine von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ abhängige Größe. Das für die Definition der newtonschen Viskosität benutzte Verhältnis von Scherspannung τ und Geschwindigkeitsgradient $\dot{\gamma}$ liefert bei nicht-newtonschen Flüssigkeiten eine Viskositätsfunktion, die als effektive oder scheinbare Viskosität bezeichnet wird. (26)

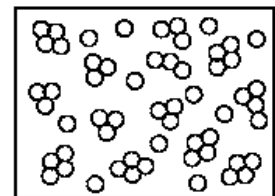
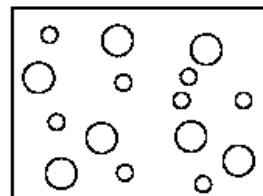
$$\eta_{\text{eff}}(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{4}$$

Mögliche Ursachen für das Auftreten von nicht-newtonschem Verhalten bzw. der Strukturviskosität dieser Fluide wird in Bild 57 dargestellt.

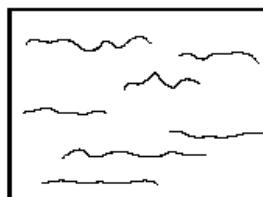
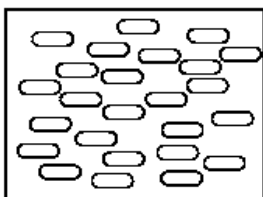
1. Flüssigkeit in Ruhezustand



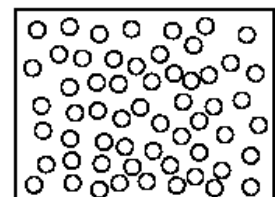
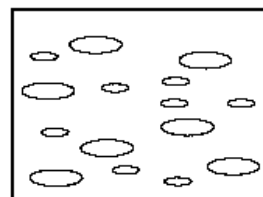
1. Dispersion in Ruhezustand



2. Flüssigkeit unter Scherbeanspruchung



2. Dispersion unter Scherbeanspruchung



Orientierung

Streckung

Deformation der Aggregate

Disaggregation

Bild 57: Ursachen für strukturviskoses Verhalten von Dispersionen (28)

An dieser Stelle sind in der Literatur zweierlei sich widersprechende Modellvorstellungen für das Verhalten von langgestreckten Strukturgebilden in Strömungen gebräuchlich: Das bei Schramm G. (28) dargestellte Verhalten (Bild 57), dass sich langgestreckte Fasern strömungsparallel ausrichten wird von anderen Autoren wie bei Barz, W. J. (24) angezweifelt:

Reibungsbehaftete Strömungen seien nicht drehungsfrei (Bild 58) also führten darin enthaltene Teilchen bei Scherung der Flüssigkeit oder des Fettes eine Dreh- bzw. Rollbewegung aus, wenn sie sich in Strömungsrichtung bewegten. In Bild 58 ist die Beanspruchung für Kugelförmige Teilchen in einer Strömung dargestellt. Für andere geometrische Formen gelte diese Betrachtung sinngemäß.

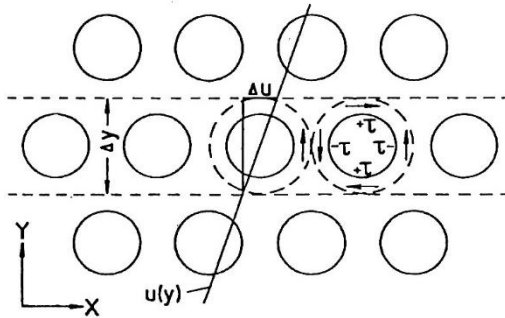
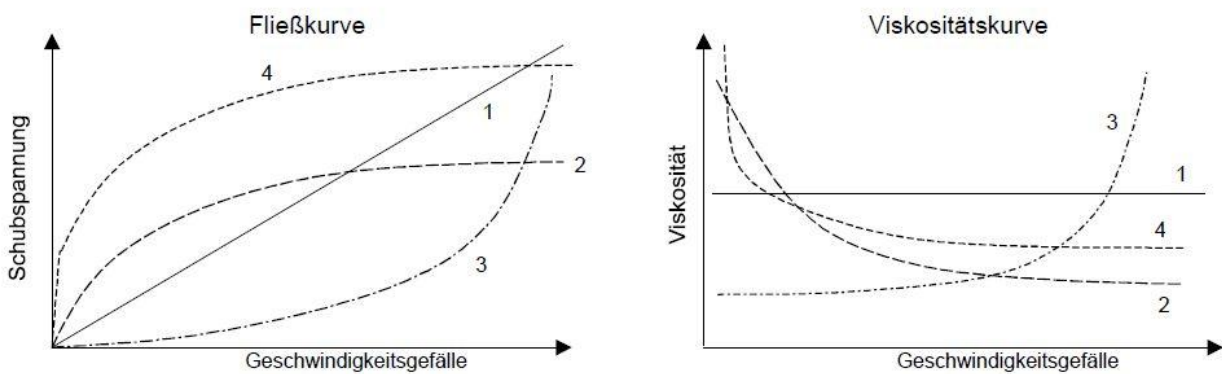


Bild 58: Drehung von Festkörperteilchen in einer Flüssigkeit (24)

Die Fließ- und Viskositätskurven von gängigen nicht-newtonschen Flüssigkeiten (Kurven 2, 3 und 4) zeigt Bild 59 im Vergleich zur newtonschen Flüssigkeit (Kurve 1). Schmierfette besitzen oft eine Fließgrenze und entsprechen somit der 4. Kurve.



- | | |
|--------------------------|---|
| 1 Newtonsche Flüssigkeit | 2 Strukturviskose Flüssigkeit |
| 3 Dilatante Flüssigkeit | 4 Strukturviskose Flüssigkeit mit Fließgrenze (plastisches Fluid) |

Bild 59: Fließ- und Viskositätskurven (26)

5.2.2 Versuchsfette

5.2.2.1 Fett A: Klüberbio M 72-82

Hier handelt es sich um ein biologisch schnell abbaubares Spezialfett für die Schmierung von Wälz- und Gleitlagern bei denen eine Kontamination der Umgebung nicht ausgeschlossen werden kann. Weitere Anwendungen sind, Ketten, Seile, Zahnstangen usw. In Bild 60 und Tabelle 1 sind die wichtigsten technologischen Eigenschaften dieses Fettes aufgeführt.

Tabelle 1: Produktkenndaten Fett A (29)



Bild 60: Produktkenndaten Fett A

Farbe	Hellbraun
Konsistenzklasse	2 (NLGI)
Walk-Penetration	265-295
Fließgrenze	641-1165 N/m ²
Verdicker	Polyharnstoff
Grundöl	Esteröl
Grundölvisk. bei 40 °C	100 mm ² /s
Grundölvisk. bei 100 °C	28 mm ² /s
Dichte bei 20 °C	0,93 g/cm ³
Temperaturbereich	-40 °C bis 140 °C
Tropfpunkt	>220 °C

Für die optische Betrachtung ist dieses Fett gut geeignet. Besonderheiten waren hier, dass es sich um ein biologisch abbaubares Fett mit Polyharnstoffverdicker und einem Esteröl als Grundöl handelte.

5.2.2.2 Fett B: SKF LGEP 2

Fett B ist laut Hersteller ein Hochdruck-Hochtemperatur-Schmierfett für Wälzlager. In Tabelle 2 und Bild 61 sind die wichtigsten technologischen Eigenschaften dieses Fettes aufgeführt

Tabelle 2: Produktkenndaten Fett B (30)



Bild 61: Produktkenndaten Fett B

Farbe	Hellbraun
Konsistenzklasse	2 (NLGI)
Walk-Penetration	265-295
Fließgrenze	641-1165 N/m ²
Verdicker	Lithiumseife
Grundöl	Mineralöl
Grundölvisk. bei 40 °C	100 mm ² /s
Grundölvisk. bei 100 °C	16 mm ² /s
Dichte bei 20 °C	
Temperaturbereich	-20 °C bis 110 °C
Tropfpunkt	>180 °C

Auch Fett B eignete sich aufgrund seiner klaren Farbe gut für die optische Beobachtung mit Hinterleuchtung. Fett B ist das einzige Versuchsfett mit einer Lithiumseife als Verdicker. Trotz der Herstellerangabe, dass es sich hier um ein Hochtemperatur-Fett handelt, hat Fett B den niedrigsten Tropfpunkt. Allgemein sind Fette mit Polyharnstoff- und Calciumseifenverdickern temperaturfester als solche mit Lithiumseifenverdickern.

5.2.2.3 Fett C: Klüber ISOFLEX TOPAS NCA 5051

Fett C ist ein synthetisches Langzeitfett mit weitem Gebrauchstemperaturbereich und niedriger Konsistenz. In Bild 62 und Tabelle 3 sind die wichtigsten technologischen Eigenschaften aufgeführt. Allgemein wird Fett C aufgrund seiner niedrigen Konsistenz als Fließfett in Getrieben eingesetzt. Fett C hat von allen verwendeten Fetten die mit Abstand niedrigste Konsistenz. Aufgrund seines trüben Farbtones war Fett C nicht ganz so gut für eine optische Beobachtung mit Hinterleuchtung geeignet, dafür ergab sich bei Farbeinspritzung ein besserer Kontrast.

Tabelle 3: Produktkenndaten Fett C (31)



Bild 62: Produktkenndaten Fett C

Farbe	Weiss-beige
Konsistenzklasse	0/00 (NLGI)
Walk-Penetration	385-415
Fließgrenze	145-100 N/m ²
Verdicker	Calciumseife
Grundöl	synth. KW-Öl
Grundölvisk. bei 40 °C	30 mm ² /s
Grundölvisk. bei 100 °C	6 mm ² /s
Dichte bei 20 °C	0,8 g/cm ³
Temperaturbereich	-50 °C bis 140 °C
Tropfpunkt	>180 °C

5.2.2.4 Fett D: Klüberplex BEM 34-132

Fett D ist ein Spezialschmierfett für Wälzlager und Linearführungen. In Tabelle 4 und Bild 63 sind seine wichtigsten technologischen Eigenschaften aufgeführt.

Tabelle 4: Produktkenndaten Fett D (32)



Bild 63: Produktkenndaten Fett D

Farbe	Hellbeige
Konsistenzklasse	2 (NLGI)
Walk-Penetration	265-295
Fließgrenze	641-1165 N/m ²
Verdicker	Calciumseife
Grundöl	synth. + Min. öl
Grundölvisk. bei 40 °C	130 mm ² /s
Grundölvisk. bei 100 °C	15,5 mm ² /s
Dichte bei 20 °C	0,9 g/cm ³
Temperaturbereich	-35 °C bis 140 °C
Tropfpunkt	>220 °C

Fett D besitzt ebenso wie Fett C einen Calciumseifenverdicker. Zur Beobachtung mit Hinterleuchtung war dieses Fett ebenso geeignet wie Fett C.

5.2.2.5 Fett E: Petamo GHY 133 N

Fett E ist ein Langzeit- und Hochtemperaturschmierfett für Wälzlager. In Bild 64 und Tabelle 5 sind die wichtigsten technologischen Eigenschaften dieses Fettes aufgeführt.

Fett E besitzt wie Fett A einen Polyharnstoffverdicker, allerdings ein grundsätzlich anderes Grundöl. Aufgrund seiner klaren durchsichtigen Farbe eignete sich Fett E hervorragend zur Beobachtung bei Hinterleuchtung.

Tabelle 5: Produktkenndaten Fett E (33)**Bild 64: Produktkenndaten Fett E**

Farbe	Hellbraun
Konsistenzklasse	2 (NLGI)
Walk-Penetration	265-295
Fließgrenze	641-1165 N/m ²
Verdicker	Polyharnstoff
Grundöl	synth. + Min. öl
Grundölvisk. bei 40 °C	160 mm ² /s
Grundölvisk. bei 100 °C	18 mm ² /s
Dichte bei 20 °C	0,9 g/cm ³
Temperaturbereich	-30 °C bis 160 °C
Tropfpunkt	>250 °C

5.2.2.6 Fett F: Klüber ISOFLEX TOPAS NCA 51

Fett F ist ein synthetisches Tieftemperatur- und Langzeitfett, das sich besonders gut zur Kleingetriebschmierung eignet. In Tabelle 6 und Bild 65 sind die wichtigsten technologischen Eigenschaften dieses Fettes aufgeführt.

Tabelle 6: Produktkenndaten Fett F (34)**Bild 65: Produktkenndaten Fett F**

Farbe	Beige
Konsistenzklasse	1 (NLGI)
Walk-Penetration	310-340
Fließgrenze	486-290 N/m ²
Verdicker	Calciumseife
Grundöl	synth. KW-Öl
Grundölvisk. bei 40 °C	30 mm ² /s
Grundölvisk. bei 100 °C	6 mm ² /s
Dichte bei 20 °C	0,87 g/cm ³
Temperaturbereich	-60 °C bis 140 °C
Tropfpunkt	>180 °C

Wie Fett C besitzt Fett F eine Calciumseife als Verdicker sowie ein synthetisches Öl als Grundöl mit sogar gleicher Viskosität wie Fett C. Die Konsistenz von Fett F ist um eineinhalb Klassen höher, als die von Fett C.

5.3 Weitere eingesetzte Untersuchungsmaterialien

5.3.1 Prüfstaub

Der verwendete Staub besteht aus Messingpulver mit einer Partikelgröße < 100 µm. Diese Partikelform und Größe kommt in der Trockenbearbeitung bei Werkzeugmaschinen vor. Er zeichnet sich besonders durch seine gut sichtbare gelbe Farbe aus. Hieraus resultiert eine sehr gute Nachweisbarkeit im Fett. Mit diesem Staub wurden am Institut für Maschinenelemente bereits die ganzen Berührungsfreien Wellendichtsysteme mit Sperrluft entwickelt. Für die Handhabung des Prozessstaubes gibt es somit bereits ein breites Erfahrungswissen.

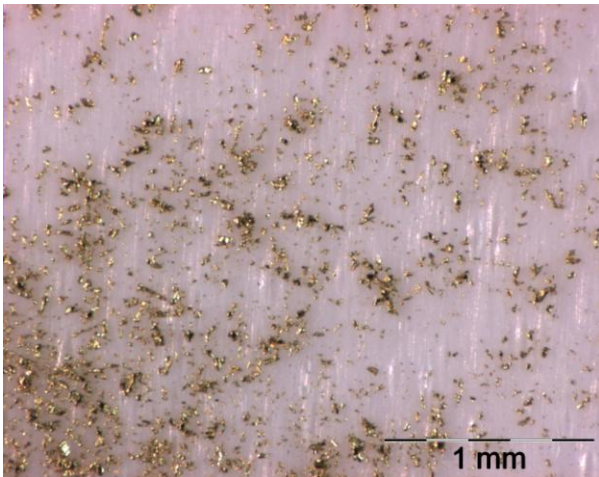


Bild 66: Mikroskopaufnahme der Messingpartikel

Auf Bild 66 sind Staubpartikel dargestellt. Bild 67 zeigt die Größenverteilung des Prüfstaubes.

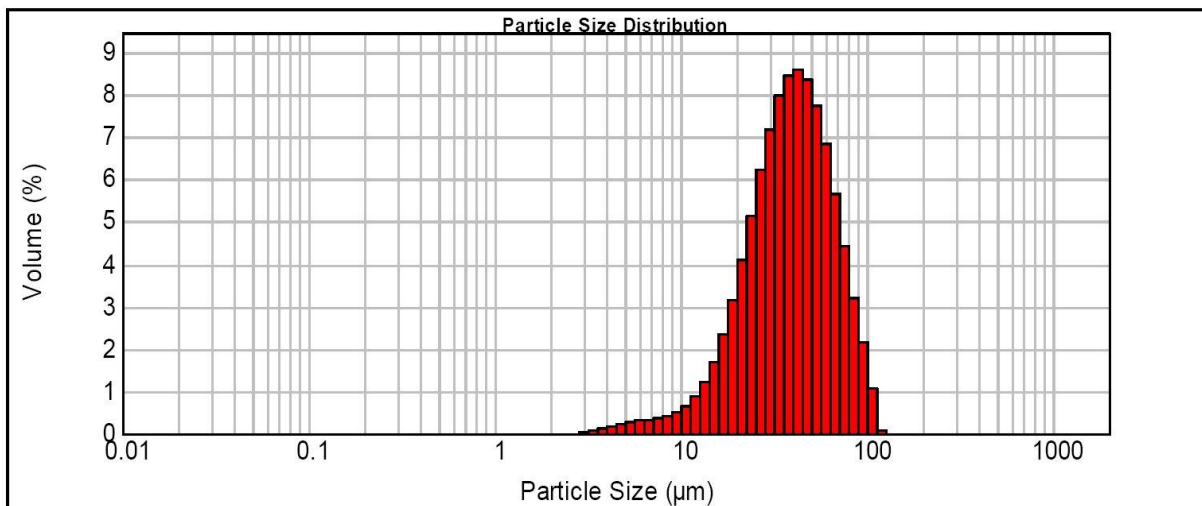


Bild 67: Korngrößenverteilung des Prüfstaubes

5.3.2 Prüfsand

Als weiteres trockenes Verschmutzungsmedium wurde feiner Quarzsand gewählt. Die Korngrößen betragen hier zwischen 100 µm und 1000 µm. Bild 68 zeigt eine Mikroskopaufnahme des Sandes.

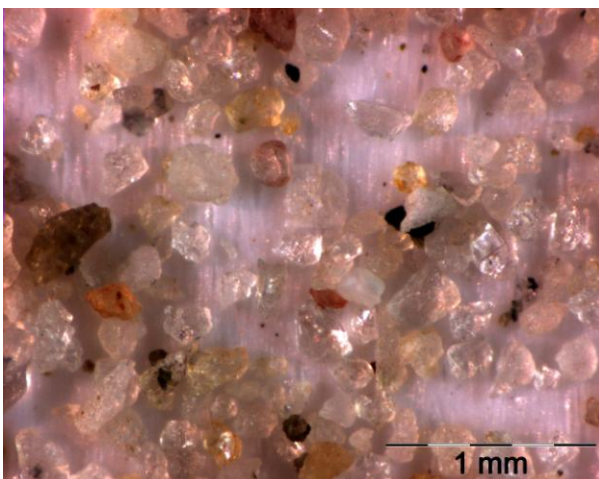


Bild 68: Mikroskopaufnahme des Prüfsandes

Aus Bild 69 ist die Korngrößenverteilung des Sandes ersichtlich.

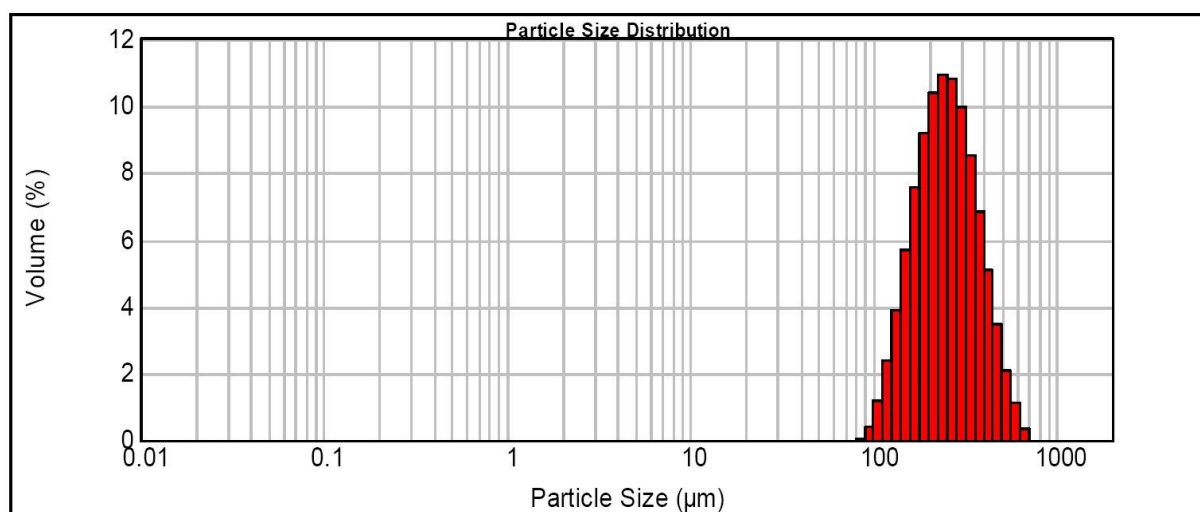


Bild 69: Korngrößenverteilung des Prüfsandes

Neben dem Eindringverhalten von Körnern dieser Größe in den Dichtspalt waren hier die sich ergebenden Wechselwirkungen zwischen Partikeln und dem Dichtsystem bei einer Annäherung der Korngröße an die Dichtspalthöhe von besonderem Interesse.

5.3.3 Bespritzungsfluid

Als Bespritzungsfluid wurde Wasser ausgewählt. Wasser ist ein häufig vorkommendes Verschmutzungsmedium bei allen Abdichtstellen, die der Witterung ausgesetzt sind und dessen Verhalten im Dichtspalt daher von größter Bedeutung. Darüber hinaus ist Wasser in den meisten Fetten unlöslich.

5.3.4 Versuchsschlamm

Für die Untersuchung von Schlamm als Verschmutzungsmedium wurden die beiden Phasen des Schlamms getrennt auf das Dichtsystem in der auch für die Staubversuche verwendeten Verschmutzungskammer aufgebracht. Die flüssige Phase bestand aus Wasser und die feste Phase aus Sand.

5.3.5 Farbe zur Fetteinfärbung

Für die Visualisierung der Strömung im Fett wurde eingefärbtes Fett verwendet, welches durch eine separate Bohrung während der Versuchsmessung eingespritzt wurde. Zum Einfärben der verschiedenen Fette wurde der Antrachinofarbstoff Sudan-Blau 672 der BASF AG verwendet. Dieser Farbstoff ist löslich in Kohlenwasserstoffen, Ölen, Fetten und Wachsen, allerdings nicht in Wasser oder Alkohol. Somit ist er für die Einfärbung von Schmierfetten bestens geeignet. Da auch rotstichige Fette untersucht wurden, wurde auf Sudan-Blau zurückgegriffen und nicht auf den ebenfalls fettmischbaren Farbstoff Sudan-Rot.

6 Untersuchungsmethodik

In diesem Kapitel werden die Methoden und Vorgehensweisen der durchgeführten Untersuchungen beschrieben.

6.1 Untersuchungen an Standard-Dichtspaltgeometrien

In einer ersten Untersuchungsphase wurde das grundlegende Verhalten von Fett in Standard-Dichtspalten untersucht. Hierfür wurden die sechs Versuchsfette, die Fette A bis F (Kap.5.2.2), in den für die systematische Untersuchung entworfenen Axial- und Radialspalt-Dichtsystembaukästen (Kap. 5.1.1 und Kap. 5.1.2) eingesetzt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden dann alle weiteren Untersuchungen der vorliegenden Arbeit vorgenommen.

6.1.1 Versuchsaufbau Standard-Dichtspaltversuche

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden alle am Prüfstand BFWD III durchgeführt, dieser ist in Kapitel 4.1.2 beschrieben. Die genauen Dichtsystemkonfigurationen, der vorgestellten Versuchsergebnisse, werden in Kapitel 6.1.3 aufgeführt. Die Versuchsfette wurden mit den Kleinmengen-Fördereinheiten (Kap. 4.2.4) in die Dichtsysteme eingebracht.

6.1.2 Versuchsablauf Standard-Dichtspaltversuche

In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass bei manchen Fett-Dichtspaltkombinationen der Fettspalt länger geschlossen bleibt und sich dieser dagegen bei anderen sehr schnell öffnet. Der Dichtspaltzustand wird über das sich bei Wellendrehung am Stator der Dichtung einstellende Moment bestimmt. Ist ein Moment vorhanden, so ist der Dichtspalt zumindest teilweise mit Fett gefüllt. Im Folgenden wird dieser Effekt als das Fetthaltevermögen eines Dichtsystems bzw. der Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes bezeichnet. Als Versuchsablauf haben sich für die Versuchsreihen, bei denen das Fetthaltevermögen untersucht werden soll, zwei Versuchsabläufe als sinnvoll und zeitlich machbar herauskristallisiert. Dies sind Kurzzeitversuche mit einer Dauer von 600 s und Langzeitversuche mit einer nicht festgelegten Gesamtversuchszeit, aber mit einem vorgegebenen Ablauf. Bei beiden Versuchstypen werden die Drehzahl, die Temperatur und das durch das Dichtsystem hervorgerufene Moment über der Zeit erfasst. Speicherintervall ist immer 1 s. Nachfolgend werden beide Versuchsabläufe vorgestellt.

6.1.2.1 Kurzzeitversuche:

Hier wird bei allen zu untersuchenden Drehzahlen der Dichtspalt vor dem eigentlichen Versuchsbeginn bei einer Drehzahl von 10 min^{-1} mittels der Kleinmengen-Fördereinheit mit Fett befüllt. Der Spalt ist befüllt, sobald sich an der Vorderseite ein geschlossener Fettkragen ausgebildet und sich das bei Probefüllungen ermittelte Anfangsmoment eingestellt hat. Jetzt wird die Untersuchungsdrehzahl schnellstmöglich durch die Prüfstandsteuerung angefahren und zugleich der Versuch mit einer Laufzeit von 600 s gestartet. Folgende Drehzahlen wurden untersucht: 10, 50, 100, 150, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 und 3000 min^{-1} . Wird das Moment während der Laufzeit beobachtet, kann sehr gut das Fetthaltevermögen einer Fett-Geometriekombination über das Drehzahlband beurteilt werden. Bei Ergebnissen mit einem sehr großen Fetthaltevermögen bei diesem Versuchszyklus wurden dann im Anschluss Langzeitversuche durchgeführt.

6.1.2.2 Langzeitversuche:

Langzeitversuche kamen bei Dichtspalt-Fettkombinationen mit stabilem Spaltzustand bei den Kurzzeitversuchen zur Anwendung. Hier werden Drehzahlstufen mit einer Rampenhöhe von 500 min^{-1} und einer Verweildauer von 5 s je Stufe im Bereich von -1990 und 2010 min^{-1} durchfahren. Start- und Befüll Drehzahl sind hier ebenfalls 10 min^{-1} . Bei diesem Versuch zeigte sich dann sehr schnell, ob eine Fett-Dichtspaltgeometriekombination ein Moment über ein großes Drehzahlspektrum mehrere Tage aufrecht halten kann.

6.1.3 Eingesetzte Untersuchungsmaterialien

Nachfolgend werden für jeden Dichtsystemtyp, dessen Versuchsergebnisse aufgeführt sind, die genauen Dichtspalt-Fettkombinationen vorgestellt.

6.1.3.1 Innenrotor-Dichtsysteme

Von allen durchgeführten Versuchen wurden hier nur die aussagekräftigen Ergebnisse zusammengetragen und detailliert beschrieben. Die nicht aufgeführten brachten keinen weiteren Informationszugewinn. Im Anschluss in Tabelle 7 und Bild 70 sind die Geometriedaten und die zugehörigen Fette der Dichtsysteme des Innenrotor-Dichtsystembaukastens dieser Versuchsauswahl aufgeführt.

Tabelle 7: Übersicht Dichtsystemvarianten Innenrotor-Dichtsystem

Dichtsystem	1	2	3	4	39	74	18	32
Lamellenanzahl	7	7	7	7	5	3	7	7
Durchmesser außen (da)	100	100	100	100	100	100	100	100
Durchmesser innen (di)	68	68	68	68	68	68	80	90
Systemhöhe radial (a)	16	16	16	16	16	16	10	5
Spalthöhe Radialspalte (b)	1	1	1	1	1	1	1	1
Spalthöhe Axialspalte (c)	2	1,5	1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Kurzzeitversuche (Fett)	F	F	F	A-F	C	C	C	C
Langzeitversuche (Fett)				C				

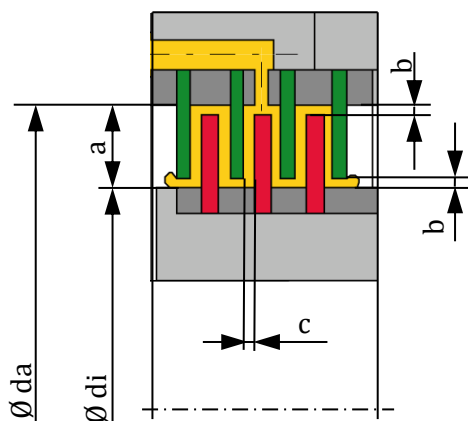


Bild 70: Übersicht Spaltweiten und Geometrievariationen beim Innenrotor-Dichtsystem

6.1.3.2 Außenrotor-Dichtsysteme

In diesem Untersuchungszyklus wurde an gezielt ausgewählten Fett- Dichtspaltkombinationen das Verhalten von Fett in Außenrotor-Dichtsystemen untersucht. Nachfolgend werden in Tabelle 8 und Bild 71 die relevanten Fett- Dichtspaltkombinationen vorgestellt.

Tabelle 8: Übersicht Dichtsystemvarianten Außenrotor-Dichtsystem

Dichtsystem	AU 1	AU 2	AU 3	AU 4	AU 22	AU 23	AU 24
Lamellenanzahl	5	5	5	5	3	3	3
Durchmesser außen	100	100	100	100	100	100	100
Durchmesser innen	68	68	68	68	68	68	68
Systemhöhe radial	16	16	16	16	16	16	16
Spalthöhe Radialspalte	1	1	1	1	1	1	1
Spalthöhe Axialspalte	2	1,5	1	0,75	1,5	1	0,75
Kurzzeitversuche (Fett)	A-F	A-F	A-F	A-F	A-F	A-F	A-F

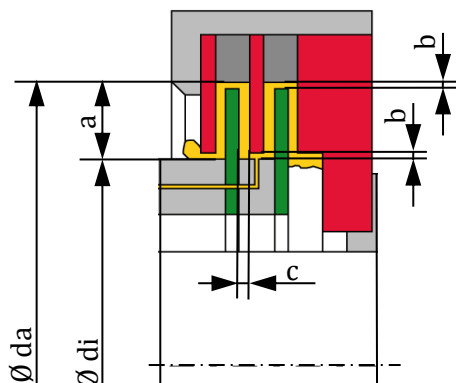


Bild 71: Übersicht Spaltweiten und Geometrievariationen beim Außenrotor-Dichtsystem

6.1.3.3 Axialspalt-Dichtsysteme EIN

In Tabelle 9 sind die Fett-Dichtsystemkombinationen der Axialspalt-Dichtsysteme mit einfördernder Geometrie, die im Rahmen der Fettverweildaueruntersuchungen zum Einsatz kamen, aufgeführt.

Tabelle 9: Übersicht Dichtsystemvarianten Axialspalt-Dichtsysteme einfördernd

Dichtsystem	EIN 01	EIN 02	EIN 03
Spalthöhe	2	1,5	0,75
Durchmesser außen (da)	130	110	87
Durchmesser innen (di)	64	64	64
Systembreite (b)	42	32	13
Kurzzeitversuche (Fett)	A+C	A+C	A+C

6.1.3.4 Axialspalt-Dichtsysteme AUS

In Tabelle 10 sind die Fett-Dichtsystemkombinationen der Axialspalt-Dichtsysteme mit ausfördernder Geometrie, die im Rahmen der Fettverweildaueruntersuchungen zum Einsatz kamen, aufgeführt.

Tabelle 10: Übersicht Dichtsystemvarianten Axialspalt-Dichtsysteme ausfördernd

Dichtsystem	AUS 01	AUS 02	AUS 03
Spalthöhe	2	1,5	0,75
Durchmesser außen (da)	130	130	130
Durchmesser innen (di)	64	83	106
Systembreite (b)	42	25	16
Kurzzeitversuche (Fett)	A+C	A+C	A+C

6.2 Untersuchung des Strömungsverhaltens von Fetten in Dichtspalten

Die Strömungsvorgänge in fettgefüllten Dichtspalten berührungsfreier Wellendichtsysteme sind oft chaotisch und somit bedürfen sie besonderer Analyse. Mit Hilfe von Plexiglasdichtsystemen und eingefärbtem Fett als Kontrastmittel wurde die Fettströmung sichtbar gemacht.

6.2.1 Versuchsaufbau Strömungsversuche

Die Versuche zur Untersuchung der Fettströmung im Dichtspalt wurden im Rahmen einer Studienarbeit (18), die vom Autor der vorliegenden Arbeit ausgeschrieben und betreut wurde, durchgeführt. Alle Versuche haben am Prüfstand BFWD I stattgefunden. Dieser ist in Kapitel 4.1.1 beschrieben.

ben. Das verwendete Dichtsystem wurde in Kapitel 5.1.1.3 vorgestellt. Für die Strömungsanalyse waren der Vergleich der Einzelversuche untereinander und die Möglichkeit zur nachträglichen Betrachtung von sehr großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde der in Bild 72 dargestellte Versuchsaufbau gewählt. Das Dichtsystem wurde einseitig hinterleuchtet und auf der Vorderseite mittels eines Camcorders während der Versuchsläufe gefilmt, gleichzeitig wurden das von der Dichtung hervorgerufene Moment, die Drehzahl und die Temperatur im Dichtspalt aufgezeichnet.

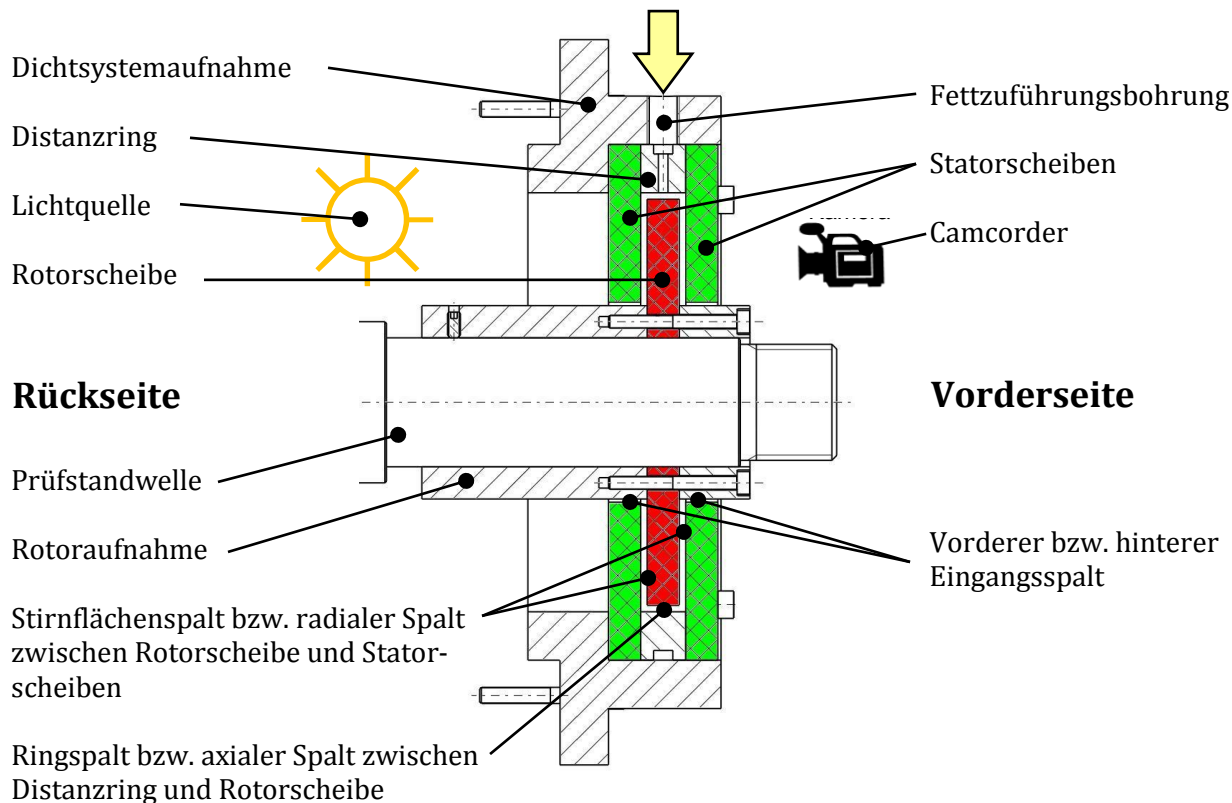


Bild 72: Bezeichnung Dichtsystem Strömungsversuche (18)

6.2.2 Versuchsablauf Strömungsversuche

Bei allen Versuchen wurde das Dichtsystem bei leichter Wellendrehung, die von Hand vorgenommen wurde, mit der Fettpresse (Kap. 4.2.5) befüllt. Der Start von Messprogramm und Videoaufzeichnung an der Vorderseite des Dichtsystems erfolgte direkt im Anschluss. Bei allen eingesetzten Fetten wurden die Drehzahlen 10, 50, 100, 250, 500 und 1000 min^{-1} untersucht. Um das Verhalten von Fett bestmöglich analysieren zu können, wurden die folgenden beiden Versuchszyklen durchgeführt:

- Untersuchung des Fließverhaltens der verschiedenen Fette im Dichtspalt durch die Visualisierung der Fettströmung mit Hilfe von eingefärbtem Fett.
- Untersuchung des Fließverhaltens der Fette B und C bei Staubverschmutzung durch die Visualisierung der Fettströmung mit Hilfe von eingefärbtem Fett.

Bei beiden Versuchszyklen wurde nach dem Start des Messprogramms und dem Erreichen der gewünschten Versuchsdrehzahl an der vorderen Statorscheibe durch eine Stufenbohrung gefärbtes Fett in das Dichtsystem eingebracht. Die Stufenbohrung befand sich auf mittlerem Durchmesser des Stirnflächenspaltes. Das gefärbte Fett wurde zuvor mit Farbstoff (Kapitel 5.3.5) gemischt. Die mit der Kleinmengenfettspritze (Kap. 4.2.6) eingebrachte farbige Fettmenge betrug 2 ml. Je nach Einspritzdruck konnte das farbige Fett in unterschiedliche Strömungsschichten appliziert werden. Während und nach dem Einspritzvorgang konnte dann der Strömungsverlauf bis zum vollständigen Durchmischen von gefärbtem und ungefärbtem Fett beobachtet werden. In Bild 73 und Bild 74 ist der Einspritzvorgang von gefärbtem Fett durch die vordere Statorscheibe dargestellt.

Abweichend vom ersten Zyklus wird beim zweiten Versuchszyklus mit der Fettpresse vor Versuchsbeginn das Dichtsystem mit verschmutztem Fett befüllt. Dem Fett wurden unterschiedliche Massenanteile an Messingpulver beigemischt, um das Verhalten des Fett-Staubgemisches im Dichtspalt beobachten zu können. Der Versuchsablauf war identisch wie zuvor beschrieben.

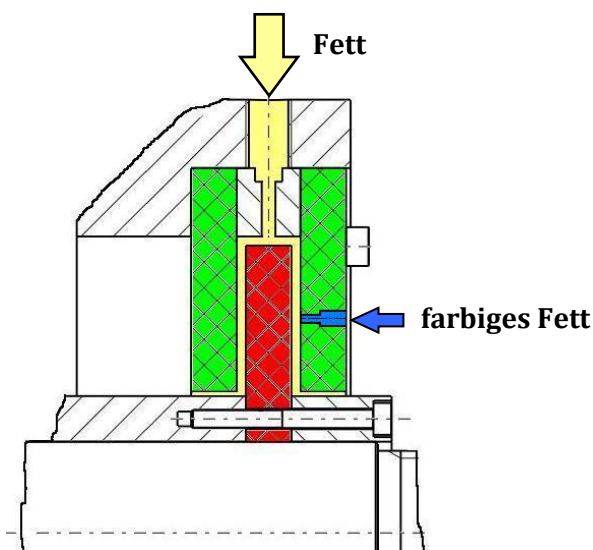


Bild 73: Einspritzvorgang (Schema) (18)



Bild 74: Einspritzvorgang (18)

6.2.3 Eingesetzte Untersuchungsmaterialien Strömungsversuche beider Zyklen

6.2.3.1 Dichtsystem

Das verwendete Dichtsystem ist in Kapitel 5.1.1.3 beschrieben.

6.2.3.2 Versuchsfette

Zyklus 1:

Für die Versuche im ersten Zyklus wurden die Fette A bis F eingesetzt (Kapitel 5.2.2).

Zyklus 2:

Die Fette B und C wurden im zweiten Versuchszyklus mit folgenden Massenverhältnissen an Staub untersucht:

Fett B wurden 50 und 75 Massenprozent Messingstaub beigemischt.

Bei Fett C waren es Mischungen mit 25, 50, 75 und 85 Massenprozent Messingstaub.

6.2.3.3 Prozessstaub

Für die Zubereitung der Fett-Staubgemische (Zyklus 2) wurde das in Kapitel 5.3.1 beschriebene Messingpulver verwendet.

6.2.3.4 Farbstoff zur Fetteinfärbung

Der verwendete Farbstoff wird in Kapitel 5.3.5 beschrieben.

6.3 Druckhalte- und Luftdurchsatzversuche

In dieser Versuchsreihe wurde das Verhalten von fettgefüllten BFD bei einseitiger Druckbeaufschlagung untersucht. Hier wurde von zwei unterschiedlichen Dichtspaltzuständen bei Versuchsbeginn ausgegangen: War der Dichtspalt zu Versuchsbeginn komplett mit Fett gefüllt und konnte dieser Zustand auch über einen längeren Zeitraum gehalten werden, wurde mit Druckhalteversuchen der vom Dichtsystem ertragbare Druck ermittelt.

Bei geöffnetem Dichtspalt hingegen wurde durch Luftdurchsatzversuche die durch den Dichtspalt abströmende Luftmenge gemessen.

6.3.1 Versuchsaufbau Druckhalteversuche und Luftdurchsatzmessungen

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden am Prüfstand BFWD III durchgeführt, dieser ist in Kapitel 4.1.2 beschrieben. Die Dichtsysteme sind den Radialspalt-Dichtsystembaukästen aus Kapitel 5.1.1 entnommen. Des Weiteren kamen ausfördernde Axialspalt-Dichtsysteme (Kap. 5.1.2.) zum Einsatz. Die Versuchsfette wurden mit den Kleinmengen-Fördereinheiten (Kap. 4.2.4) in die Dichtsysteme eingebracht.

Für die Druckbeaufschlagung wurde die in Kapitel 4.2.2 beschriebene Druckkammer auf den Dichtsystemgrundträger aufgesetzt. Mit der Druckregel- und Volumenstrommesseinheit aus Kapitel 4.2.7 wurde der kammerseitige Druck geregelt.

Auf der nachfolgenden Abbildung (Bild 75) ist der Versuchsaufbau dargestellt.

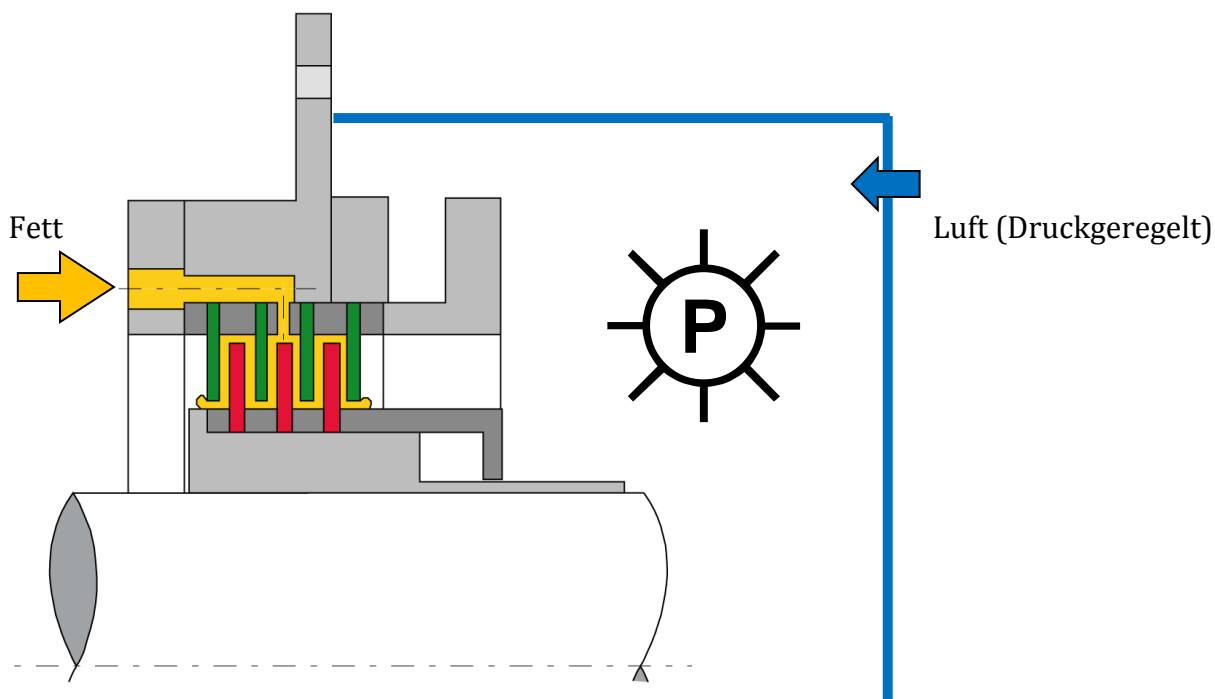


Bild 75 Druckkammer

6.3.2 Versuchsablauf Druckhalteversuche

Bei dieser Versuchsreihe sollte die maximal ertragbare Druckdifferenz eines komplett geschlossenen Dichtspaltes bei den unterschiedlichen Fetten und Drehzahlen an den Dichtsystemen 4, AU1 und AU4 ermittelt werden. Der Dichtspalt wurde bei allen Versuchen vor dem eigentlichen Versuchsbeginn bei einer Drehzahl von 10 min^{-1} mit der Kleinmengen-Fettfördereinheit befüllt. Dann wurde die Untersuchungsdrehzahl angefahren und die vorgesehene Druckstufe am vorderen Dichtspaltende eingestellt. Jeder Versuch hatte eine maximale Laufzeit von 600 s. Ein Versuch war dann beendet, wenn entweder sich der Dichtspalt geöffnet hatte und es zu einem Druckabfall auf der Vorderseite gekommen oder die maximale Laufzeit bei geschlossenem Dichtspalt überschritten war. Im zweiten Fall wurde dann bei weiteren Versuchen das Druckniveau bei gleicher Drehzahl angehoben bis es zum vorzeitigen Versuchsende kam. Das letzte ertragbare Druckniveau ist in den Diagrammen der Versuchsergebnisse aufgeführt. Folgende Drehzahlen wurden untersucht: 10, 50, 100, 150, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500 und 3000 min^{-1} .

6.3.3 Versuchsablauf Luftdurchsatzmessungen

Bei vielen Fetten ist es nicht möglich, den Dichtspalt lange geschlossen zu halten. In diesem Fall kann Luft oder ein anderes Fluid durch den entstanden Engspalt dringen. Um hier eine erste Abschätzung der Dichtgüte eines solchen Systems mit geöffnetem Spalt vornehmen zu können, wurden Luftdurchsatzmessungen bei einseitig am Dichtsystem anstehendem Überdruck vorgenommen. Die Vorgehensweise war hier folgende:

Als Vorbereitung wurde der Dichtspalt vor jedem Versuch bei 10 min⁻¹ befüllt und die Versuchsdrehzahl angefahren. Der Vorbereitungslauf dauerte so lange an, bis das Moment auf 0 Nm abgefallen war. Der Dichtspalt war jetzt geöffnet. Nun wurde bei angebrachter Druckkammer der vordere Eingangsspalt unter Druck gesetzt und jeweils die durch das Dichtsystem abströmende Luft mit der in Kapitel 4.2.7 vorgestellten Druckregel- und Luftmesseinheit ermittelt. Die untersuchten Druckstufen waren 5, 10, 20, 30 mbar – vereinzelt wurde bis 60 mbar gemessen. Die untersuchten Drehzahlen waren 0, 10, 50, 100, 150, 250, 500, 1000, 2000 und 3000 min⁻¹. Als Referenz für die Wirksamkeit eines mit Fett gefüllten Dichtspaltes wurde bei den einzelnen Dichtsystemen auch Messungen ohne Fett im Spalt durchgeführt.

6.3.4 Eingesetzte Untersuchungsmaterialien

6.3.4.1 Dichtsysteme

Nachfolgend sind die untersuchten Fett-Dichtsystemkombinationen aufgeführt. Die Lamellendichtsysteme werden in Kapitel 5.1.1 vorgestellt.

Tabelle 11: Druckhalte- und Luftdurchsatzmessungen Lamellendichtsysteme

	Luftdurchsatzversuche	Druckhalteversuche
Dichtsystem 4	Fett A + ohne Fett	Fette A - F
Dichtsystem AU 1	Fette A + C + ohne Fett	Fette A + C
Dichtsystem AU 4	Fette A + C + ohne Fett	Fette A + C

Die Axialspalt-Dichtsysteme werden in Kapitel 5.1.2 vorgestellt.

Tabelle 12: Druckhalte- und Luftdurchsatzmessungen Axialspalt-Dichtsysteme

	Luftdurchsatzversuche	Druckhalteversuche
Dichtsystem AUS 01	Fette A + C + ohne Fett	-

6.3.4.2 Versuchsfette

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

6.4 Untersuchung der FBFWD bei Schmutzbeaufschlagung

In dieser Untersuchungsphase wurde gezielt Schmutz und Flüssigkeit auf die Dichtsystemvorderseite von ausgewählten Standard-Dichtspaltgeometrien aufgebracht und die Abdichtleistung bestimmt. Im Folgenden wird die Vorgehensweise für jedes Verschmutzungsmedium getrennt vorgestellt.

6.4.1 Untersuchung FBFWD bei Staubbeaufschlagung

6.4.1.1 Versuchsaufbau Staubversuche

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden am Prüfstand BFWD III durchgeführt, dieser ist in Kapitel 4.1.2 beschrieben. Es wurden Dichtsysteme der Lamellendichtsystembaukästen (Kap. 5.1.1.1) und Axialspalt-Dichtsysteme (Kap. 5.1.2) untersucht. Die Versuchsfette wurden mit der Kleinmengen-Fördereinheit (Kap. 4.2.4) in die Dichtsysteme eingebracht.

Für die Staub- und Staub-Druckbeaufschlagung wurde die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Bestäubungseinrichtung vor dem Dichtsystem angebaut. Mit der Druckregel und Volumenstrommesseinheit aus Kapitel 4.2.7 wurde der staubkammerseitige Druck geregelt, sofern dieser vom Umgebungsdruck abweichen sollte.

Auf der nachfolgenden Abbildung (Bild 76) ist der Versuchsaufbau dargestellt.

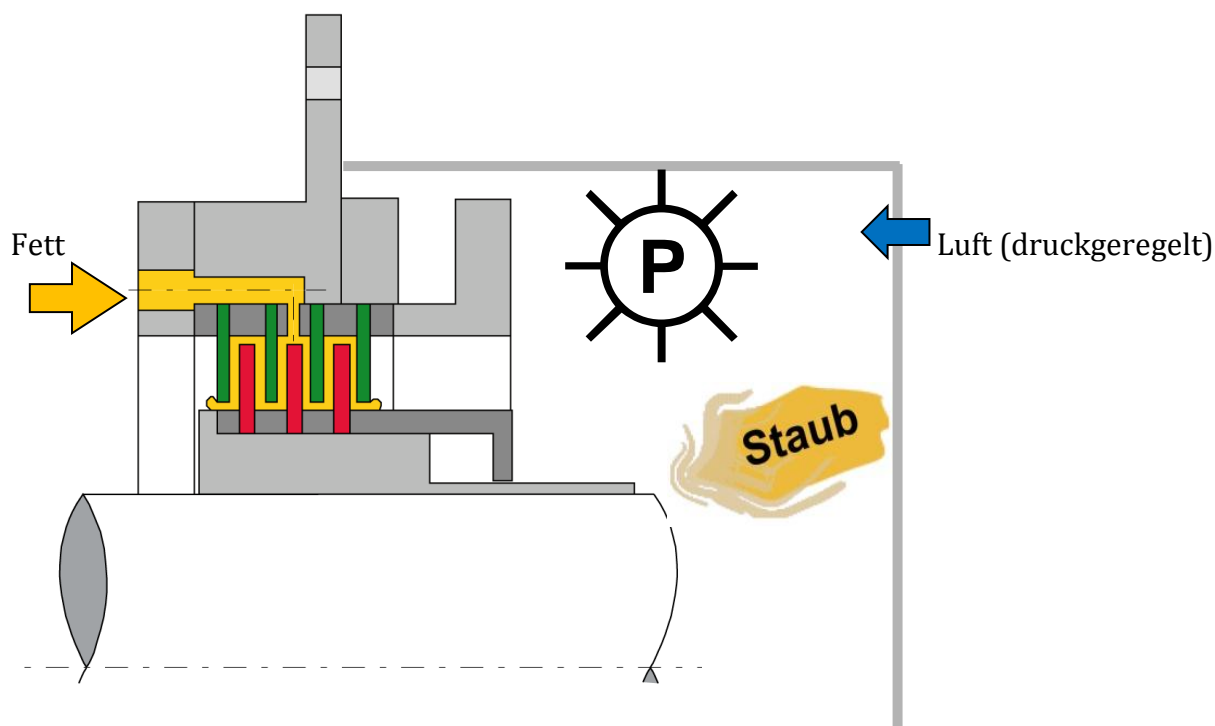


Bild 76: Versuchsaufbau Staub-Druckkammer

6.4.1.2 Versuchsablauf Staubversuche

Versuchsablauf Staubversuche Radialspalt-Dichtsysteme:

Bei dieser Versuchsreihe wurde das mit Versuchsfett befüllte Dichtsystem entweder nur mit Messingstaubpartikeln oder in Kombination mit einem Überdruck von 5 mbar auf der Arbeitsraumseite (von rechts) beschossen. Um die Prüfstandrüst- und Auswertzeiten im zur Verfügung stehenden Zeitrahmen unterbringen zu können, wurden die untersuchten Drehzahlen zu Drehzahlgruppen in vier Versuchszyklen zusammengefasst. Die vier Gruppen bestanden aus folgenden Drehzahlbereichen: Gruppe 1: 10 bis 100 min^{-1} ; Gruppe 2: 100 bis 500 min^{-1} ; Gruppe 3: 500 bis 1500 min^{-1} ; Gruppe 4: 1500 bis 3000 min^{-1} .

Die Versuchsdauer war jeweils 1800 s lang und alle 60 s wurde die Drehzahl innerhalb des Drehzahlbandes jeder Gruppe verändert. Beispielsweise bei Gruppe 4 wurde die Drehzahl immer um 500 min^{-1} nach 60 s Laufzeit erhöht bis die obere Grenze von 3000 min^{-1} erreicht war, dann wurde bei jedem Wechsel die Drehzahl um den gleichem Betrag bis zum Erreichen der unteren Grenze erniedrigt. Dieser Drehzahlwechsel wurde bis zum Versuchsende wiederholt. Während dieser Laufzeit wurde der vordere Dichtspalteingang mit Messingpartikeln beschossen. Die Partikelmenge betrug 1 g/s.

Nach jedem Einzelversuch war bei dieser Versuchsreihe die Staubkammer zu öffnen, jede Lamelle des Dichtsystems mit archäologischer Sorgfalt freizulegen und die Fett-Staub-Verteilung auf den einzelnen Lamellen fotografisch zu dokumentieren. Nur so war es möglich, die in den Dichtspalt vorgedrungenen Staubpartikel im Dichtsystem möglichst genau zu lokalisieren.

Versuchsablauf Staubversuche Axialspalt-Dichtsysteme:

Bei den Staubversuchen mit Axialspalt-Dichtsystemen war die Montage der Dichtsysteme erheblich einfacher. Aus diesem Grund wurden hier folgende Drehzahlen separat untersucht: 10, 100, 500, 1000, 2000 und 3000 min^{-1} .

Die Dichtsysteme wurden bei 10 min^{-1} befüllt. Ein Dichtsystem war dann befüllt, wenn sich am vorderen Dichtspalteingang ein kleiner gleichmäßiger Fettkragen gebildet hatte und das in Vorversuchen ermittelte Befüllmoment erreicht war. Jetzt wurde die Untersuchungsdrehzahl angefahren und die Staubbeaufschlagung mit 1 g/s gestartet. Jeder Versuch dauerte 7200 s. In der Staubkam-

mer herrschte bei allen Versuchen Umgebungsdruck. Während der Versuche wurde das Moment gemessen. Nach Ablauf der Versuchszeit wurde die vordere Rotoreinheit demontiert und an diversen Stellen der Statoreinheit Fettproben entnommen. Die Fettproben wurden dann auf einen Objektträger appliziert und am Stereomikroskop auf darin enthaltene Staubpartikel untersucht. Aufgrund der Partikelanzahl in der Probe wurde eine Klassifikation in 6 Schmutzklassen nach folgendem Bewertungsschema vorgenommen:

Partikelklasse:

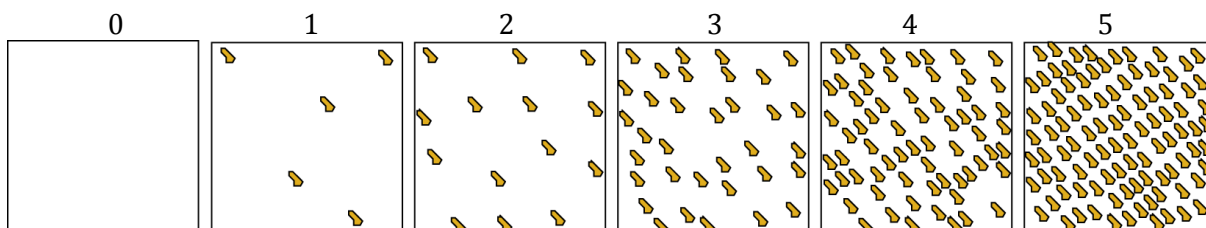


Bild 77: Partikelklassifikation der Fettproben

Die jeder Partikelklassifikation zugrunde liegende Bezugsfläche beträgt 10 x 10 mm. Mit dieser einfachen Untersuchungsmethode konnten die Fettproben mit den institutseigenen Messeinrichtungen sofort nach den Versuchen ausgewertet werden.

6.4.1.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien Staubversuche

Dichtsysteme:

In den folgenden Tabellen sind die untersuchten Fett-Dichtsystemkombinationen bei Staubbeaufschlagung aufgeführt:

Tabelle 13: Staubuntersuchungen Radialspalt-Dichtsysteme (Kap. 5.1.1)

	Staubversuche
Dichtsystem 4	Fette A + C

Tabelle 14: Staubuntersuchungen Axialspalt-Dichtsysteme (Kap. 5.1.2)

	Staubversuche
Dichtsystem AUS 01	Fette A + C
Dichtsystem AUS 01 rad	Fette A + C
Dichtsystem AUS 01 ax	Fette A + C
Dichtsystem AUS 02	Fett C
Dichtsystem AUS 03	Fett C
Dichtsystem EIN 01	Fett C
Dichtsystem EIN 02	Fette A + C
Dichtsystem EIN 03	Fette A + C

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Versuchsstaub:

Der Versuchsstaub ist in Kap. 5.3.1 erläutert.

6.4.2 Untersuchung FBFWD bei Sandbeaufschlagung

In diesem Versuchszyklus wird das Abdichtverhalten von FBFWD bei Sandbeaufschlagung untersucht. Das Eindringverhalten und eine evtl. dadurch resultierende Schädigung der Dichtsystemteile waren bei diesen viel größeren Korngrößen im Vergleich zu den Staubversuchen von besonderem Interesse.

6.4.2.1 Versuchsaufbau Sandversuche

Der Versuchsaufbau bei den Sandversuchen ist identisch zu dem der Staubversuche aus Kapitel 6.4.1.1.

6.4.2.2 Versuchsablauf Sandversuche

Der Versuchsablauf entspricht dem der Staubversuche bei den Axialdichtsystemen (Kap. 6.4.1.2). Die Sandbeaufschlagungsmenge betrug 1 g/s. Folgende Drehzahlen wurden untersucht: 10, 100, 500, 1000, 2000 und 3000 min⁻¹.

Zusätzlich wurden noch wenige Versuche mit veränderten Versuchsparametern, wie verlängerter Laufzeit oder besonderen Spaltzuständen bei Versuchsbeginn, durchgeführt. Auf die Durchführung dieser Versuche wird im Kapitel Ergebnisse dann speziell eingegangen. Darüber hinaus sollte hier der Nachweis erbracht werden, dass Fett im Dichtspalt überhaupt erst wirkungsvoll eine Schmutzleckage verhindert. Hierfür wurden zum Vergleich Versuche mit Sandbeaufschlagung an fettfreien Axialspalt-Dichtsystemen durchgeführt.

6.4.2.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien Sandversuche

Dichtsysteme (Kap. 5.1.2):

Tabelle 15: Sanduntersuchungen Axialspalt-Dichtsysteme

	Sandversuche
Dichtsystem AUS 01	Fette A + C + ohne Fett
Dichtsystem AUS 03	Fette A + C

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Versuchssand:

Der Versuchssand ist in Kap.5.3.2 erläutert.

6.4.3 Untersuchung FBFWD bei Flüssigkeitsbeaufschlagung

Bei dieser Versuchsreihe wurde zerstäubte Flüssigkeit auf den vorderen Dichtspalteingang aufgebracht. Mit Hilfe einer Hohlkegeldüse, wie sie auch zur Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln eingesetzt wird, wurden so Betriebsbedingungen geschaffen, wie sie bei Nieselregen oder indirekter Bespritzung entstehen können. Direkter Bespritzung mit scharfen Flüssigkeitsstrahlen kann eine Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtung nicht standhalten. In solch einem Fall kommt es zu einer Überflutung des gesamten Spaltes und damit zu Flüssigkeitsleckage. Für diese Einsatzbedingungen gibt es Fangkammerdichtsysteme (2).

6.4.3.1 Versuchsaufbau Flüssigkeitsversuche

Für die Untersuchung wurde die in Kap. 4.2.3 vorgestellte Bespritzungskammer am Prüfstand FBFWD III eingesetzt. Mittig in der vorderen Deckelfläche der Bespritzungskammer ist eine Hohlkegeldüse installiert. Mit dieser Düse wird ein grober Sprühnebel auf den Bereich des Spalteingangs appliziert. Die aufgebrachte Flüssigkeitsmenge betrug 0,25 l/min. In Bild 78 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Während der Versuche herrschte in der Bespritzungskammer Umgebungsdruck. Gemessen wurde das im Dichtspalt hervorgerufene Verlustmoment über die gesamte Versuchszeit hinweg.

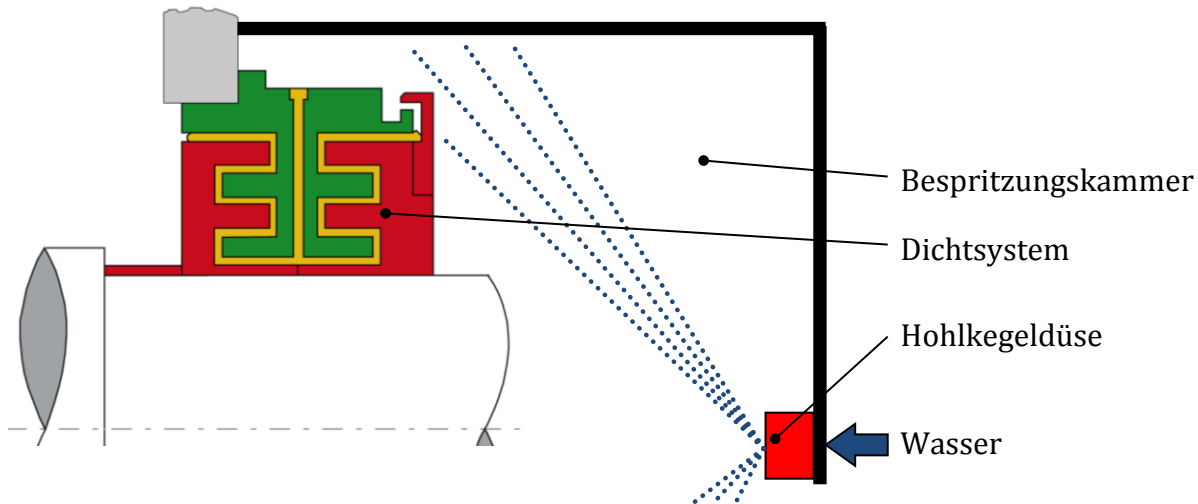


Bild 78: Bespritzungskammer

6.4.3.2 Versuchsablauf Flüssigkeitsversuche

Vor den Versuchen mit Flüssigkeitsbespritzung wurde das Dichtsystem jeweils bei 10 min^{-1} mit Fett befüllt. Anschließend wurde die Untersuchungs-drehzahl angefahren und mit der Flüssigkeitsbeaufschlagung begonnen. Jeder Versuch hatte eine Versuchslaufzeit von 7200 s. Somit war die Vergleichbarkeit mit den anderen Versuchen, bei denen Schmutz beaufschlagt wurde, gegeben. Nach jedem Versuch wurde das Dichtsystem geöffnet und die vorgefundene Flüssigkeitsmenge in den einzelnen Spaltbereichen, ähnlich wie bei den Sand- und Staubversuchen, klassifiziert. Folgende Drehzahlen wurden untersucht. 10, 100, 500, 1000 und 3000 min^{-1} .

6.4.3.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien Flüssigkeitsversuche

Dichtsystem (Kap. 5.1.2):

Tabelle 16: Flüssigkeitsversuche Axialspalt-Dichtsysteme

	Sprühnebelversuche
Dichtsystem AUS 01	Fett A

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Bespritzungsfluid:

Als Bespritzungsfluid wurde Wasser verwendet. Dies ist ein vor allem bei der Witterung ausgesetzten realen Systemen sehr häufig vorkommendes flüssiges Medium gegen das abgedichtet werden muss. Darüber hinaus ist Wasser in Fetten unlöslich. Auf den Einsatz von Ölen wurde hier im Versuch bewusst verzichtet. Öle verdünnen häufig Fette und damit geht deren Fließgrenze verloren. Dieser Zustand ist, wie im Ergebnisteil aufgeführt, aber unbedingt für die sichere Abdichtfunktion zu vermeiden.

6.4.4 Untersuchung FBFWD bei Schlammbeaufschlagung

Bei den Versuchen mit Schlammbeaufschlagung wurde als Versuchsschlamm ein Sand-Wassergemisch verwendet. Dieses konnte sehr gut auf den Spalteingang appliziert werden.

6.4.4.1 Versuchsaufbau Schlammbeaufschlagung

Für die Erzeugung des Versuchsschlammes am vorderen Dichtspalteingang wurden die feste und die flüssige Phase in der Staubkammer getrennt aufgebracht. Die feste Phase wurde mit der in Kap. 4.2.1 vorgestellten Staub-Beaufschlagungseinheit aufgeschossen. Für die flüssige Phase wurde die schon aus den Flüssigkeitsversuchen bekannte Hohlkegeldüse (Kap. 4.2.3) in der Staubkammer installiert. Bei günstiger Dosierung von Sand und Wasser entstand am Spalteingang Schlamm.

6.4.4.2 Versuchsablauf Schlammbeaufschlagungsversuche

Auch hier wurde wieder der schon bewährte Versuchsablauf, der bereits zuvor beschriebenen Sand-/Staubbeaufschlagungsversuche, angewandt. Das Dichtsystem wurde bei 10 min⁻¹ mit Fett befüllt, dann auf Versuchsdrehzahl gebracht und mit Schlamm beaufschlagt. Die auf das Dichtsystem aufgebrachten Schmutzmengen waren 1 g/s Prüfsand und 0,25 l/min Wasser. Während der Versuche wurde das Verlustmoment aufgezeichnet. Nach Ablauf von 7200 s Versuchsdauer kam die Demontage des Rotors. Jetzt konnte die in den Dichtspalt eingedrungene Verschmutzungsmenge analysiert und klassiert werden. Folgende Drehzahlen wurden untersucht. 10, 500 und 3000 min⁻¹.

6.4.4.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien Schlammversuche

Dichtsystem (Kap. 5.1.2):

Tabelle 17: Schlammversuche Axialdichtsysteme

	Schlammversuche
Dichtsystem AUS 01	Fett A

Versuchsfette:

Das bei den Versuchen eingesetzte Fett ist in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Schlamm:

Feste Phase: Versuchssand (Kap. 5.3.2)

Flüssige Phase: Wasser (Kap. 5.3.3)

6.5 Untersuchung kombinierter Dichtsysteme

Die Versuche und notwendige Anpassungskonstruktionen zur Untersuchung der kombinierten Dichtsysteme wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (22), die vom Autor der vorliegenden Arbeit ausgeschrieben und betreut wurde, durchgeführt. Kombinierte Dichtsysteme sind eine Erweiterung einer Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtung um ein berührendes Dichtelement. Zwei Versuchszyklen der durchgeführten Untersuchungen an dieser Dichtsystembauart werden nachfolgend beschrieben: Fett-Förderversuche und Verschmutzungsuntersuchungen. Alle Versuche an kombinierten Dichtsystemen fanden am Prüfstand BFWD III statt. Bei allen Versuchen wurde zusätzlich das Reibmoment gemessen, das sich bei kombinierten Dichtsystemen aus dem Reibmoment der berührenden Dichtung und dem Verlustmoment, das von der Fettströmung im Dichtspalt der berührungsfreien Einheit hervorgerufen wird, zusammensetzt. Durch die asymmetrische Geometrie dieser Dichtsysteme ergeben sich für den Befüllvorgang einige Besonderheiten, die für jede Versuchstypen separat erklärt wird.

6.5.1 Verschmutzungsuntersuchungen

Bei den Verschmutzungsuntersuchungen an kombinierten Dichtsystemen wurden als Verschmutzungsmedien Messingpulver und Quarzsand eingesetzt. Da bei beiden Medien der Versuchsaufbau und der Ablauf der Versuche identisch ist, sind nachfolgende Kapitel für beide Verschmutzungsmedien gültig.

6.5.1.1 Versuchsaufbau Verschmutzungsuntersuchungen

Bei den Verschmutzungsmedien Messingpulver und Quarzsand wurde der für die Staubuntersuchungen an Axialspalt-Dichtsystemen in Kapitel 6.4.1.1 vorgestellte Aufbau verwendet.

6.5.1.2 Versuchsablauf Verschmutzungsuntersuchungen

Als Vorbereitung für die Verschmutzungsuntersuchungen wurden die Dichtsysteme bei einer Drehzahl von 10 min^{-1} befüllt. Hierfür war die Vorschaltung einer weiteren berührenden Dichtung erforderlich (Bild 79). In den Raum zwischen beiden berührenden Dichtelementen wurde das Fett eingebracht. Da die beiden berührenden Dichtungen gleichsinnig angeordnet waren, wurde die Dichtlippe der vorgeschalteten Dichtung stärker gegen die Gegenauflfläche gepresst, während die Dichtlippe der berührenden Prüfdichtung angehoben wurde und den Weg nach rechts für das Fett in den berührungsfreien Teil des Dichtsystems freigab. Vor dem Start der Versuche wurde die Gegenauflfläche der Hilfsdichtung zurückgezogen (Bild 80), so dass nur noch die eigentliche Prüfdichtung im Eingriff war.

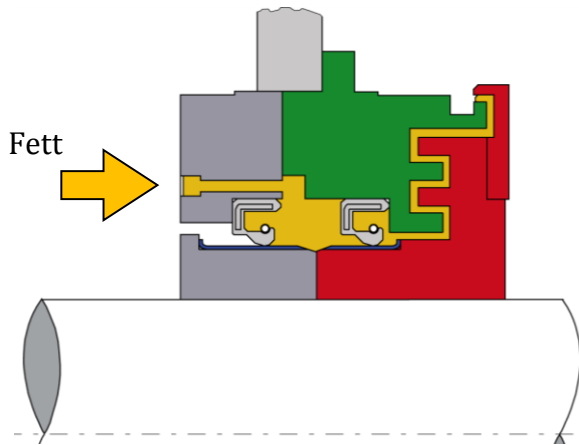


Bild 79: Befüllungvorgang kombiniertes System (22)

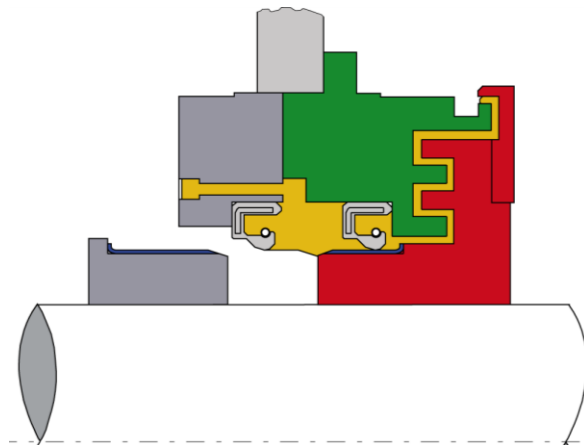


Bild 80: Position Gegenauflfläche bei Versuchen (22)

Der Versuchsablauf wurde von den Staubuntersuchungen an Axialspalt-Dichtsystemen übernommen (Kap. 6.4.1.2).

6.5.1.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien Verschmutzungsuntersuchungen

Dichtsysteme (Kap. 5.1.3)

Tabelle 18: Verschmutzungsuntersuchungen kombinierte Dichtsysteme

	Messingpulversuche	Sandversuche
Dichtsystem AUS 02 - V-Ring	Fette A + C	Fett A
Dichtsystem AUS 02 - RWDR	Fette A + C	

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Versuchsstaub:

Der Versuchsstaub wird in Kap. 5.3.1 beschrieben

Versuchssand:

Der Versuchssand ist in Kap. 5.3.2 erläutert.

6.5.2 Fett-Förderversuche

Die berührenden Dichtelemente der kombinierten Dichtsysteme haben die Aufgabe, jeglichen Medienübergang von der Arbeitsraumseite zur Lagerseite zu verhindern (Bild 81). Medien sind in erster Linie Luft, aber auch Partikel und verunreinigtes Fett. Um die Eignung der eingesetzten Dichtelemente feststellen zu können, wurden Fett-Förderversuche durchgeführt. Darüber hinaus soll das berührende Dichtelement auch dann einen Fettfluss vom berührungsfreien Teil des Dichtsys-

tems in den Lagerraum verhindern, wenn z. B. Fett mittels von Fettpressen direkt in den berührungsfreien Teil des kombinierten Dichtsystems eingebracht wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn kein Fett aus der Lagerung zum „Durchschmieren“ (unter der Dichtlippe des berührenden Elements hindurch) zur Verfügung steht, aber dennoch Fett für die Abdichtung in einem vorge-schalteten Fettgefüllten Berührungsfreien Dichtelement benötigt wird.

6.5.2.1 Versuchsaufbau Fett-Förderversuche

Die vorhandenen Statorteile der kombinierten Dichtsysteme wurden etwas modifiziert, so dass durch einen Kanal, wie in Bild 81 dargestellt, Fett direkt vor das berührende Dichtelement mit den Kleinmengen-Fettfördereinheiten eingebracht werden konnte.

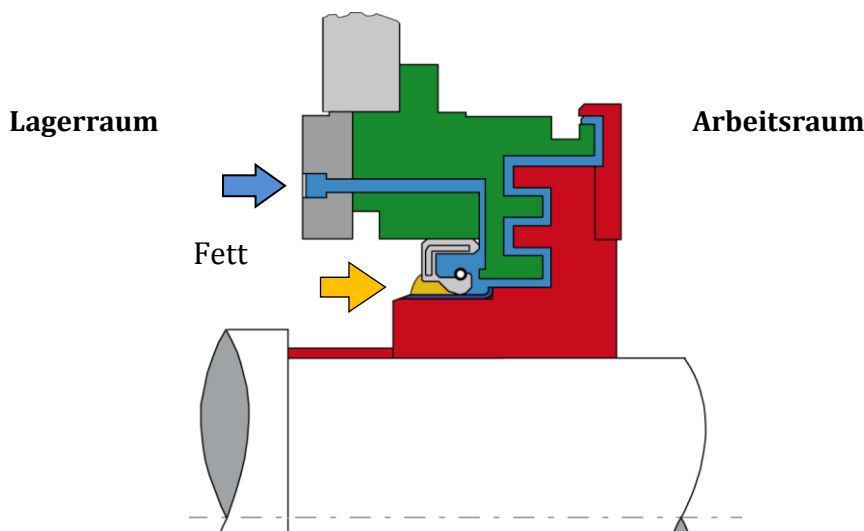


Bild 81: Befüllvorgang Fett Förderversuche (22)

6.5.2.2 Versuchsablauf Fett-Förderversuche

Vor den Fett-Förderversuchen wurden die Dichtsysteme direkt mit Fett befüllt. Dieser Befüllvorgang war zweigeteilt. Zuerst wurde das Dichtsystem durch den zusätzlichen Kanal (Bild 81) bei einer Wellendrehzahl von 10 min⁻¹ mit blau eingefärbtem Fett befüllt. Im Anschluss daran, wurde das berührende Dichtelement lagerraumseitig (beim RWDR auf der Bodenseite) von Hand mit einem „ungefärbten“ Fettring derselben Fettsorte versehen.

Jetzt konnte der eigentliche Versuch beginnen. Verschiedenste Drehzahlen wurden so über eine Versuchszeit von 600 s untersucht und nach der Rotordemontage die Fettverteilung untersucht. Durch die einseitige Einfärbung des Fetts wären vorhandene Fettströme in den Lagerraum sofort identifizierbar gewesen.

6.5.2.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien Fett-Förderversuche

Dichtsysteme (Kap. 5.1.3):

Tabelle 19: Fett-Förderversuche kombinierte Dichtsysteme

	Fett-Förderversuche
Dichtsystem AUS 02 - V-Ring	Fette A + C
Dichtsystem AUS 02 - RWDR	Fette A + C

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Farbstoff zur Fetteinfärbung:

Der verwendete Farbstoff wird in Kapitel 5.3.5 beschrieben.

6.6 Untersuchung Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtsysteme mit Fettabfluss

Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtsysteme mit Fettabfluss (FBFWDA) haben nahe dem arbeitsraumseitigen Dichtspalteingang eine Fettabflussöffnung, um verbrauchtes Altfett über diese Öffnung z. B. in einen Behälter entsorgen zu können und nicht über den arbeitsraumseitigen Dichtspalteingang in die Umgebung. In der Literatur sind keine Dichtsysteme, die eine effektive Schmutzabdichtung mit einer Fettabführung kombinieren, zu finden. Dort gibt es nur sog. Fettmengenregler (35), (36), (16), die durch bewegte Engspalte überschüssiges Fett aus dem Lagerraum von Wälzlagern abführen sollen, jedoch ohne Dichtwirkung gegen Verschmutzung von außen. Fettgefüllte Dichtsysteme mit Fettabfluss wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und deren Funktion und Bauraum optimiert. Das Axialspalt-Dichtsystem AUS 01 wurde mit einer Fettabfuhrnut versehen (neue Benennung ECO 01) und bildete bei den Fettaustrittsversuchen die Ausgangsdichtung für die Optimierungen der Dichtungen ECO 01 bis ECO 05.

In einem zweiten Schritt wurde die auf Fettaustritt und Bauraum optimierte Dichtung ECO 05 Versuchen mit Schmutzbeaufschlagung unterzogen und das Abdichtverhalten untersucht.

6.6.1 Fettaustrittsuntersuchungen an FBFWDA

Bei dieser Versuchsreihe wurde das Fettaustrittsverhalten an der Fettabflussöffnung und am arbeitsraumseitigen Dichtspalteingang der Dichtsysteme ECO 01 bis ECO 05 untersucht. Ziel war es, den Fettaustritt auf die Fettabflussöffnung zu beschränken und den Fettaustritt am vorderen Spalteingang zu reduzieren.

6.6.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entsprach dem der Grundlagenuntersuchungen an Standard-Dichtspalten (Kap. 6.1.1).

6.6.1.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf orientiert sich an dem der Kurzzeitversuche aus Kap. 6.1.2.

Das Dichtsystem wurde bei 10 min^{-1} mittels der Kleinmengenfördereinheit mit Fett befüllt. Ein Dichtsystem war dann korrekt befüllt, wenn sich das in Vorversuchen ermittelte Anfangsmoment eingestellt hatte und ein blasenfreier Fettstrom aus der Fettabflussöffnung gequollen war. Idealerweise hatte sich am arbeitsraumseitigen Dichtspalteingang kein oder nur ein minimaler Fettkragen ausgebildet. Jetzt wurde die Untersuchungsdrehzahl schnellstmöglich durch die Prüfstandsteuerung angefahren und zugleich der Versuch mit einer Laufzeit von 600 s gestartet. Folgende Drehzahlen wurden untersucht: 10, 100, 500, 1000, 2000, 2500 und 3000 min^{-1} . Während des Versuchs wurde durch Aufzeichnen des Drehmoments und anschließender Auswertung des Verlaufs der Dichtspaltzustand ermittelt (geöffnet oder teilweise geschlossen). Nach Versuchsende wurde der Zustand des arbeitsraumseitigen Dichtspalteingangs bewertet (kein, kleiner oder großer Fettkragen).

6.6.1.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien

Dichtsysteme (Kap. 5.1.4):

Tabelle 20: Fettaustrittsuntersuchungen an FBFWDA

	Fett Ausförderversuche
Dichtsystem ECO 01	Vorversuche Fette A + C
Dichtsystem ECO 02	Fett C
Dichtsystem ECO 03	Fette A + C
Dichtsystem ECO 04	Fett A
Dichtsystem ECO 05	Fette A + C

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Versuchssand:

Der Versuchssand ist in Kap. 5.3.2 erläutert.

6.6.2 Schmutzbeaufschlagungsversuche an FBFWDA

Bei den FBFWDA wurde nur das funktionsoptimierte Dichtsystem ECO 05 der Sandbeaufschlagung unterzogen. Von besonderem Interesse war hier der Umstand, dass hinter dem Dichtspalteingang ein „einfördernder“ Spaltabschnitt folgt und erst nach der Fettabflussöffnung (vom Dichtspalteingang betrachtet) der eigentliche Abdichtbereich der FBFWDA kommt. Der Spalteingang und der Bereich dahinter werden bei der Nachschmierung nicht oder nur mit wenig frischem Fett versorgt. Welche Spaltzustände stellen sich hier ein? Kommt es zum Fressen durch ein festes Fett-Sandgemenge?

6.6.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist identisch zu den Staubbeaufschlagungsversuchen an Axialspalt-Dichtsystemen und wird in Kap. 6.4.1.1 beschrieben.

6.6.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf entspricht dem der Staubversuche bei den Axialspalt-Dichtsystemen (Kap. 6.4.1.2). Die Sandbeaufschlagungsmenge betrug 1 g/s. Folgende Drehzahlen wurden untersucht: 10, 100, 500, 1000, 2000 und 3000 min⁻¹. Alle Versuche hatten eine Laufzeit von 7200 s. In der Schmutzbeaufschlagungskammer herrschte Umgebungsdruck.

Zusätzlich wurde noch ein Langzeitversuch mit einer Laufzeit von 12 h bei Drehzahlen zwischen 10 min⁻¹ und 2010 min⁻¹ in Stufen von 500 min⁻¹ mit einer Stufenhaltedauer von 5 s durchgeführt. Das Dichtsystem wurde hier vor Versuchsbeginn bei 10 min⁻¹ befüllt bis das Fett am vorderen Dichtspalteingang sichtbar war. Zur Verschärfung der Versuchsbedingungen war das Dichtsystem mit einem axialen Dichtspalteingang ausgestattet. Dann wurde die Sandbeaufschlagung angeschaltet und die Startversuchsdrehzahl von 10 min⁻¹ angefahren. Bis zum Versuchsende nach 12 Stunden blieb die Staubbeaufschlagung in Betrieb.

6.6.2.3 Verwendete Untersuchungsmaterialien

Dichtsysteme (Kap. 5.1.4):

Tabelle 21: Fett-Förderversuche kombinierte Dichtsysteme

	Sandversuche
Dichtsystem ECO 05	Fette A + C
Dichtsystem ECO 05	Langzeitversuch Fett A

Versuchsfette:

Die bei den Versuchen eingesetzten Fette sind in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Versuchssand:

Der Versuchssand ist in Kap. 5.3.2 erläutert.

7 Untersuchungsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse ausgewählter aussagekräftiger Versuche vorgestellt. Aus diesen Ergebnissen wurden die im Konstruktionskatalog (Kapitel 8) aufgeführten Erkenntnisse abgeleitet und anwendergerecht aufbereitet. Die Kapitelnummernzuordnung in den Ergebniskapiteln ist analog zur Versuchsvorstellung in Kapitel 6 „Untersuchungsmethodik“ aufgebaut, so dass die zugehörigen Versuchsbeschreibungen einfach aufgefunden werden können.

7.1 Untersuchungen an Standard-Dichtspaltgeometrien

7.1.1 Versuchsergebnisse Radialspalt-Dichtsysteme innenrotierend

Die Radialspalt-Dichtsysteme der im Folgenden vorgestellten Ergebnisse sind aus den Komponenten des aus in Kapitel 6.1.3.1 beschriebenen Innenrotor-Dichtsystembaukasten zusammengestellt. Dort sind auch die Versuche mit aussagekräftigen Ergebnissen in Tabelle 7 aufgeführt. Die Versuchsergebnisse der durchgeführten Versuche wurden auf die im Folgenden vorgestellten Einflusskriterien in Bezug auf den sich einstellenden Dichtspaltzustand hin ausgewertet.

- Einfluss der unterschiedlichen Fette auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der Lamellenanzahl auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der axialen Dichtspalthöhe auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der radialen Dichtsystemhöhe auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Fettverteilung auf den Komponenten von Dichtsystem 1 bei unterschiedlichen Fetten.

7.1.1.1 Einfluss der unterschiedlichen Fette auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Auf den nachfolgenden Diagrammen (Bild 82 bis Bild 89) sind bei den Drehzahlen 10, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 und 3000 min^{-1} die Momentkurven der Fette A, B, C, D, E und F (Kapitel 5.2.2) über die Versuchsdauer von 600 s bei den Kurzzeitversuchen (Kapitel 6.1.2.1) dargestellt. Die Momentkurven sind ein Indikator über die Zustände im Dichtspalt während des Versuchs. Bei horizontal verlaufenden Momentkurven auf einem Momentniveau nur wenig unter dem Startmoment und ohne große Schwankungen kann von stabilen Verhältnissen im Spalt und guter Fettfüllung ausgegangen werden. Der Dichtspalt bleibt komplett verschlossen. Sinkt das Moment auf ein niedrigeres Niveau, deutet dies auf einen teilweise geöffneten Dichtspalt hin. Geht das Moment vollständig verloren, so hat sich zwischen Stator- und Rotorlamellen des Dichtsystems ein Luftspalt ausgebildet. Auf Bild 82 sind Momentkurven bei 10 min^{-1} dargestellt. Nur die Kurve von Fett C verläuft nahezu horizontal. Die Kurve von Fett F zeigt einen ruhigen Verlauf mit einem Abwärtstrend bis zum Versuchsende hin. Bei diesen niedrigen Drehzahlen verbleibt aber allgemein fast jedes Fett über längere Zeit im Spalt. Der Einfluss der im Spalt wirkenden Scherspannungen und auch Fliehkrafteinflüsse sind bei diesen Drehzahlen noch gering. Dies wird sich bei ansteigenden Drehzahlen, wie die nachfolgenden Diagramme zeigen, ändern (Bild 83 bis Bild 89).

Die Kurven der Fette C, E und F erweisen sich bei allen Drehzahlen als die mit der größten Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes. Die Ursache liegt im Fließverhalten der Fette unter Scher- und Fliehkrafteinfluss begründet.

Nur bei den Fetten C, E und F bleibt ein Moment über alle Drehzahlen hinweg erhalten. Dies bedeutet, dass hier von einem zumindest größtenteils geschlossenen Fettspalt ausgegangen werden kann. Die unruhigen „Restmomente“ anderer Fette sind auf ein kurzzeitiges, teilweises, selbständiges Füllen des Dichtspaltes mit Fett, das vom Fettkragen am äußeren Spaltende angesaugt wird, oder auf Mitschleppeffekte von Restfett im Spalt zurückzuführen. Der Einfluss des gewählten Fettes auf das Verbleiben im Dichtspalt ist sehr groß.

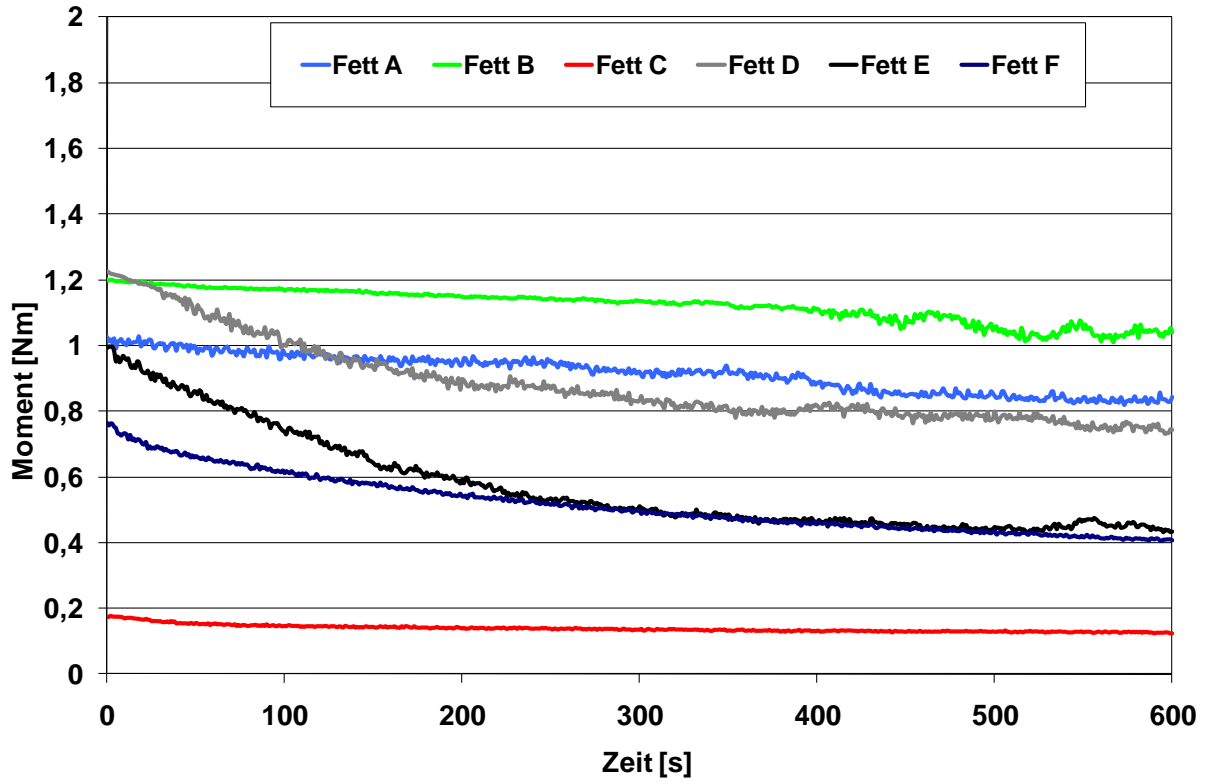


Bild 82: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 10 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lamellen

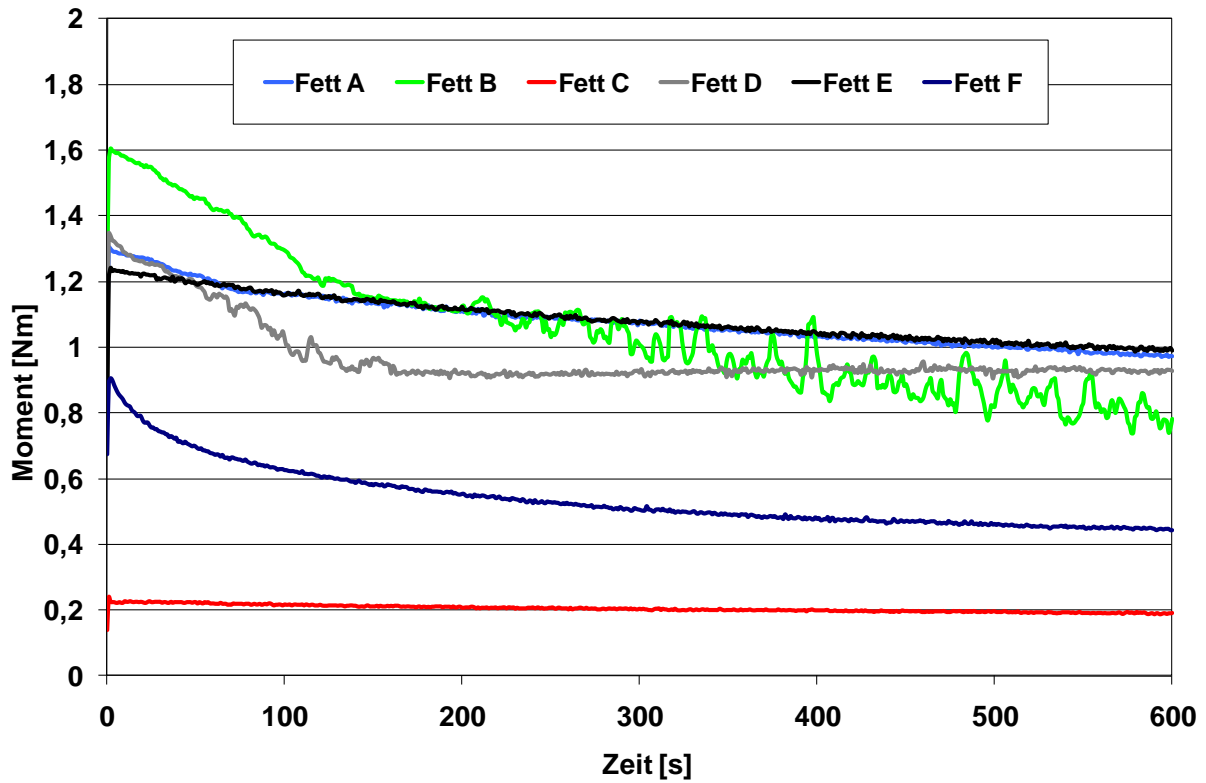


Bild 83: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 50 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lamellen

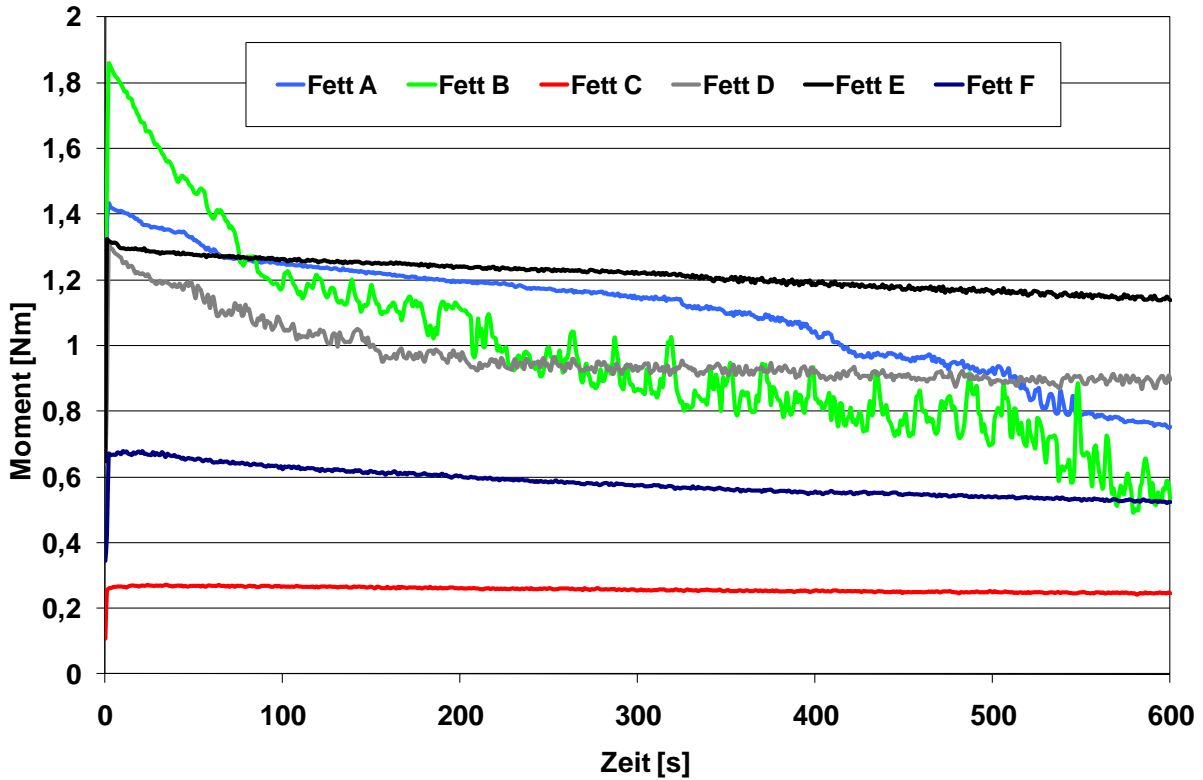


Bild 84: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 100 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lamellen

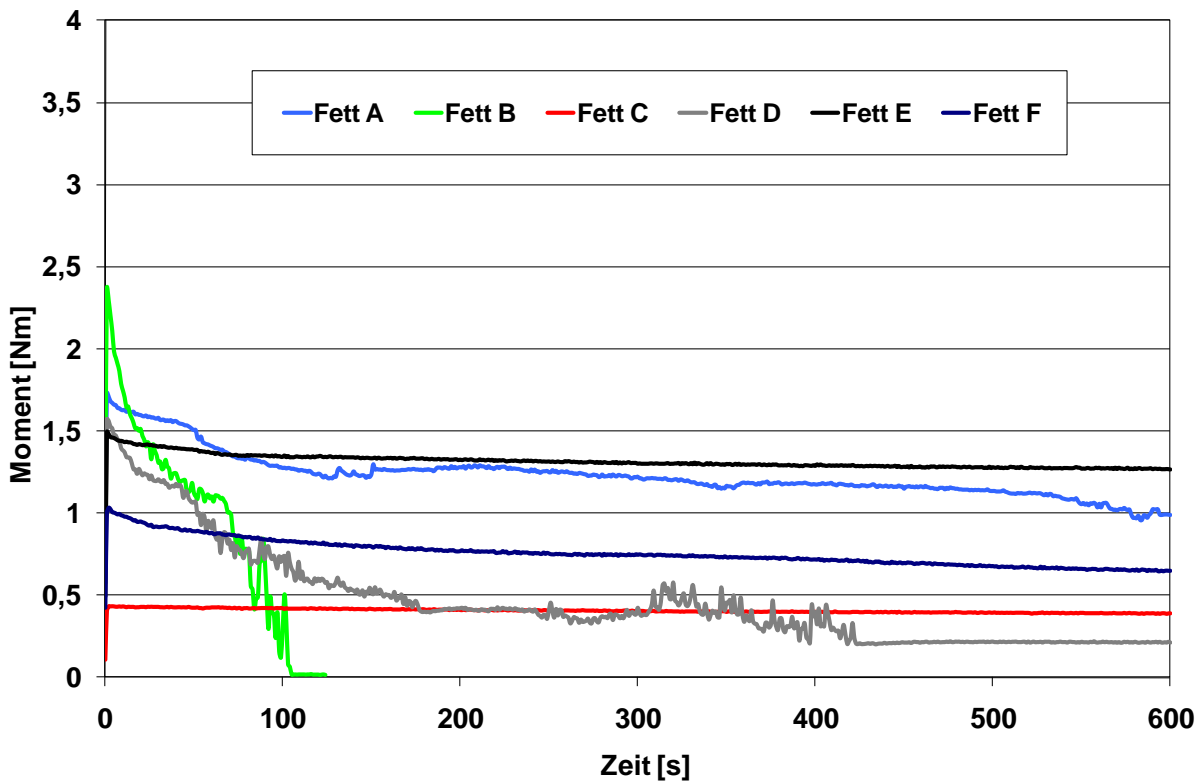


Bild 85: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 250 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lamellen

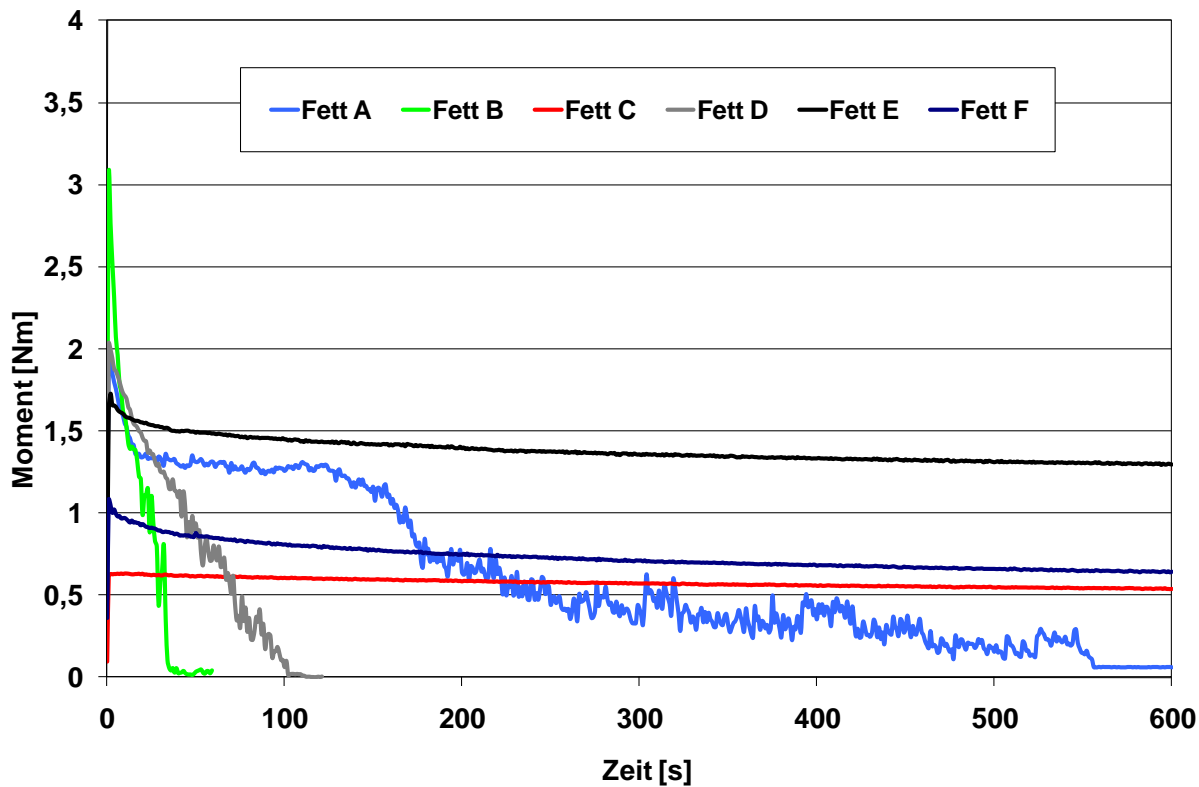


Bild 86: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 500 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lamellen

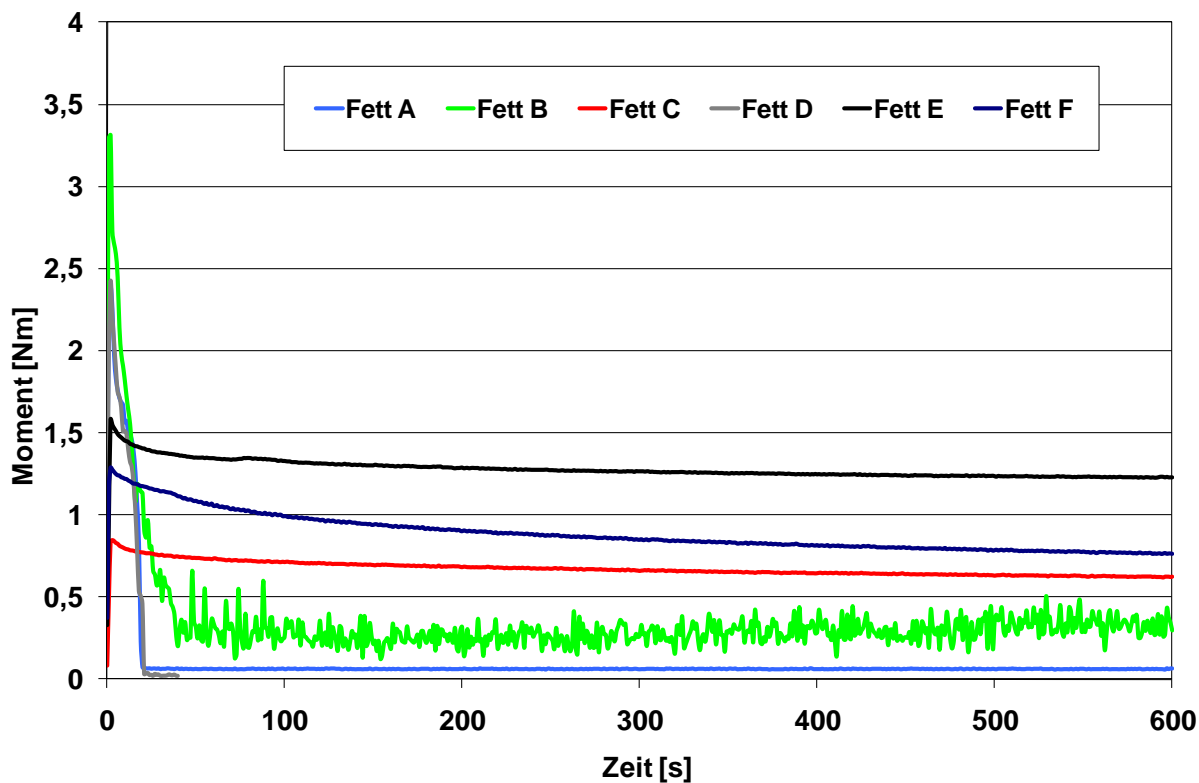


Bild 87: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 1000 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lam.

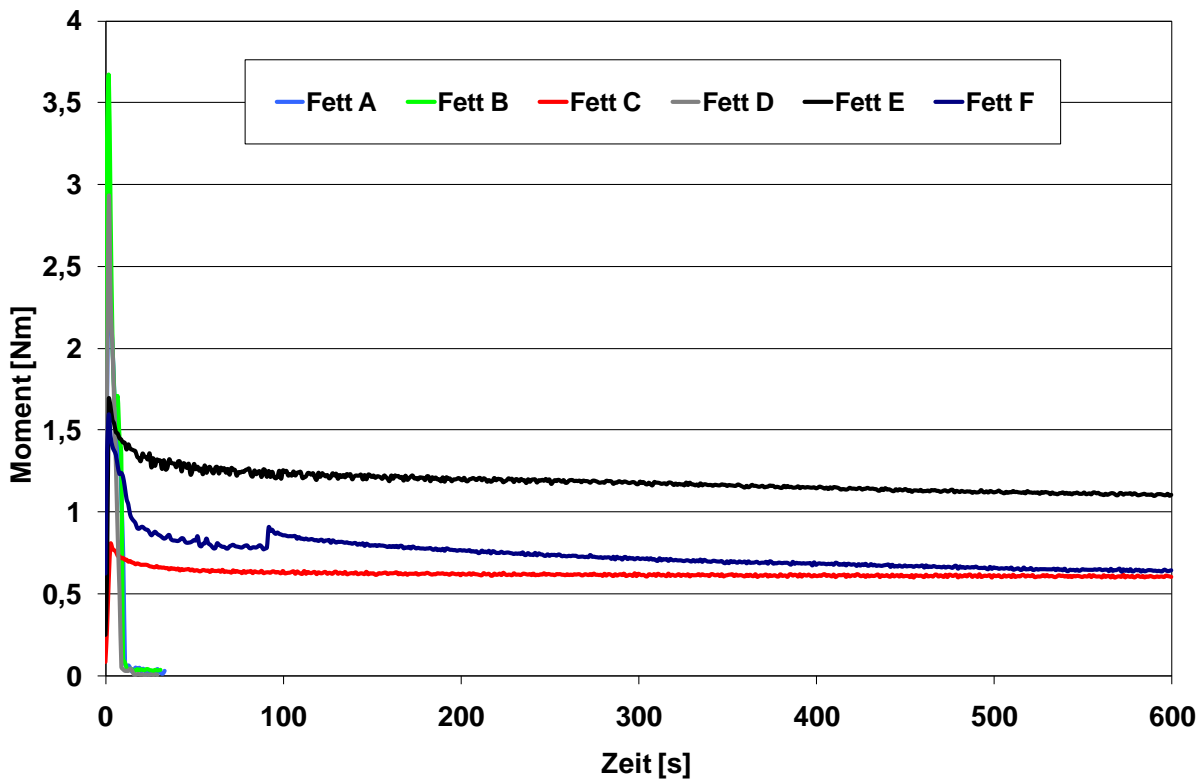


Bild 88: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 2000 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lam.

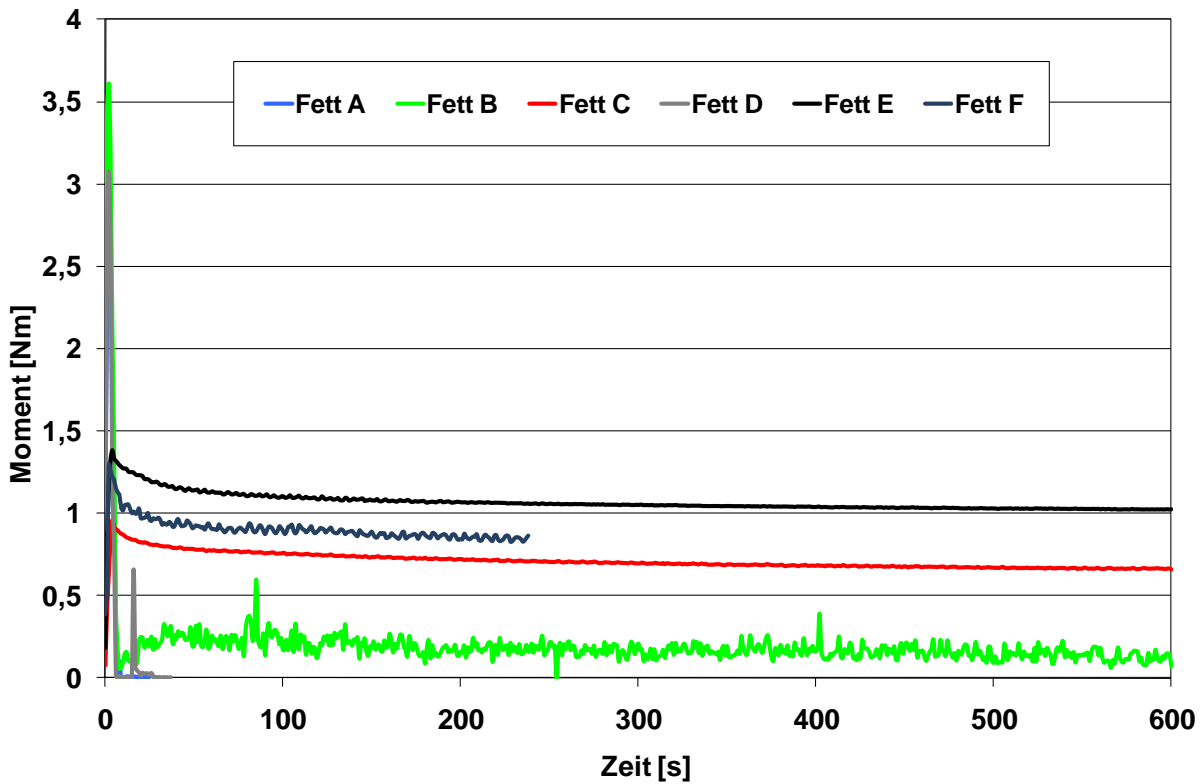


Bild 89: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fette A bis F, 3000 min⁻¹, 0,75 mm ax. Spalthöhe, 7 Lam.

7.1.1.2 Einfluss der Lamellenanzahl auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

In diesem Kapitel soll der Einfluss der Lamellenanzahl auf die Momentkurven aufgezeigt werden. Die axiale Spalthöhe bleibt bei allen Diagrammen gleich. Bei allen nachfolgend dargestellten Momentkurven wurde Fett C verwendet. Nur die Lamellenanzahl wird zwischen sieben (bei Dichtsystem 4, Kapitel 6.1.3.1), fünf (bei Dichtsystem 39, Kapitel 6.1.3.1) und drei (bei Dichtsystem 74, Kapitel 6.1.3.1) variiert. Zu beachten ist hierbei noch, dass wie aus Bild 70 und Tabelle 7 ersichtlich, bei Dichtsystem 39 die jeweils stirnseitig äußere Lamelle am Rotor befestigt ist, so dass hier ein radial nach außen fördernder Spalt entsteht. Bei Dichtsystem 7 und 74 sind die äußeren Lamellen statorseitig befestigt.

Generell kann zur Versuchsdurchführung gesagt werden, dass sich das 7-lamellige Dichtsystem am besten befüllen lässt. Das Fett wird mittig ins Dichtsystem eingebracht. Hier entsteht durch die mehrmalige Umlenkung bis zum jeweils äußeren Spaltende ein gewisser Gegendruck, der für eine gleichmäßige Befüllung sorgt. Bei Dichtsystem 39 und vor allem bei 74 gestaltet sich das Befüllen als fast unmöglich und ist mit einem sehr großen Fettaustritt verbunden, da hier das Fett direkt den kürzesten Weg ins „Freie“ nimmt. Das Ergebnis ist hier ein großer Fettkragen und ein schlecht gefüllter Dichtspalt. Die Momentkurven bei allen drei Dichtsystemen (Bild 90 bis Bild 92) verlaufen dennoch sehr gleichmäßig. Dies täuscht ein wenig über die erschwerten Bedingungen beim Befüllen hinweg.

Es sei an dieser Stelle gesagt, dass überhaupt nur Fett „C“ im Spalt gehalten werden konnte.

Werden nun die Momentkurven gleicher Drehzahlen miteinander verglichen, so zeigen sich bei niederen Drehzahlen keine Besonderheiten. Die Momentkurven verlaufen horizontal und bei den Dichtsystemen mit geringerer Spaltgesamtfläche ist auch das Moment entsprechend kleiner. Bei mittleren Drehzahlen ist diese Übereinstimmung meist auch noch gegeben. Werden nun aber die Momentkurven hoher Drehzahlen gegenübergestellt, so sind diese von Dichtsystem 4 (Bild 90) gegenüber denen von 39 (Bild 91) und 74 (Bild 92) vom Niveau her deutlich höher, auch das war so zu erwarten. Die Momentkurven von 39 und 74 sind bei hohen Drehzahlen aber fast identisch. Dies bedeutet, dass bei 39 die äußeren Radialspalte der Decklamellen mit dem Spaltende am Außendurchmesser leergefördert werden und keinen Beitrag zum Moment mehr leisten.

So ein Eingangsspalt wie bei Dichtsystem 39 ist also für absichtliches Öffnen eines Spaltbereiches ab einer gewissen Drehzahl nutzbar.

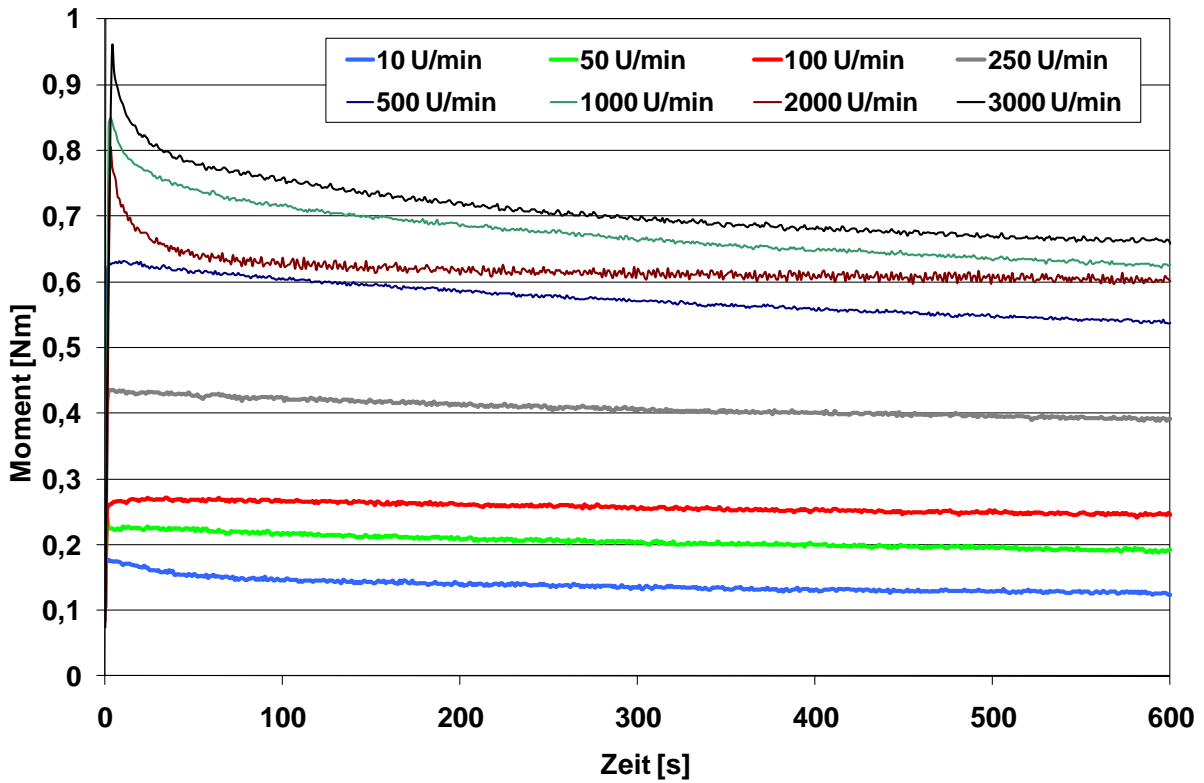


Bild 90: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fett C, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 7 Lamellen

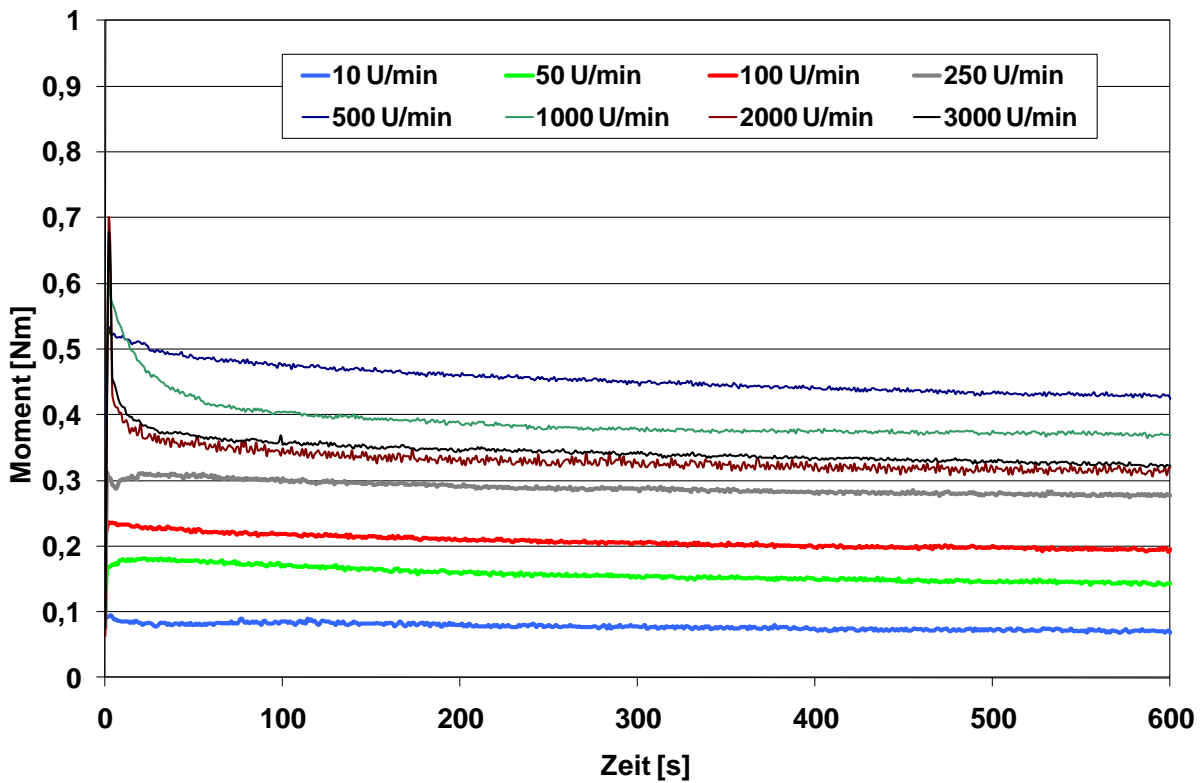


Bild 91: Momentverläufe Dichtsystem 39, Fett C, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

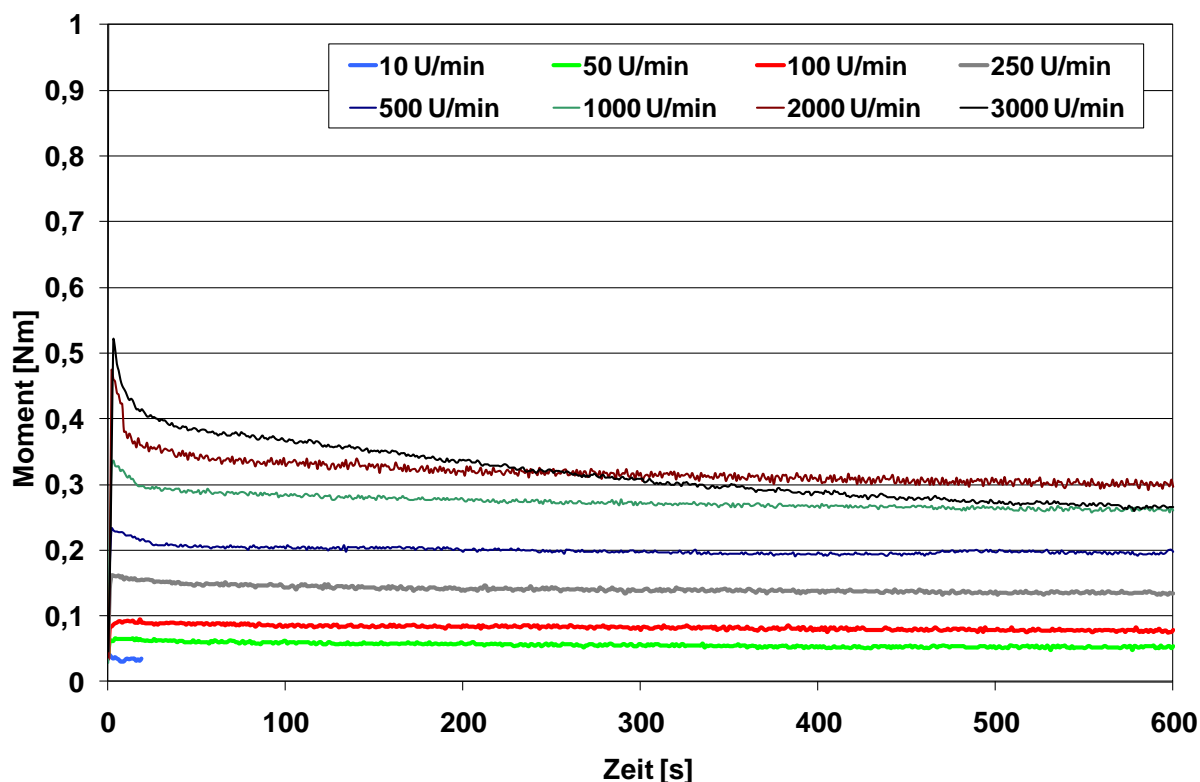


Bild 92: Momentverläufe Dichtsystem 74, Fett C, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

7.1.1.3 Einfluss der axialen Dichtspalthöhe auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

In diesem Kapitel soll die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes in Abhängigkeit der axialen Dichtspalthöhe aufgezeigt werden (Bild 93 bis Bild 96). Die axiale Dichtspalthöhe ist identisch mit dem Abstand zwischen einer Rotor- und einer Statorlamelle. Die Momentkurven von Fett F veranschaulichen dies sehr schön. Fett C ist hier zu „gut“. Es blieb unter allen Umständen im Dichtspalt. Untersucht wurden hier die folgenden Spalthöhen: 2; 1,5; 1 und 0,75 mm.

Bei niederen und mittleren Drehzahlen verlaufen die Momentkurven auch bei der größten Spalthöhe horizontal bis Versuchsende. Bei hohen Drehzahlen dagegen, fallen sie binnen weniger Sekunden auf den Momentnullpunkt.

Mit Rücknahme der Spalthöhe ändert sich dies stetig, bis alle Momentkurven einen horizontalen Verlauf annehmen. Gleichzeitig steigt das Momentniveau und die sich negativ auf die Fetthaltbarkeit auswirkende Scherbeanspruchung auf das Fett. Bei allen Fetten außer C, E und F blieb der Dichtspalt auch bei der kleinsten Spalthöhe nicht dauerhaft geschlossen. Mit der Spalthöhe kann also die Verweildauer eines geschlossenen Dichtspaltes beeinflusst werden.

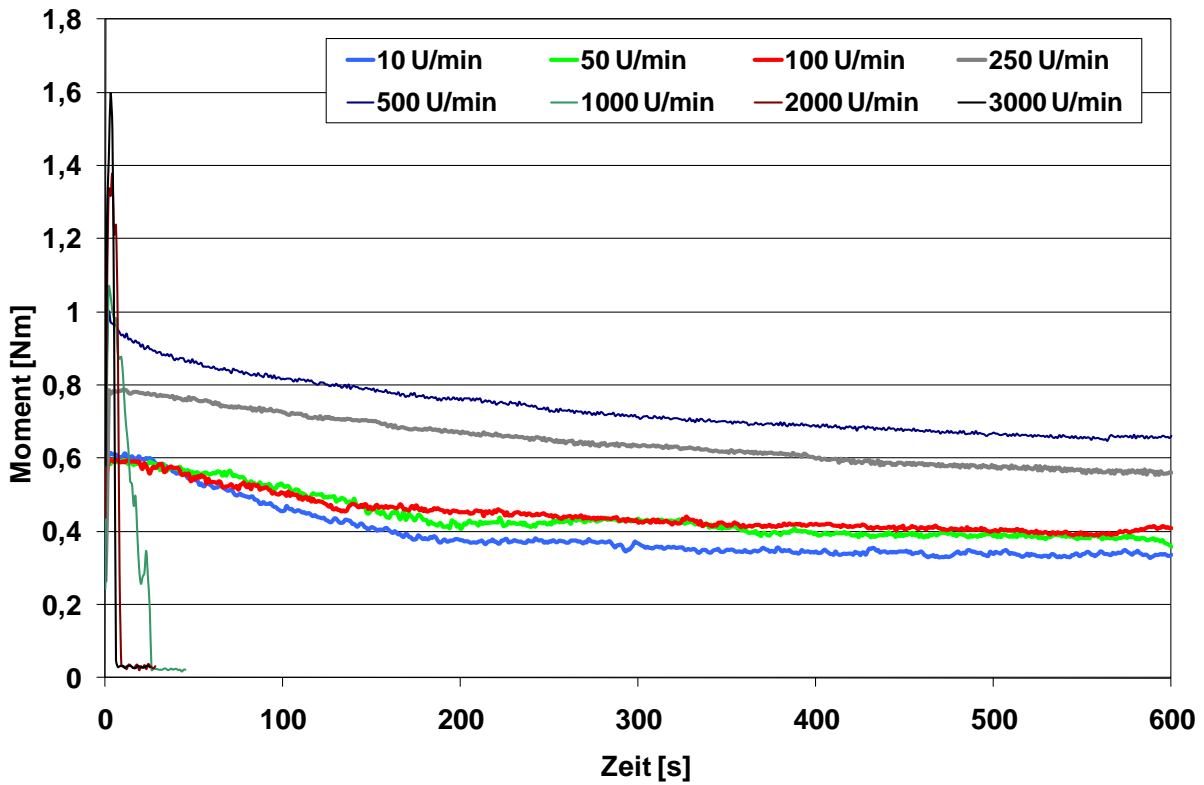


Bild 93: Momentverläufe Dichtsystem 1, Fett F, 2,0 mm axiale Spalthöhe, 7 Lamellen

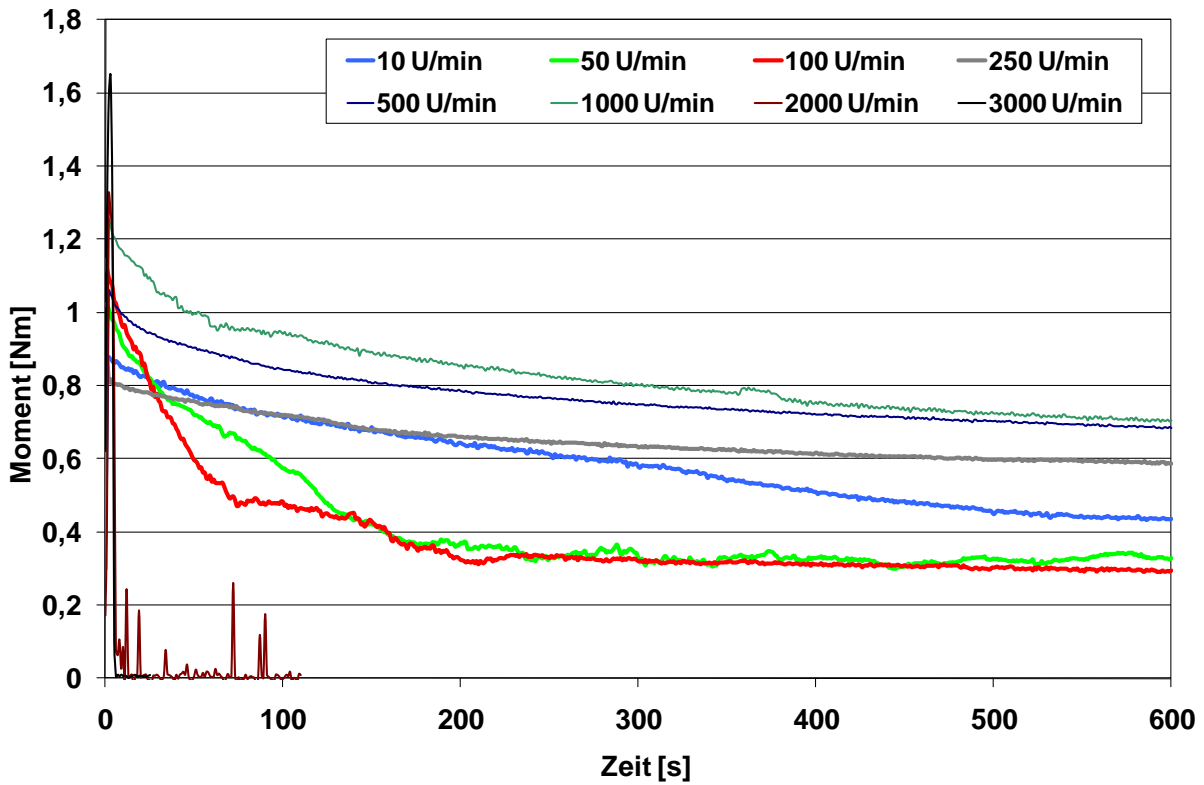


Bild 94: Momentverläufe Dichtsystem 2, Fett F, 1,5 mm axiale Spalthöhe, 7 Lamellen

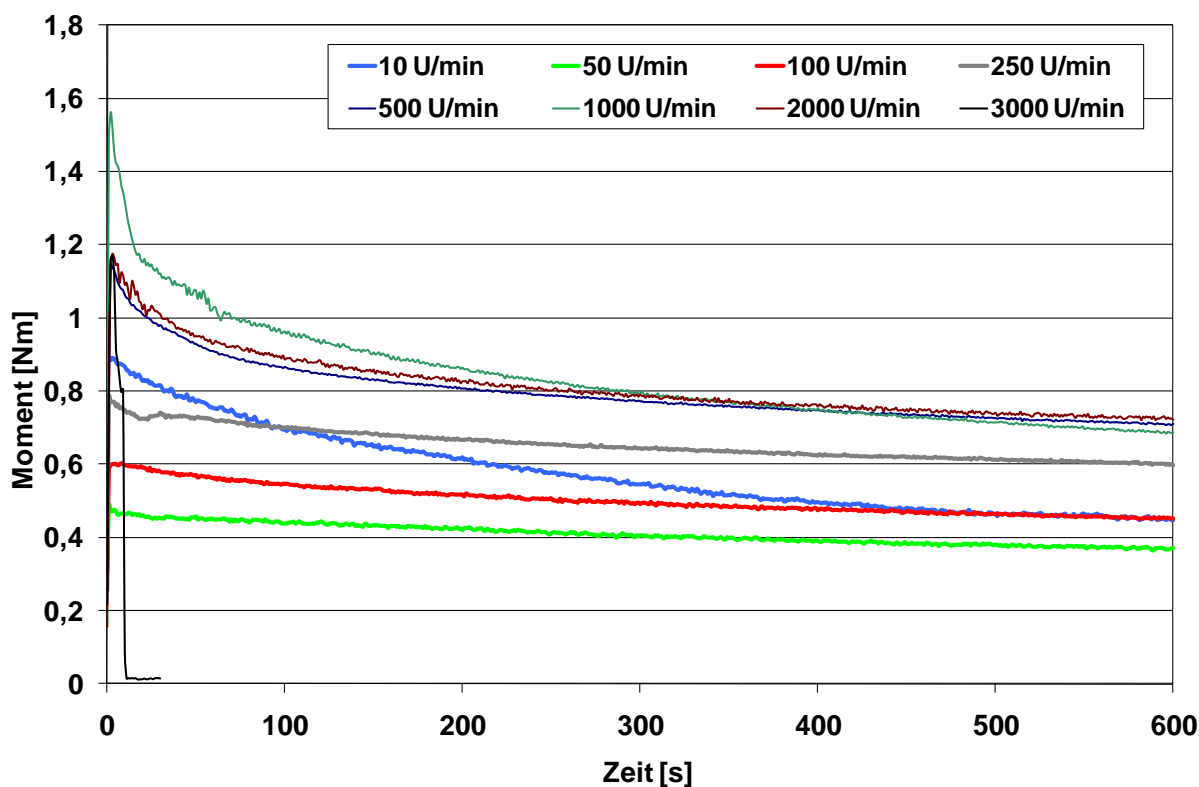


Bild 95: Momentverläufe Dichtsystem 3, Fett F, 1,0 mm axiale Spalthöhe, 7 Lamellen

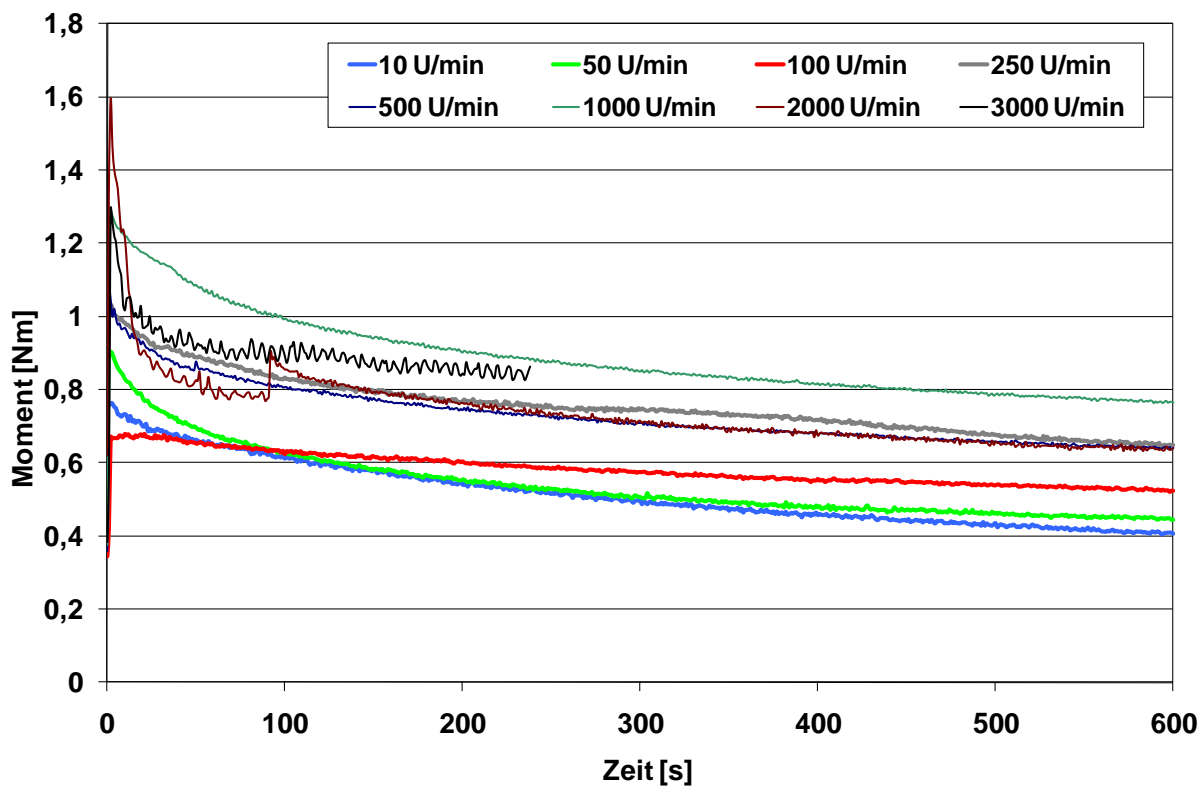


Bild 96: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fett F, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 7 Lamellen

7.1.1.4 Einfluss der radialen Dichtsystemhöhe auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Nachfolgend wird die radiale Dichtsystemhöhe bei Fett C variiert. Der Außendurchmesser bleibt erhalten, der Innendurchmesser des Dichtsystems wird in drei Stufen verändert. Dichtsysteme mit einem Innendurchmesser von 68, 80 und 90 mm wurden untersucht (Bild 70 und Tabelle 7).

Das Moment wurde bei 68 und 80 mm bei allen Drehzahlen gehalten, es hat sich ein horizontaler und ruhiger Kurvenverlauf eingestellt. Bei 90 mm allerdings wurde auch Fett C bei hohen Drehzahlen sofort aus dem Spalt gefördert. Bei 90 mm Innendurchmesser und einer radialen Spalthöhe von 1 mm zwischen Lamelle und der gegenüberliegenden Wandung bleibt eine radiale Überdeckung der Lamellen von 3 mm.

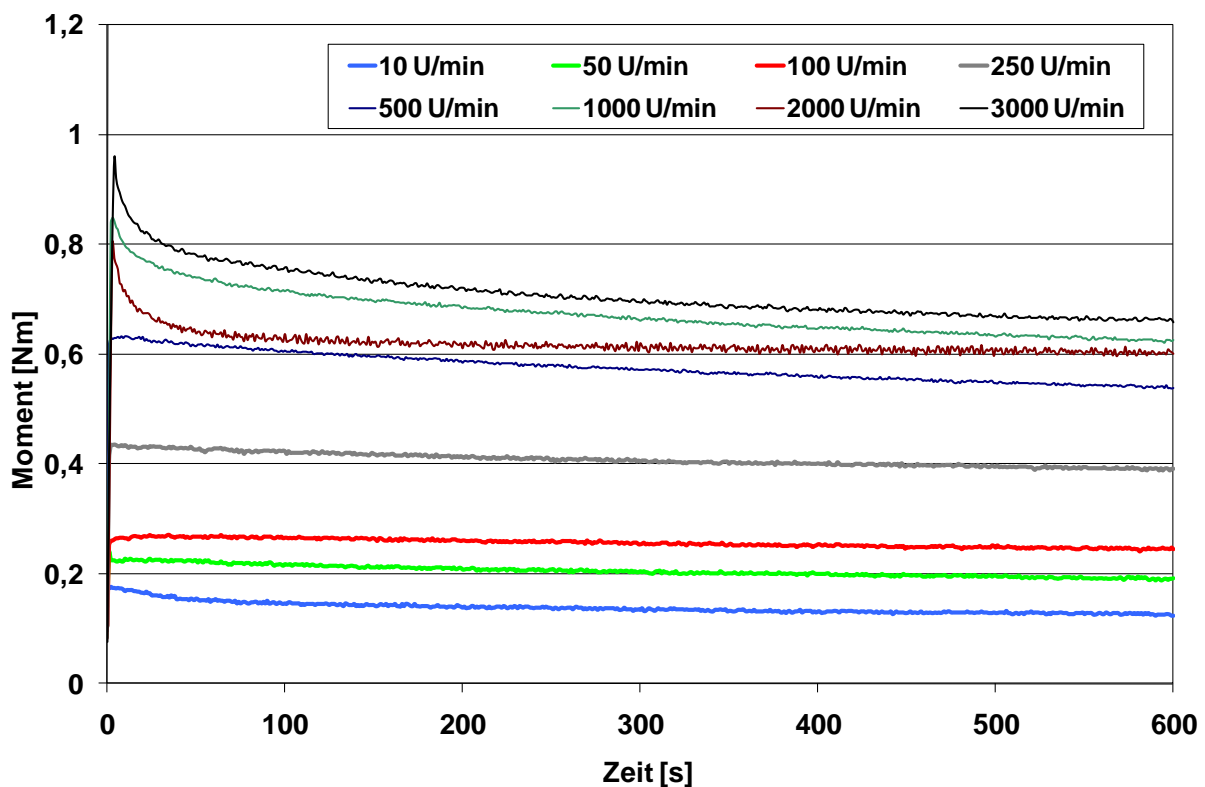


Bild 97: Momentverläufe Dichtsystem 4, Fett C, \varnothing 68 mm innen, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 7 Lam.

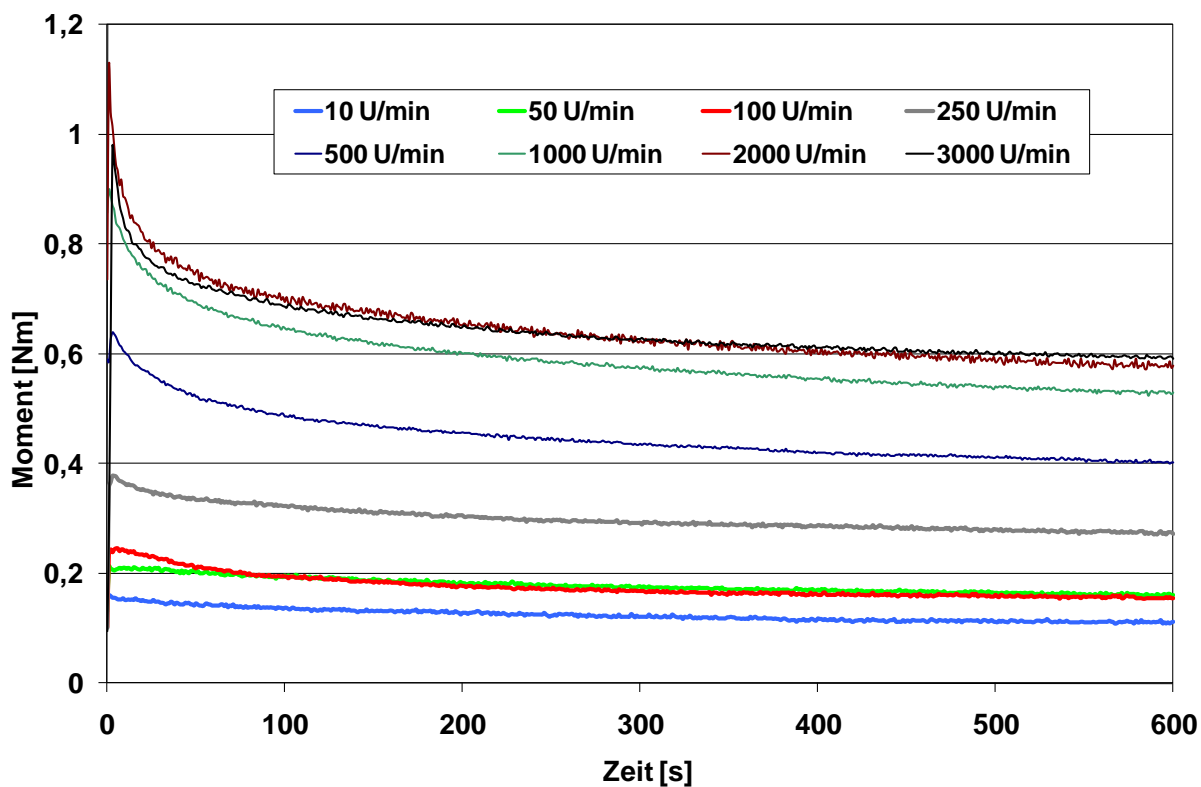


Bild 98: Momentverläufe Dichtsystem 18, Fett C, Ø 80 mm innen, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 7 Lam.

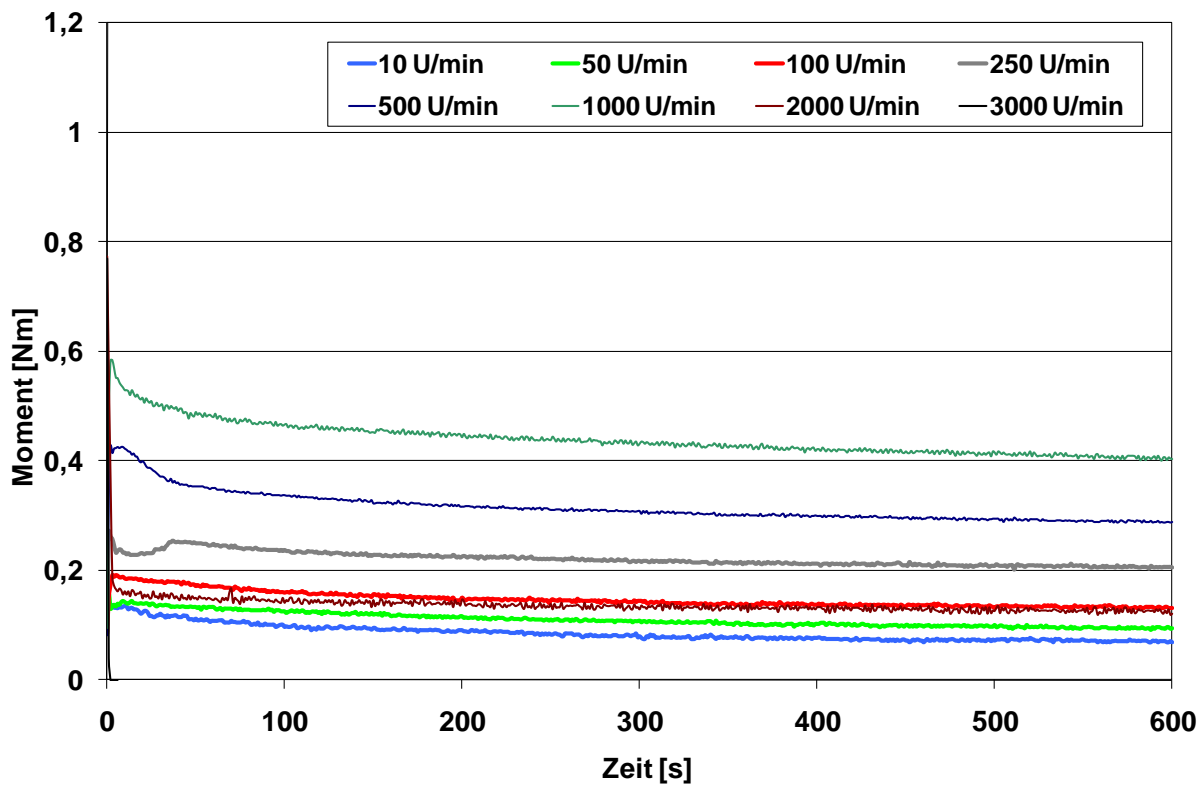


Bild 99: Momentverläufe Dichtsystem 32, Fett C, Ø 90 mm innen, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 7 Lam.

7.1.1.5 Fettverteilung auf den Komponenten von Dichtsystem 1 bei unterschiedlichen Fetten

Am Ende der Kurzzeitversuche wurden die Dichtsysteme zerlegt und die Fettverteilung auf den einzelnen Komponenten untersucht und dokumentiert. Nachfolgend wird die Fettverteilung nach den Kurzzeitversuchen mit 3000 min^{-1} nach Fetten geordnet bei Dichtsystem 1 vorgestellt. Dichtspaltgeometrie siehe Bild 70 und Tabelle 7.

Dichtsystem 1 und Fett A Klüberbio M 72-82:

Bei Fett A hat sich während des Versuchs am sichtbaren Dichtspaltende ein dicker Fettkragen ausgebildet (Bild 100). Der Fettkragen war aber zuletzt unbewegt, was am geöffneten Spalteingang (zum Rotor hin) abgelesen werden kann.

Bild 101 zeigt bei abgenommener vorderer Dichtlamelle die erste fast völlig fettfreie Rotorlamelle.



Bild 100: Fettkragen, Fett A



Bild 101: Rotorlamelle, Fett A

In ausgebautem Zustand kann auf die Innenseite der ersten Statorlamelle geblickt werden (Bild 102).

Hier zeigt sich ein dicker, über einen Millimeter hoher Fettfilm. Obwohl das Moment bei diesem Versuch auf den Momentnullpunkt gefallen war, hat sich der Spalt nicht vollständig entleert, sondern nur soweit, bis sich ein Luftspalt zwischen dem fast fettfreien Rotor (Bild 103) und dem Stator ausgebildet hatte.

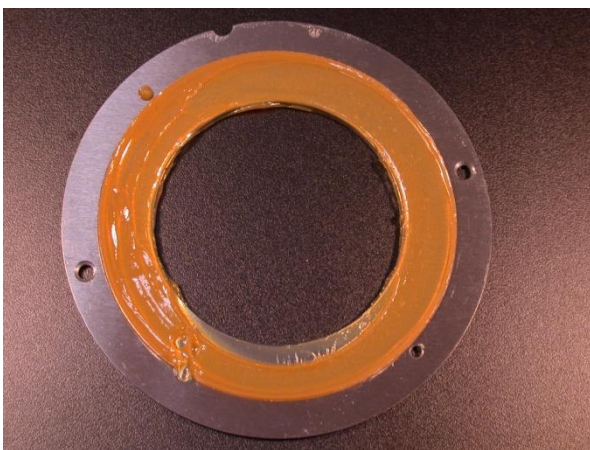


Bild 102: Fettverteilung auf Statorlamelle, Fett A



Bild 103: Fettverteilung auf Rotorlamelle, Fett A

In Bild 104 sind kleine Lufteinschlüsse auf der weiter im Dichtsystem innenliegenden nächsten Statorlamelle sichtbar. Auffällig ist auch der völlig geöffnete Dichtspalt am Rotor.

Bild 105 zeigt die gleichmäßige Fettverteilung auf allen gleichen Bauteilen. Oben: Alle fettfreien Rotorlamellen. Unten: Die mit Fett bedeckten Statorlamellen.



Bild 104: Lufteinschlüsse im Fett auf Stator



Bild 105: Fettverteilung, Fett A

Dichtsystem 1 Fett B SKF LGEP 2:

Die Bilder der Fettverteilung von Fett B sind zur besseren Vergleichbarkeit in identischer Reihenfolge wie bei Fett A angeordnet:

Bild 106 zeigt den großen Fettkragen mit geöffnetem Eingangspalt. Bei abgenommener erster Statorlamelle wird die Sicht frei auf die Rotorlamelle (Bild 107). Hier wirkt die Fettbenetzung etwas gröber.



Bild 106: Fettkragen, Fett B



Bild 107: Rotorlamelle, Fett B

In Bild 108 und Bild 109 ist die Fettverteilung auf Stator- und Rotorlamelle dargestellt. Es befindet sich eine dicke Fettschicht auf der Statorlamelle, der Rotor dagegen ist fast fettfrei.

Bei der Nahaufnahme des Fettfilms auf der Statorlamelle (Bild 110) fällt auf, dass bei Fett B weniger Lufteinschlüsse zu finden sind als bei Fett A. Die Fettverteilung auf den einzelnen Teilen (Bild 111) ist identisch wie bei Fett A. Links befinden sich die Statorlamellen, rechts die Rotorlamellen.



Bild 108: Fettverteilung auf Statorlamelle, Fett B



Bild 109: Fettverteilung auf Rotorlamelle, Fett B

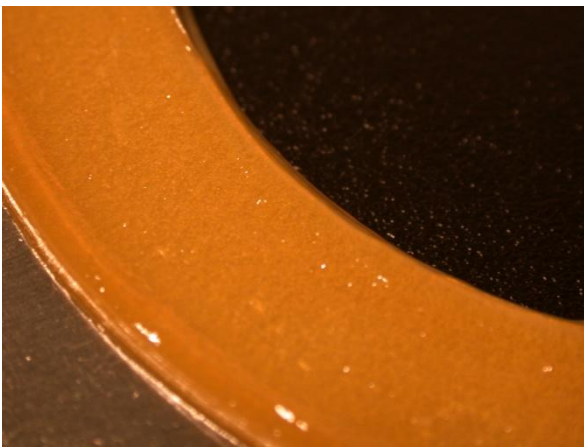


Bild 110: Fett auf Stator, Fett B



Bild 111: Fettverteilung, Fett B

Dichtsystem 1 Fett C Klüber ISOFLEX TOPAS NCA 5051:

Die Momentkurven bei hohen Drehzahlen haben bei Fett C eine ganz andere Charakteristik als bei den anderen beiden Fetten. Auch bei der Fettverteilung wird dieses Verhalten sichtbar.

Der Fettkragen auf Bild 112 ist klein und glatt. Es kam viel weniger Fett aus dem Spalt. Auch hier ist der Spalteingang geöffnet. Bild 113 zeigt den komplett mit Fett benetzten Rotor.



Bild 112: Fettkragen, Fett C

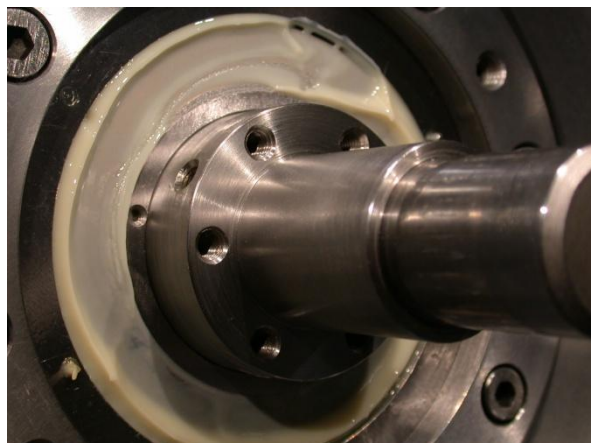


Bild 113: Rotorlamelle, Fett C

Auch die Axialspalte sind bis auf eine kleine offene Stelle mit Fett gefüllt. Entsprechend stellt sich die Fettverteilung auf den ausgebauten Teilen auf Bild 114 und Bild 115 dar.



Bild 114: Fettverteilung auf Statorlamelle, Fett C



Bild 115: Fettverteilung auf Rotorlamelle, Fett C

Bild 116 zeigt die Statorlamelle. Auf Bild 117 sind oben die Rotorlamellen und unten die Statorlamellen zu sehen. Alle Teile sind bei Versuchsende mit Fett benetzt und haben vom Ausbau abstehende Fettnasen, was auf einen mit Fett geschlossenen Dichtspalt bis zum Schluss schließen lässt.

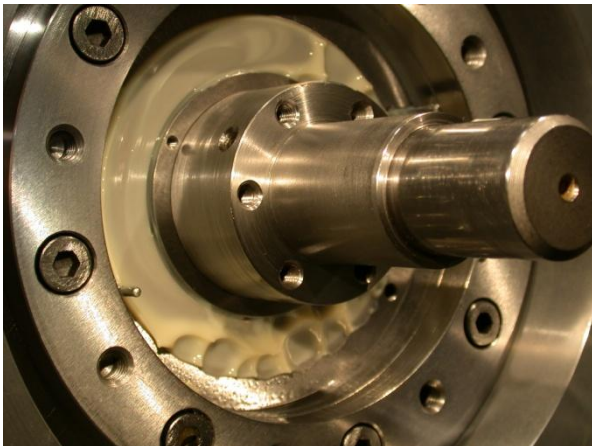


Bild 116: Statorlamelle, Fett C



Bild 117: Fettverteilung, Fett C

7.1.1.6 Langzeitversuche

Langzeitversuche (Beschreibung in Kapitel 6.1.2.2) wurden nur bei Versuchen mit Fett C durchgeführt. Das Diagramm in Bild 118 zeigt die Drehzahl- und Momentkurven zu ausgewählten Versuchszeiten. Hier wurden der Übersichtlichkeit wegen nur jeweils die positiven Drehzahl- und Momentbereiche des Versuchszyklus dargestellt. Die Momentkurven sind blau, die zugehörigen Drehzahlkurven grün dargestellt. Im Diagramm ist auf der linken Seite das Moment aufgetragen, rechts die Drehzahl. Die dargestellten Messzeitpunkte sind direkt nach dem Start, am 2., 5., 10. und am 15. Versuchstag. Es fällt auf, dass der Momentabfall zu Beginn am größten ist.

Das Moment ist direkt Drehzahlabhängig und fällt stetig über der Versuchszeit, aber auch nach 15 Tagen ohne Nachschmierung ist noch ein Restmoment vorhanden. Der Momentabfall gegenüber dem Start hat drei Ursachen. Erstens steigt die Temperatur nach dem Start an, was eine Abnahme der Viskosität des Fetts zur Folge hat. Zweitens sinkt der Fettspiegel im System ab. Drittens verändert sich auch das Fett etwas bei dieser Scherbeanspruchung über den langen Zeitraum. Das entnommene Fett war erheblich niedrigviskoser als Frischfett vom selben Typ. Dieser Dauerversuch zeigt, dass bei einer entsprechenden Dichtspalt-Fettkombination ein Dichtspalt auch über viele Tage hinweg geschlossen bleiben kann.

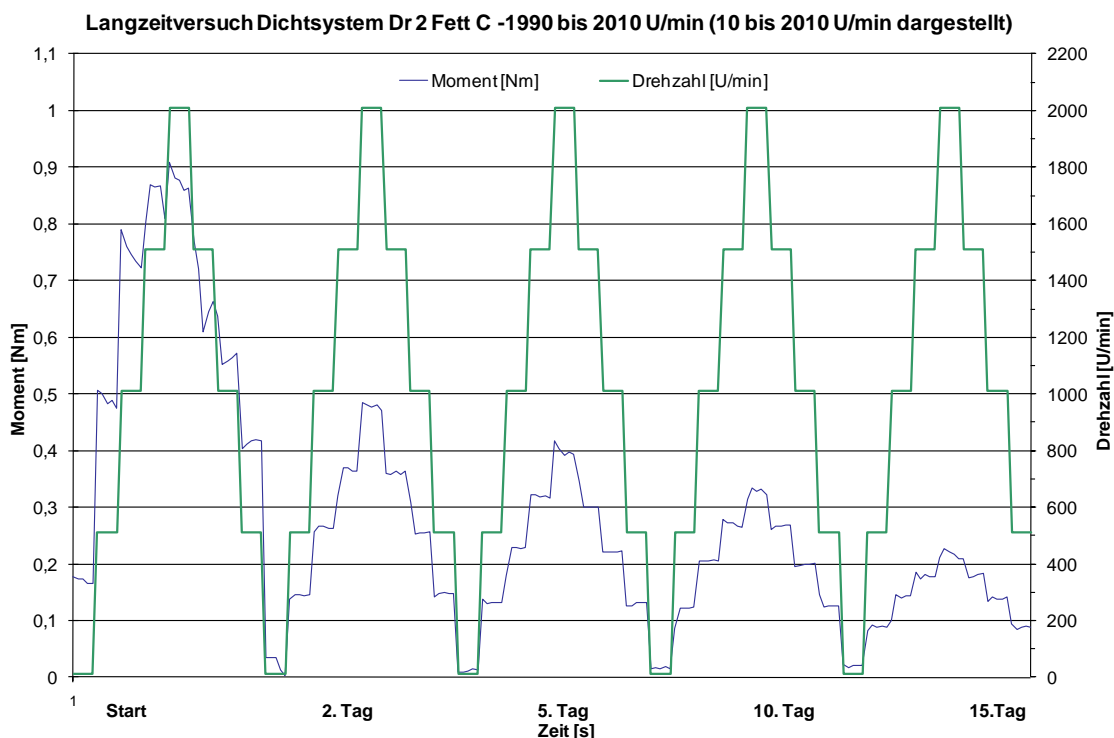


Bild 118: Langzeitversuch Dr 2 Fett C, 0,75 mm Spalthöhe

7.1.1.7 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse der Innenrotor-Dichtsysteme

Die Verweildauer eines geschlossenen Dichtspaltes kann in weiten Grenzen durch die folgenden Stellgrößen variiert werden:

- Niedrigviskosere Fette vergrößern diese Verweildauer.
- Kleinere axiale Dichtspalthöhen vergrößern diese Verweildauer.
- Bei Erhöhung der Lamellenanzahl vergrößert sich diese Verweildauer.
- Durch radial zum größeren Durchmesser hin gerichtete Spalte mit offenem Ende können Spaltbereiche bewusst geöffnet werden.
- Kleine radiale Spallängen verkürzen die Verweildauer.

Hat sich ein Dichtspalt geöffnet, so ist keinesfalls das gesamte Fett ausgetreten, sondern nur so viel, dass sich ein Engspalt zwischen Rotor und Stator mit entsprechender Fettauflage ausbilden konnte. Bei hohen Drehzahlen besitzt der Stator eine dicke Fettauflage, auf dem Rotor ist die Fettschicht eher dünn. Eine Restfettbenetzung ist aber dennoch auch auf dem Rotor vorhanden. Bei entsprechender Dichtspalt-Fettkombination kann ein Dichtspalt über viele Tage geschlossen bleiben.

7.1.2 Versuchsergebnisse Radialspalt-Dichtsysteme außenrotierend

Bei den Kurzzeitversuchen (Kapitel 6.1.2.1) der Dichtsysteme AU 1 bis AU 4 (Beschreibung in Kapitel 6.1.3.2) mit 5 Lamellen und der Dichtsysteme AU 22 bis AU 24 (Beschreibung in Kapitel 6.1.3.2) mit 3 Lamellen kann am Momentkurvenverlauf eine Aussage über die Zustände im Dichtspalt gemacht werden. Generell gilt: Ein horizontaler Kurvenverlauf mit genügend großem Restmoment über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg lässt auf einen zumindest größtenteils geschlossenen Dichtspalt schließen. Die Zustände im Spalt können als stabil bezeichnet werden (Bild 118 und Bild 120). Rückschlüsse auf eine mögliche Dichtwirkung gegenüber Verschmutzung kön-

nen daraus aber nicht gezogen werden. Folgende Einflüsse an außenrotierenden Dichtspaltsystemen auf den Spaltzustand sollen im Anschluss beschrieben und an Hand der Diagramme gezeigt werden:

- Einfluss der Fette unterschiedlicher Konsistenz auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der Lamellenanzahl auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der axialen Dichtspalthöhe auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.

Werden nun die Kurvenverläufe der Dichtsysteme AU 1 bis AU 4 betrachtet, so können auch beim Außenrotor-Dichtsystem gewisse Tendenzen abgeleitet werden. Untersucht wurden die Fette A bis F. Stellvertretend soll hier auf die Kurven der Fette A und C eingegangen werden. Generell ist die Verweildauer eines geschlossenen Dichtspaltes beim Außenrotor-Dichtsystem etwas größer als bei den bereits vorgestellten Versuchen der Innenrotordichtsysteme von Kap. 7.1.1.

7.1.2.1 Einfluss der Fette unterschiedlicher Konsistenz auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Niedrigviskose Fette bleiben generell besser im Dichtspalt. Durch ihr flüssigkeitsähnlicheres Verhalten kann sich eine stabile Zirkulationsströmung im Dichtsystem aufbauen (vgl. jeweils Fett A mit Fett C beim selben Dichtsystem z. B. Bild 119 mit Bild 120). Bei sehr langsamen Schergeschwindigkeiten (10 min^{-1} und 50 min^{-1}) hat das Fett genügend Zeit den bewegten Wandungen zu folgen, und ein Moment bleibt meist erhalten (Bild 123). Bei Drehzahlen zwischen 100 min^{-1} und 1000 min^{-1} ist die Scherung im Spalt genügend groß, dass das Fett nicht mehr folgen kann und sich aufgrund von Luftblasen Fett und der damit verbunden unterschiedlichen Viskositätsverteilung über der Dichtspalthöhe aus dem Spalt zu schieben beginnt (siehe Kapitel 7.2.3). Die auf das Fett einwirkenden Fliehkräfte sind bei diesen Drehzahlen noch nicht groß genug, um hier entgegenwirken zu können (Bild 123). Bei höheren Drehzahlen können bei so einem grenzstabilen System wie in Bild 123 wieder stabile Spaltverhältnisse auftreten. Bei 2000 min^{-1} wird vermutlich eine Resonanzfrequenz der Kombination aus Prüfstand und Versuchsdichtsystem getroffen. Die Momentkurven sind hier bei nahezu allen Versuchen mit diesem Dichtungstyp sehr unruhig. Hier ist also rein das Momentniveau von Aussagekraft.

7.1.2.2 Einfluss der Lamellenanzahl auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Werden nun die 3-lamelligen Dichtsysteme AU 22 bis AU 24 (Beschreibung in Kapitel 5.1.1.2) mit den 5-lamelligen AU 1 bis AU 4 verglichen, so finden sich die zuvor beschriebenen Grundtendenzen von Kap. 7.1.1.2 hier auch wieder - nur teilweise noch verstärkt. Die Anfälligkeit für instabile Spaltzustände ist bei 3 Lamellen Dichtsystemen scheinbar größer als bei Systemen mit fünf Lamellen. Gerade in der Startphase bevor sich eine stabile Strömung im Spalt aufgebaut hat oder überhaupt aufbauen kann, kommt dies zum Tragen (vgl. Bild 125). Bei 3000 min^{-1} gelingt hier ein stabiler Dichtspalt. Bei anderen Drehzahlen darunter nicht. Weitere Lamellen in einem Dichtsystem wirken quasi als Dämpfer gegenüber Störgrößen.

Wird nun das absolute Momentniveau betrachtet, so liegt dies bei den selben Randbedingungen beim 5-Lamellendichtsystem zwar höher als bei dem mit nur drei Lamellen. Es findet aber bei weitem keine Momentverdopplung statt, was bei der Verdoppelung der wirksamen Scherfläche der Lamellen ja rechnerisch zu erwarten gewesen wäre.

7.1.2.3 Einfluss der axialen Dichtspalthöhe auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Übereinstimmend mit den Innenrotor-Dichtsystemen von Kap. 7.1.1.3 nimmt auch hier die Verweildauer meist mit abnehmender Dichtspalthöhe zu. Sie erreicht bei Dichtsystem 3 mit einer Spalthöhe zwischen den Lamellen von 1 mm ihr Optimum. (vgl. Abbildungen Bild 120, Bild 122, Bild 124, Bild 126 bei Fett C und Bild 119, Bild 121, Bild 123, Bild 125, bei Fett A).

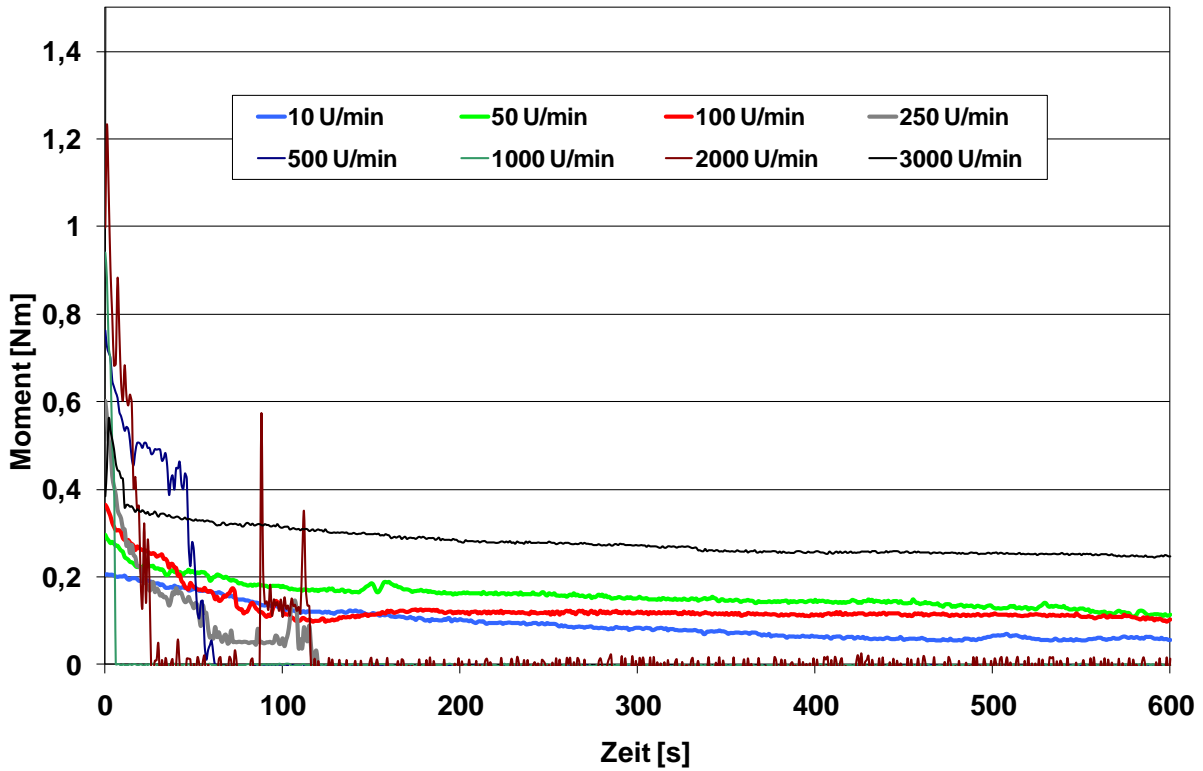


Bild 119: Momentverlauf Dichtsystem AU 1, Fett A, 2 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

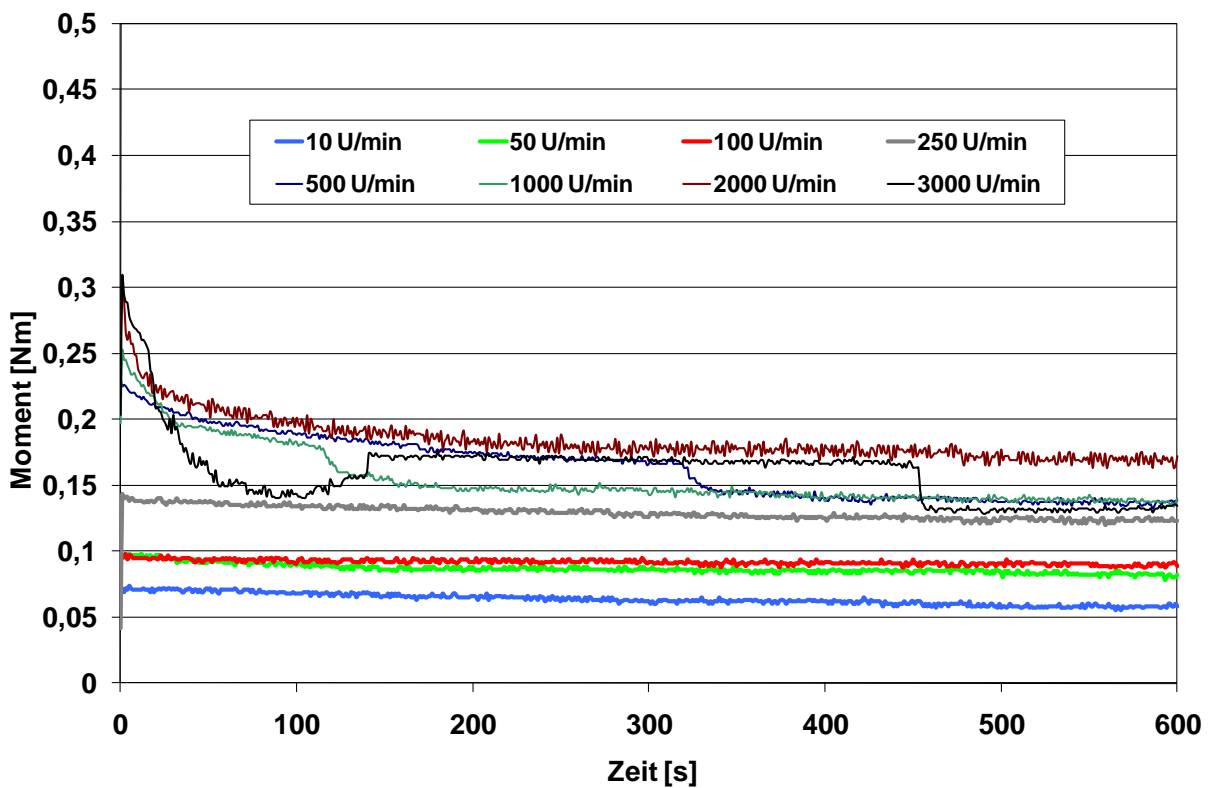


Bild 120: Momentverlauf Dichtsystem AU 1, Fett C, 2 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

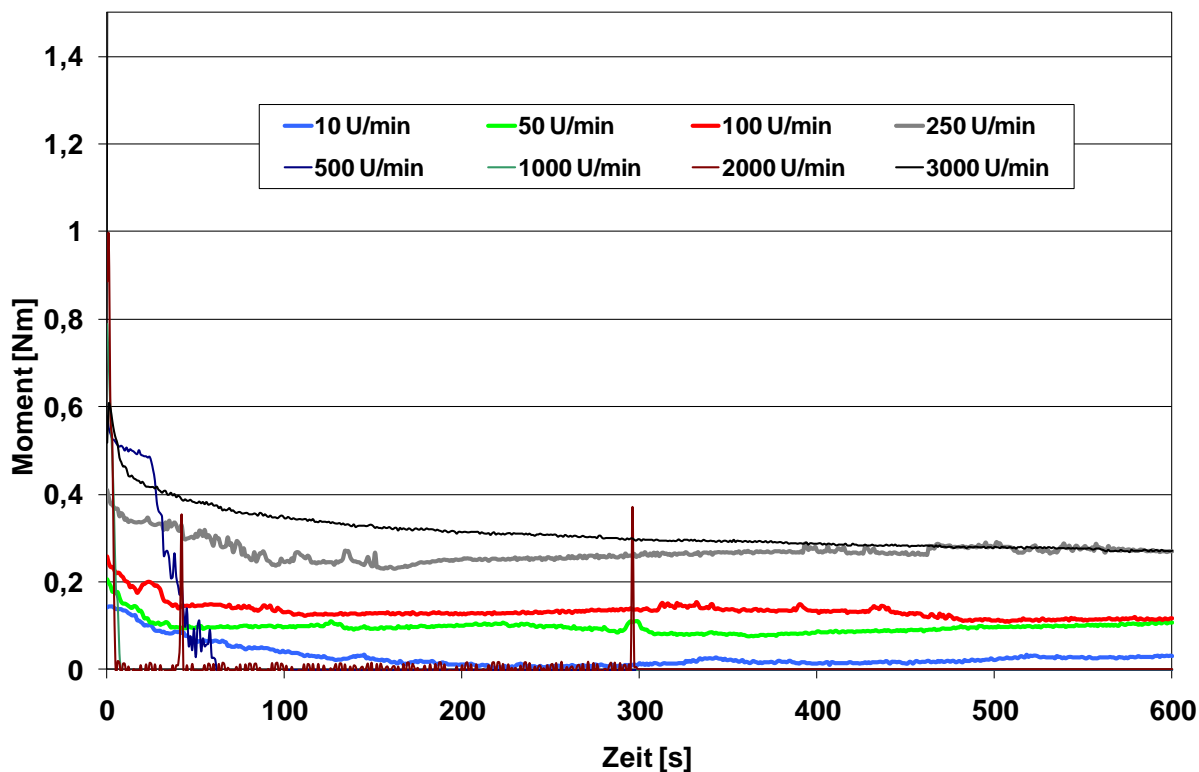


Bild 121: Momentverlauf Dichtsystem AU 2, Fett A, 1,5 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

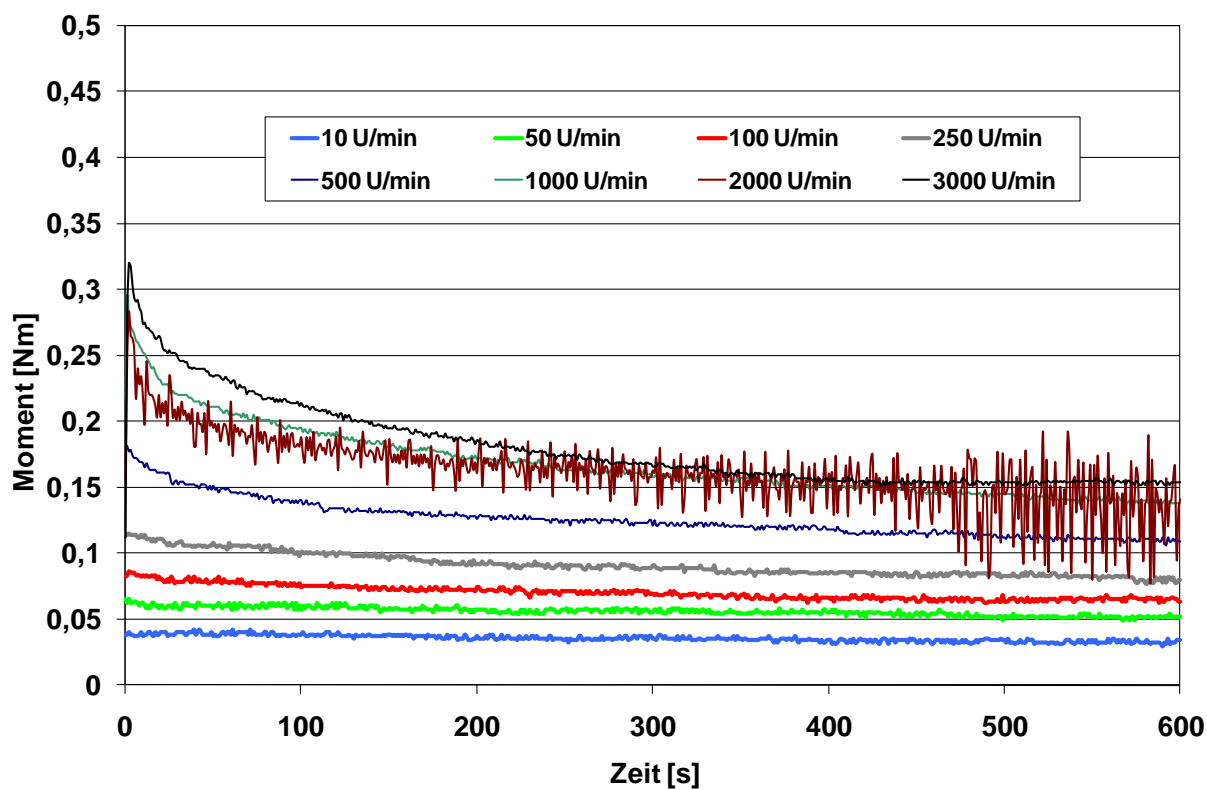


Bild 122: Momentverlauf Dichtsystem AU 2, Fett C, 1,5 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

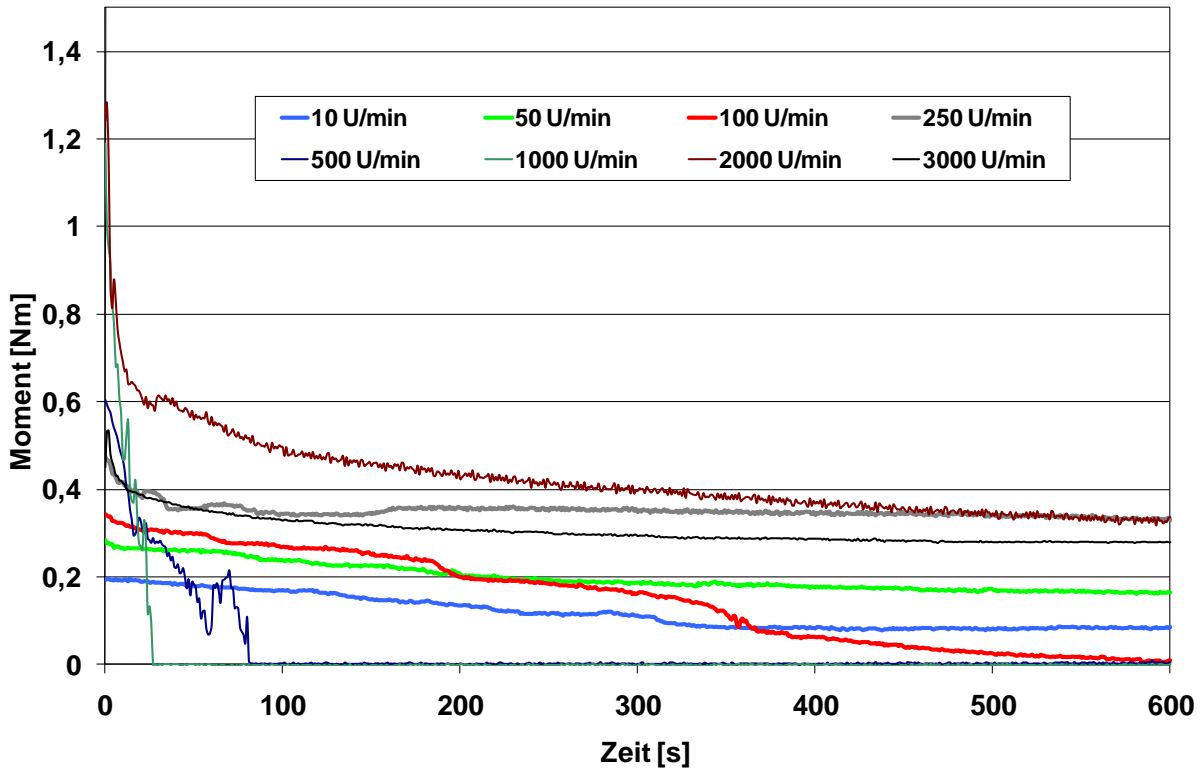


Bild 123: Momentverlauf Dichtsystem AU 3, Fett A, 1 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

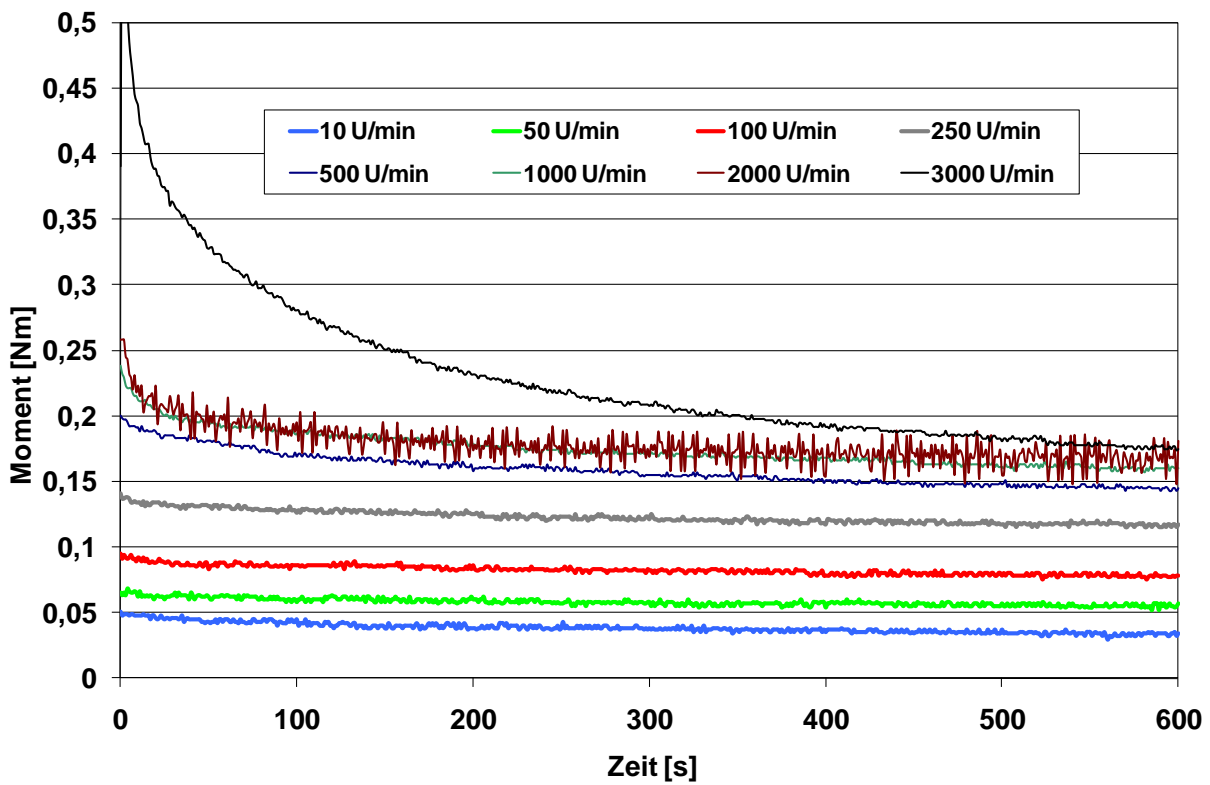


Bild 124: Momentverlauf Dichtsystem AU 3, Fett C, 1 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

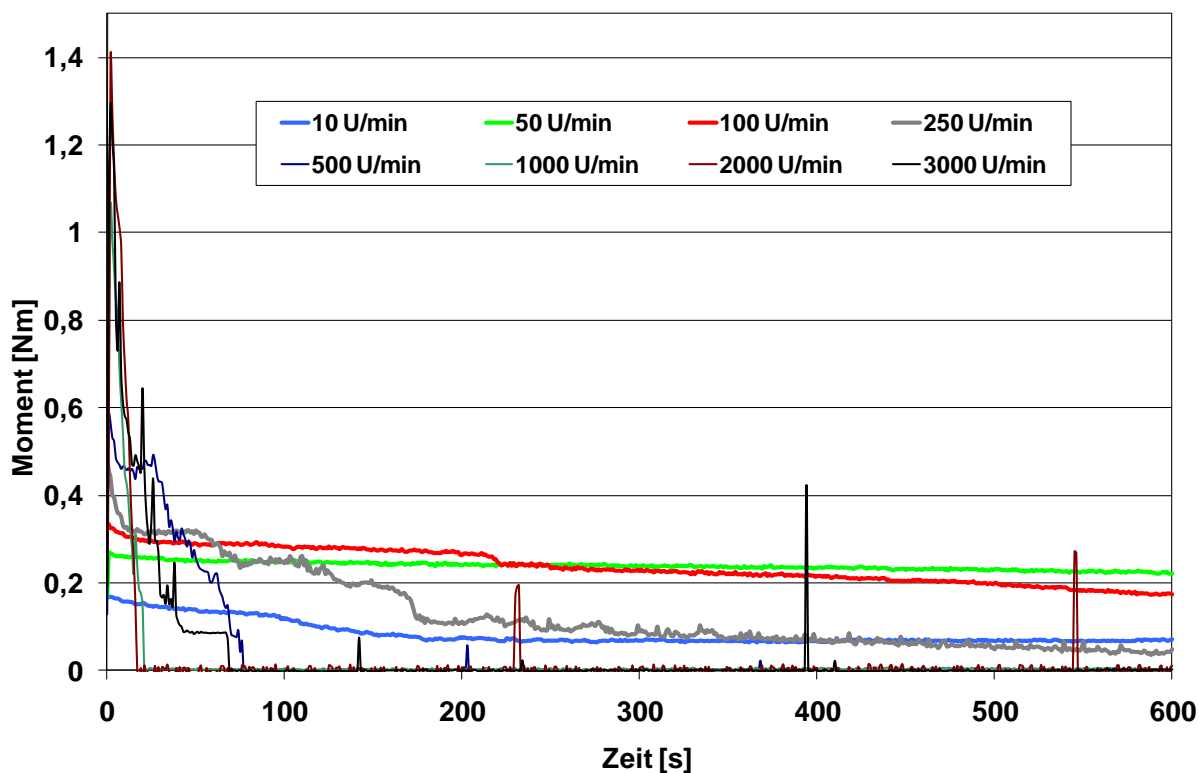


Bild 125: Momentverlauf Dichtsystem AU 4, Fett A, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

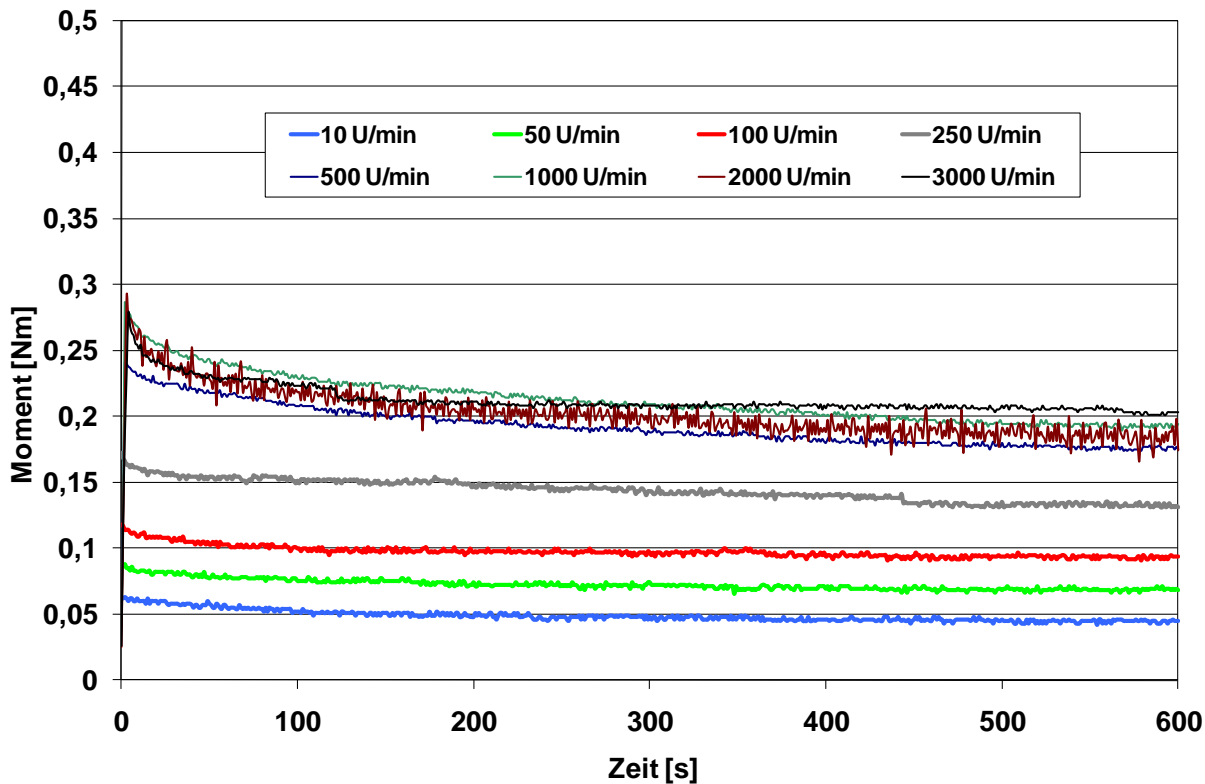


Bild 126: Momentverlauf Dichtsystem AU 4, Fett C, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 5 Lamellen

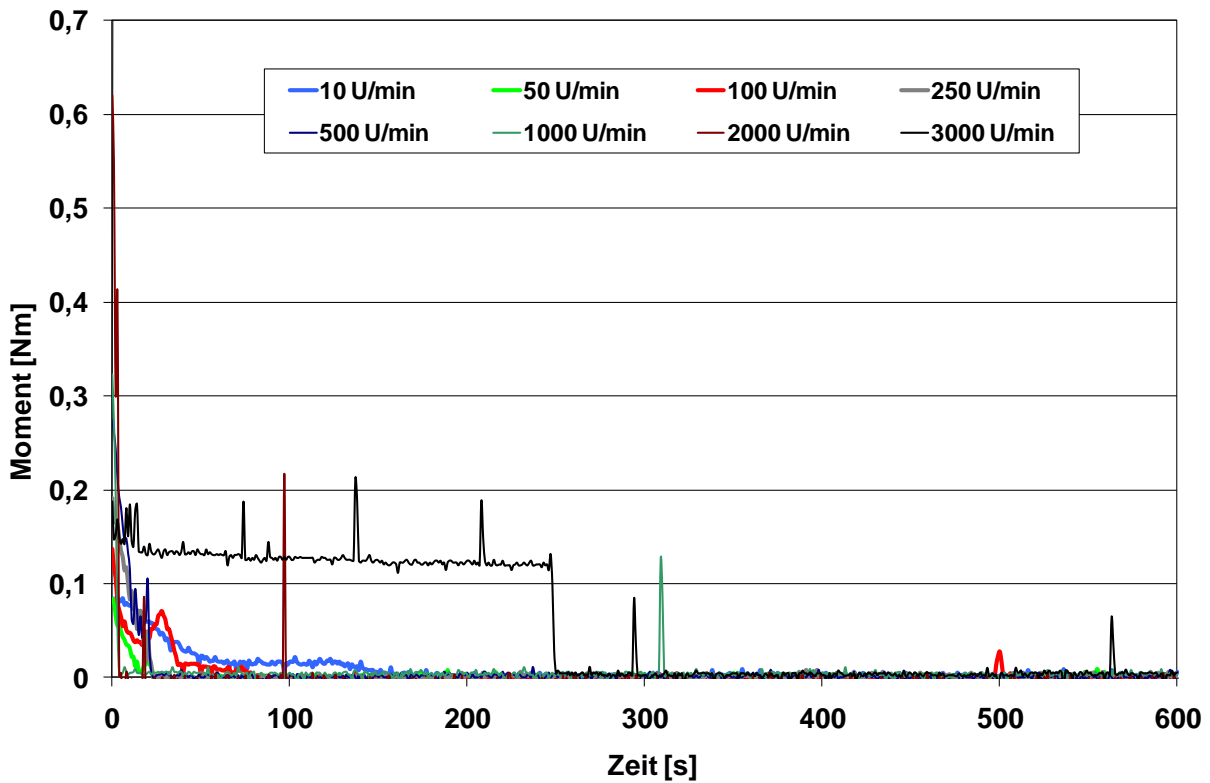


Bild 127: Momentverlauf Dichtsystem AU 22, Fett A, 1,5 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

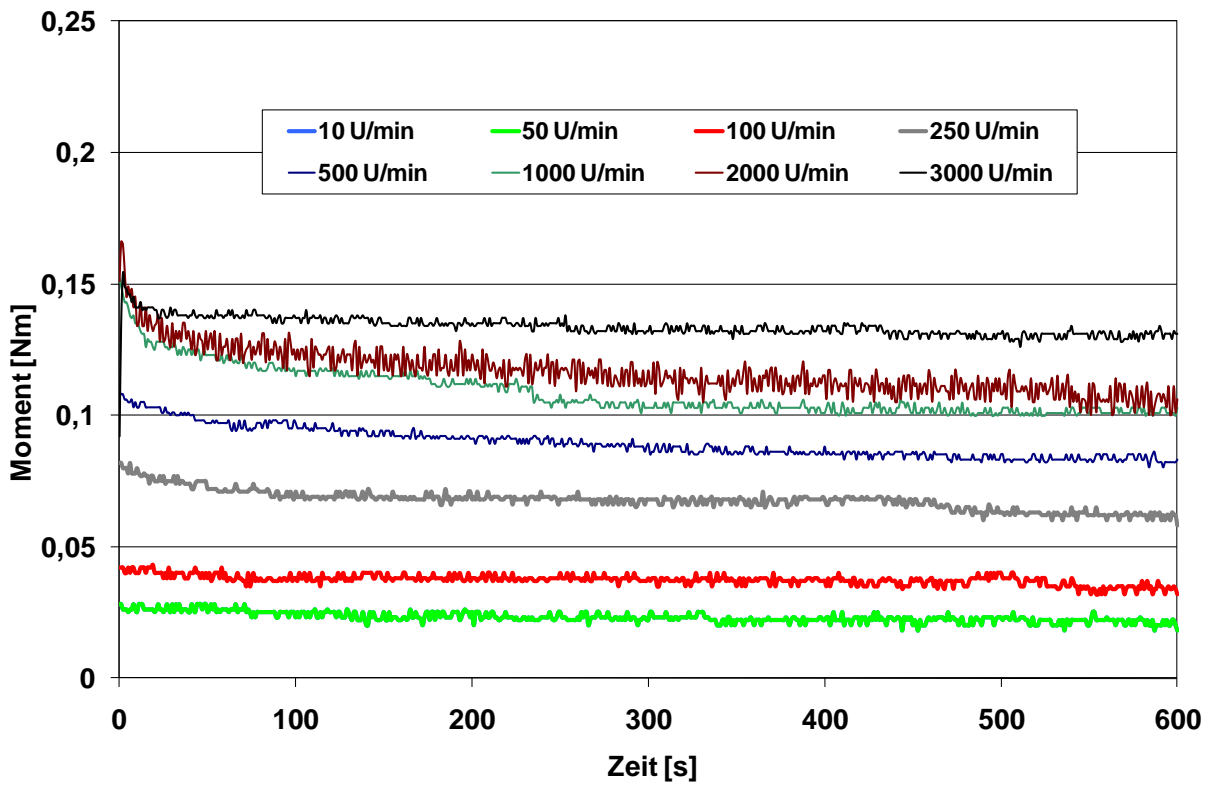


Bild 128: Momentverlauf Dichtsystem AU 22, Fett C, 1,5 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

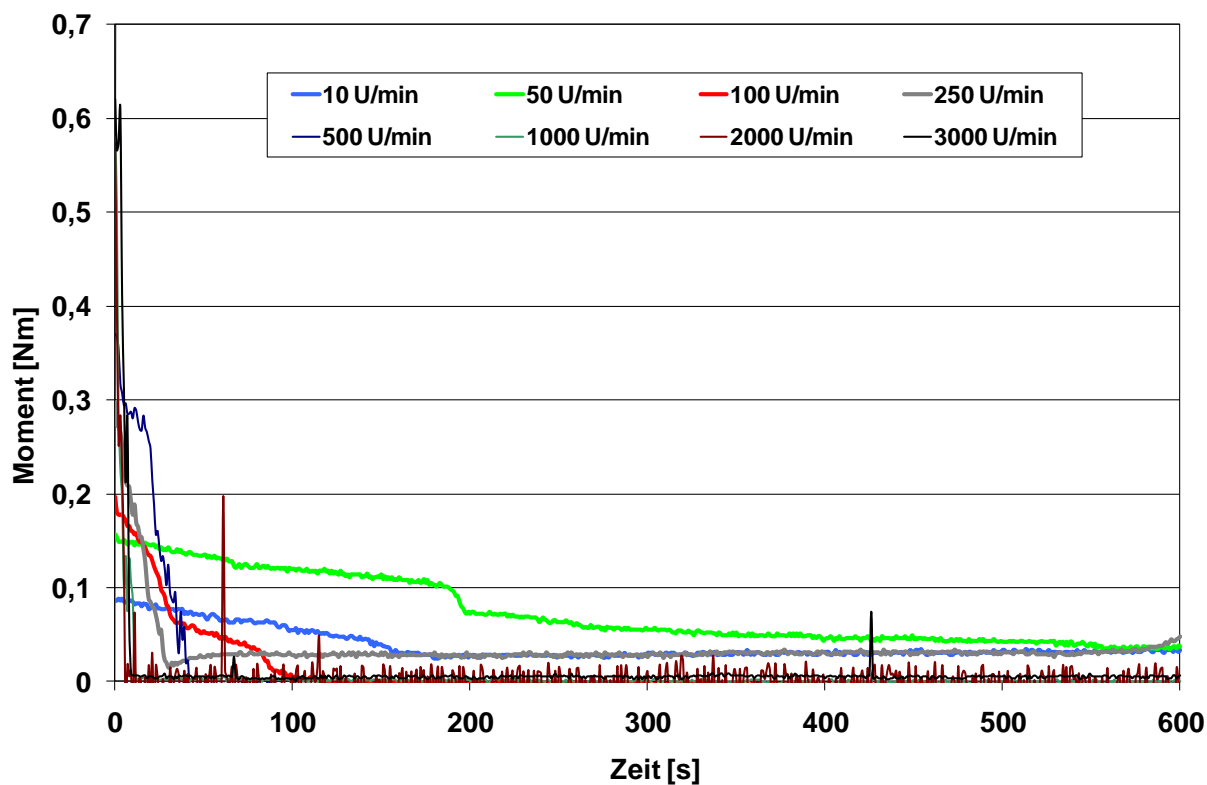


Bild 129: Momentverlauf Dichtsystem AU 23, Fett A, 1 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

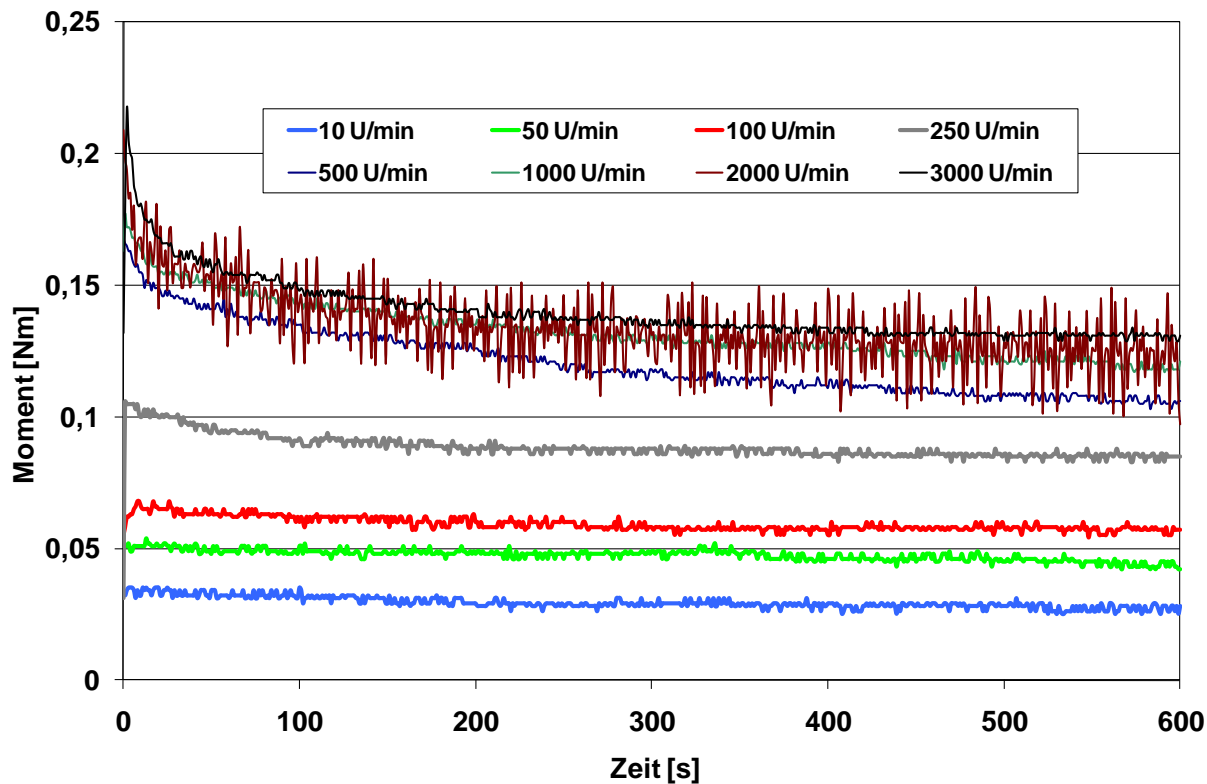


Bild 130: Momentverlauf Dichtsystem AU 23, Fett C, 1 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

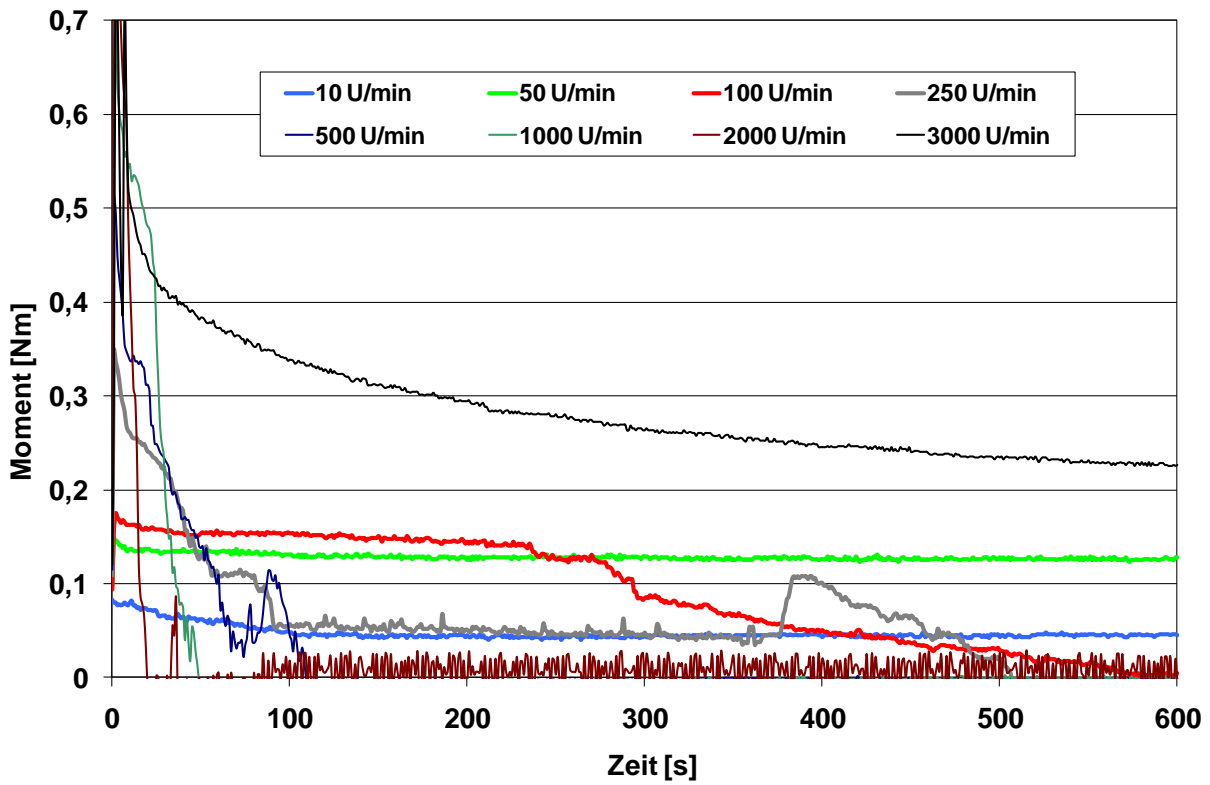


Bild 131: Momentverlauf Dichtsystem AU 24, Fett A, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

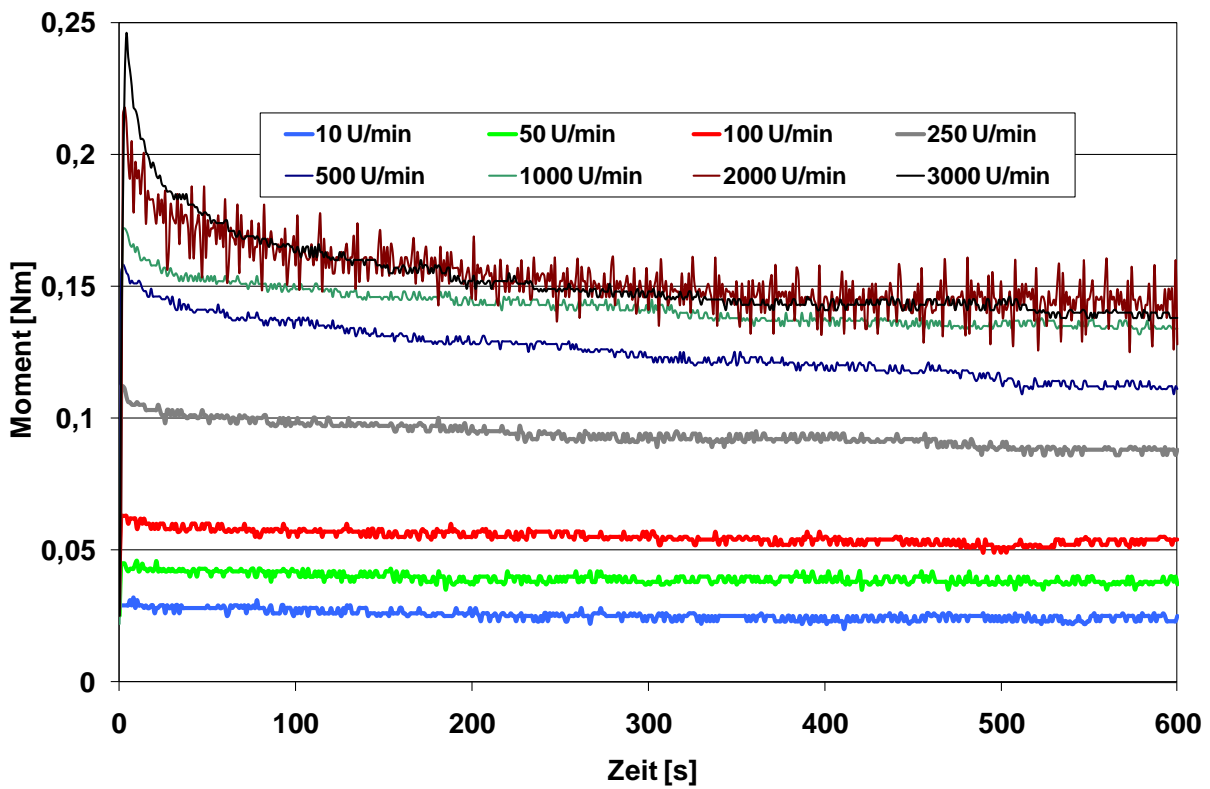


Bild 132: Momentverlauf Dichtsystem AU 24, Fett C, 0,75 mm axiale Spalthöhe, 3 Lamellen

7.1.2.4 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse der Außenrotor-Dichtsysteme:

Die Verweildauer eines geschlossenen Dichtspaltes kann in weiten Grenzen durch die folgenden Stellgrößen variiert werden:

- Niedrigviskosere Fette vergrößern diese Verweildauer.
- Kleinere axiale Dichtspalthöhen vergrößern diese Verweildauer.
- Größere Lamellenanzahl stabilisiert die Spaltzustände.

Viele der bereits bei den Innenrotor-Dichtsystemen gefundenen Zusammenhänge stimmen mit den Versuchsergebnissen der Außenrotor-Dichtsysteme überein. Jedoch gelingt es bei keiner der beiden Systemvarianten bei allen Drehzahlen einheitliche Spaltverhältnisse (geschlossener oder geöffneter Dichtspalt) herzustellen.

7.1.3 Versuchsergebnisse Axialspalt-Dichtsysteme EIN (einfördernd)

Bei den Kurzzeitversuchen (Kapitel 6.1.2.1) der Axialspalt-Dichtsysteme (Kapitel 6.1.3.3 und Kapitel 6.1.3.4) war das Verhalten des Fetts im Dichtsystem von besonderem Interesse. Diese Dichtspaltgeometrie ist die am häufigsten eingesetzte Bauform von Berührungsfreien Wellendichtungen mit Fettfüllung. Durch die kämmende Spaltgeometrie der Dichtung kann in gewissem Maße einen Längenausgleich vorgenommen werden. Darüber hinaus bietet diese Bauform bei der Montage einen erheblichen Vorteil gegenüber anderen radialen Spaltgeometrien. Durch die Durchmesserverkleinerung des Dichtspaltes, von innen nach außen betrachtet, hat dieser fliehkraftbedingt eine „einfördernde“ Charakteristik. Folgende Einflüsse wurde bei den Axialspalt-Dichtsystemen EIN im Besonderen untersucht:

- Einfluss der Fett-Konsistenz auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der Dichtsystem-Baugröße auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.

7.1.3.1 Einfluss der Fett-Konsistenz auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Werden nun die Ergebnisse der Bauform EIN also mit innenliegendem Rotor betrachtet, so verlaufen bei Fett C alle Momentkurven sehr ruhig und gehen in einen horizontalen Verlauf über (Bild 134, Bild 136 und Bild 138). Es herrschen stabile Verhältnisse im Spalt.

Die Momentkurven bei Fett A und Dichtsystem EIN 01 zeigen ein ähnliches Bild (Bild 133). Nur die Momentkurve bei 500 min^{-1} hat einen starken Abwärtstrend. Trotz der großen Spalthöhe von 2 mm ist bei diesem Dichtsystem ein stabiler Kurvenverlauf möglich. Bei den anderen Dichtsystemen EIN 02 und EIN 03 und Fett A fallen immer mehr Momentkurven zunächst mittlerer Drehzahlen (Bild 135) und dann auch höherer Drehzahlen (Bild 137) auf den Momentnullpunkt.

7.1.3.2 Einfluss der Dichtsystem-Baugröße auf die Haltedauerdauer eines geschl. Dichtspaltes

Bei Fett A führt die Verkleinerung des Dichtsystems zur Verkürzung der Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes (Bild 135 und Bild 137), obwohl mit kleiner werdenden Dichtsystemen sich auch die Dichtspalthöhe stark verringert (EIN 02 hat 1,5 mm Spalthöhe, EIN 03 hat 0,75 mm Spalthöhe). Bei den Untersuchungen der Radialspalt-Dichtsysteme führte die Verringerung der Spalthöhe zu einer Stabilisierung der Verhältnisse im Spalt (Kap. 7.1.1.4). Die radiale und axiale Ausdehnung des Dichtsystems scheint folglich einen großen Einfluss auf die Verweildauer eines geschlossenen Dichtspaltes zu haben. Das Verlustmoment und damit auch die Erwärmung des Fetts im Spalt waren bei dieser Spaltform erheblich. Durch die „einfördernde“ Charakteristik der Spaltgeometrie kann unter bestimmten Umständen auch bei hochviskosen Fetten, wie Fett A, bei nahezu allen Drehzahlen der Dichtspalt geschlossen gehalten werden.

Nach einigen Versuchen wurde die Fettverteilung im Dichtspalt untersucht. Hierbei war bei Fett A der lange axiale Eingangsspalt bei allen Drehzahlen bis auf 10 min⁻¹ geöffnet. Bei Fett C war dieser Dichtsystembereich häufig mit Fett gefüllt.

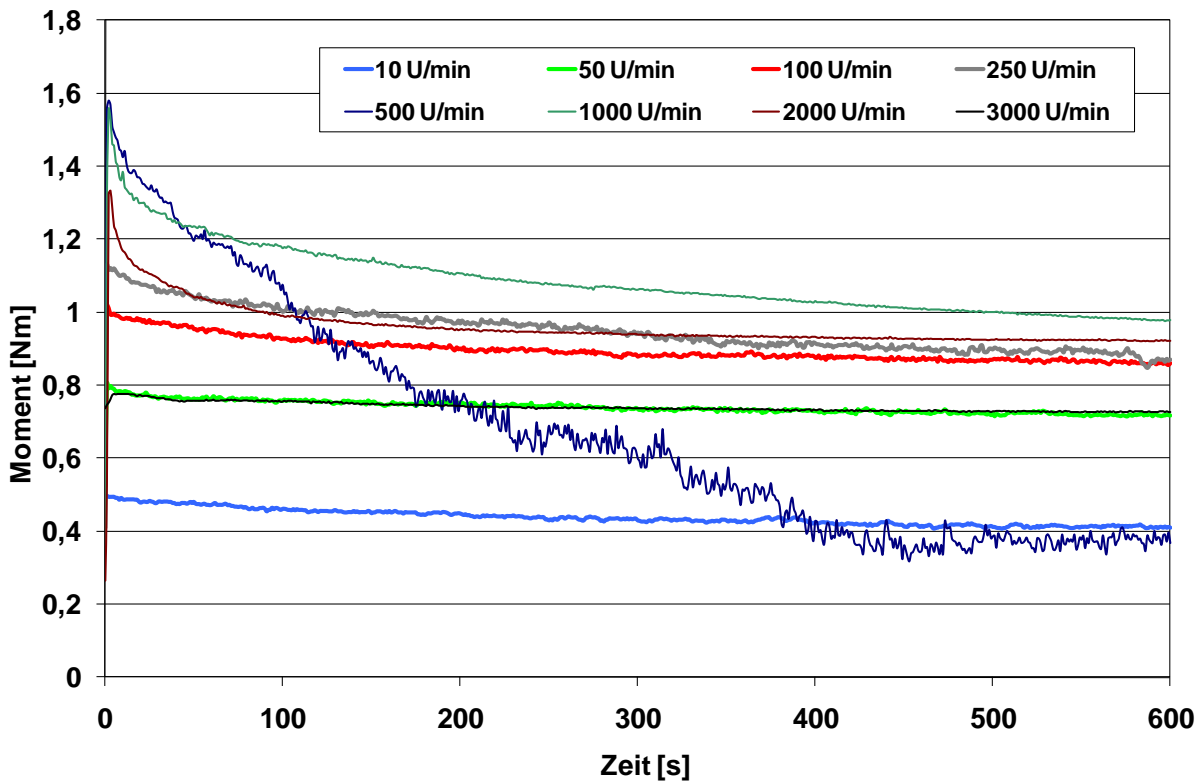


Bild 133: Momentverläufe Dichtsystem EIN 01 bei Fett A, 2 mm Spalthöhe

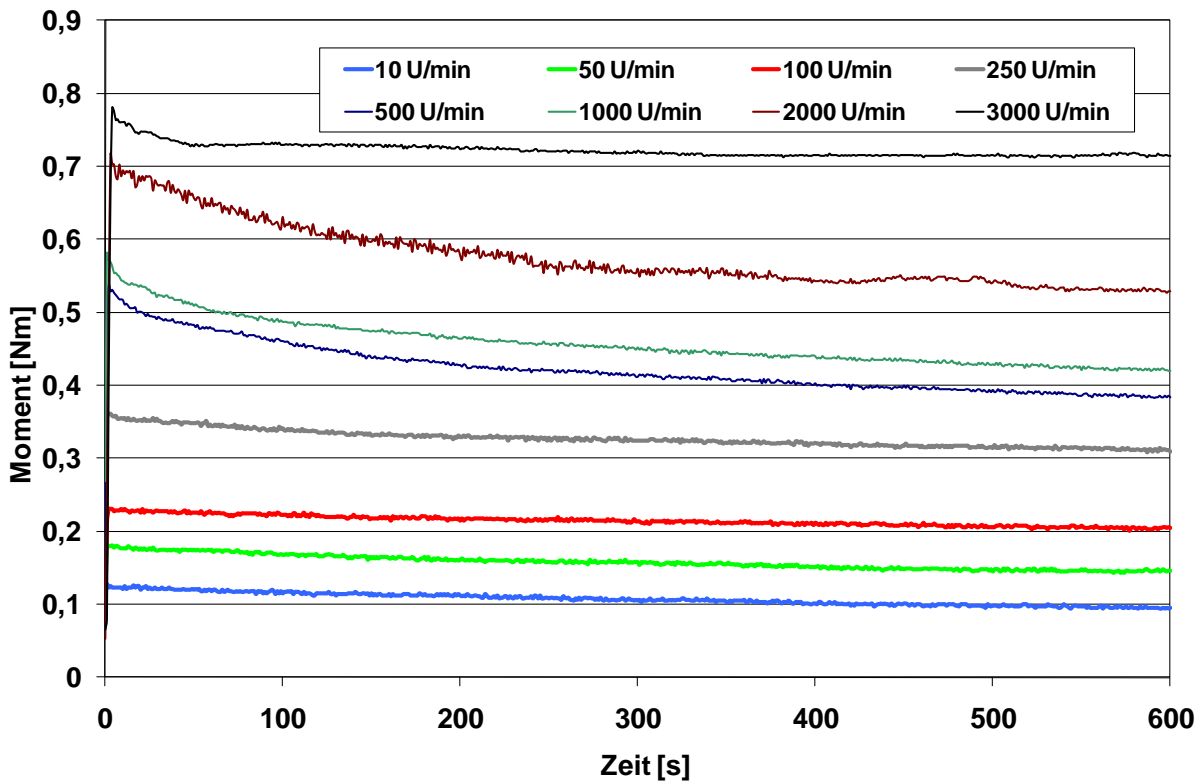


Bild 134: Momentverläufe Dichtsystem EIN 01 bei Fett C, 2 mm Spalthöhe

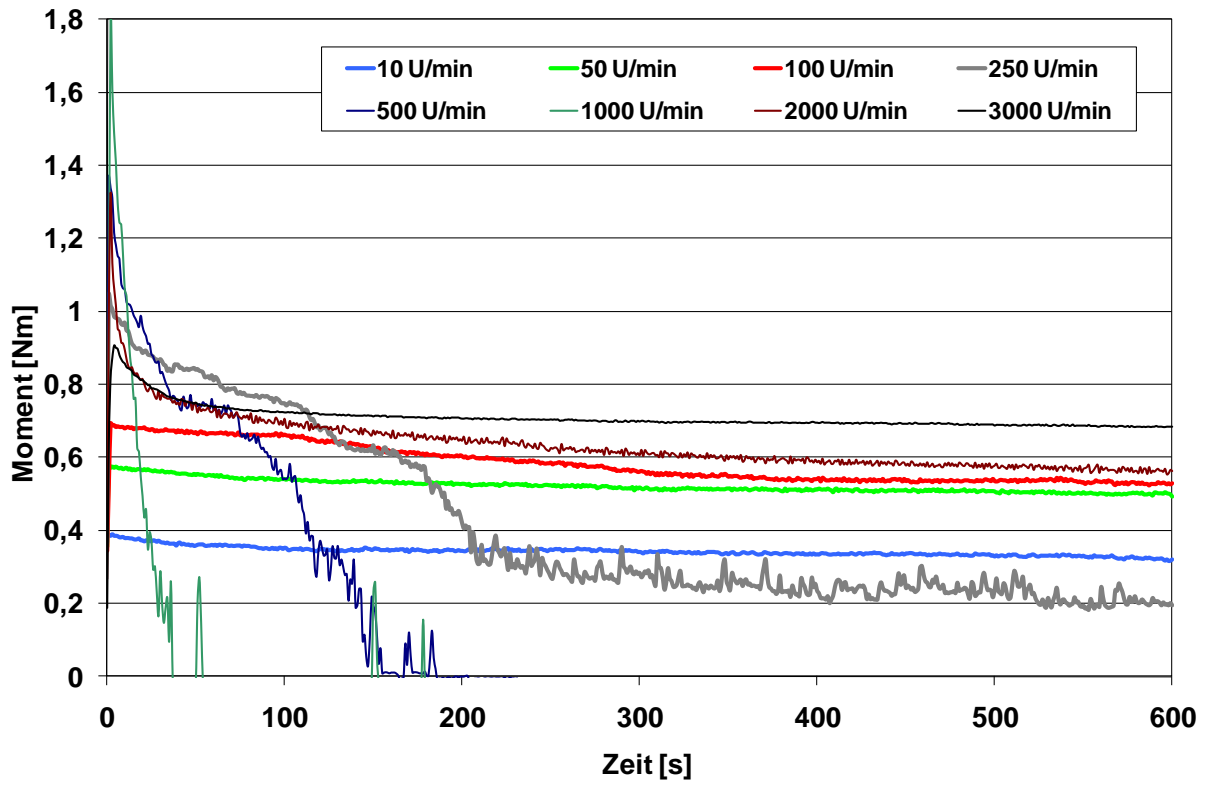


Bild 135: Momentverläufe Dichtsystem EIN 02 bei Fett A, 1,5 mm Spalthöhe

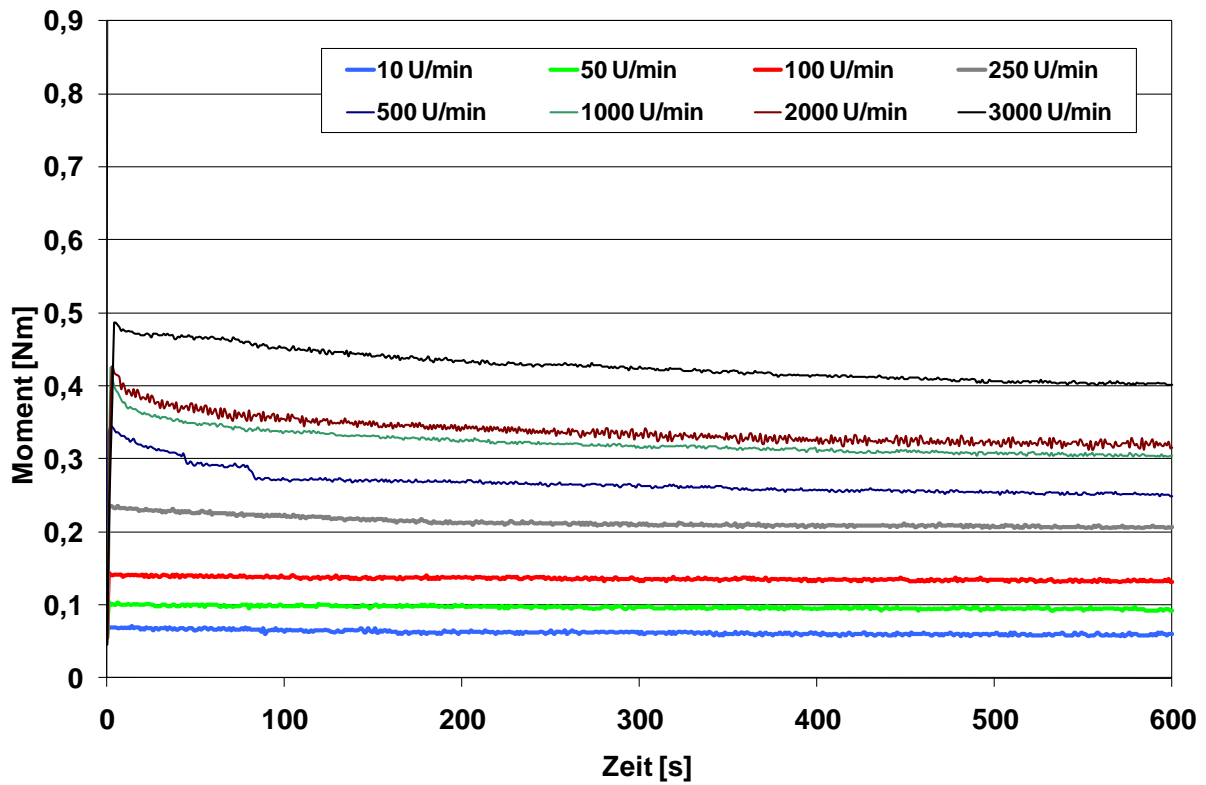


Bild 136: Momentverläufe Dichtsystem EIN 02 bei Fett C, 1,5 mm Spalthöhe

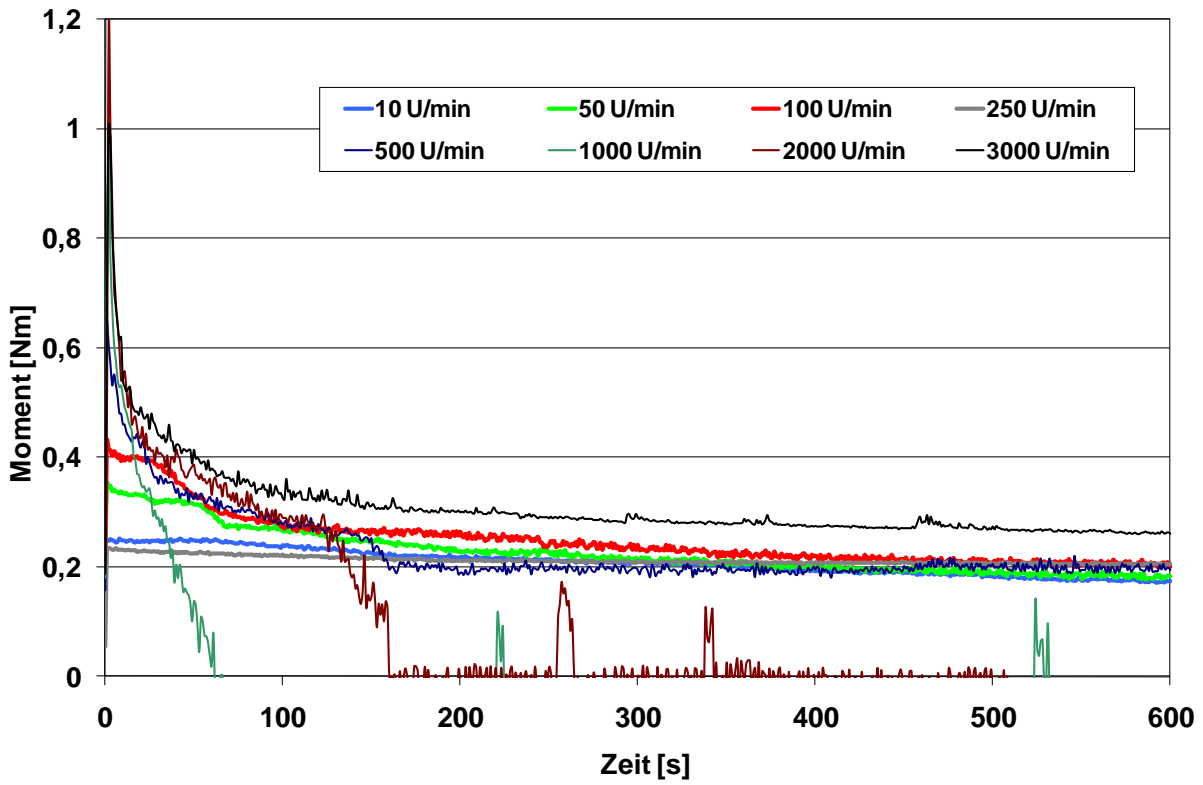


Bild 137: Momentverläufe Dichtsystem EIN 03 bei Fett A, 0,75 mm Spalthöhe

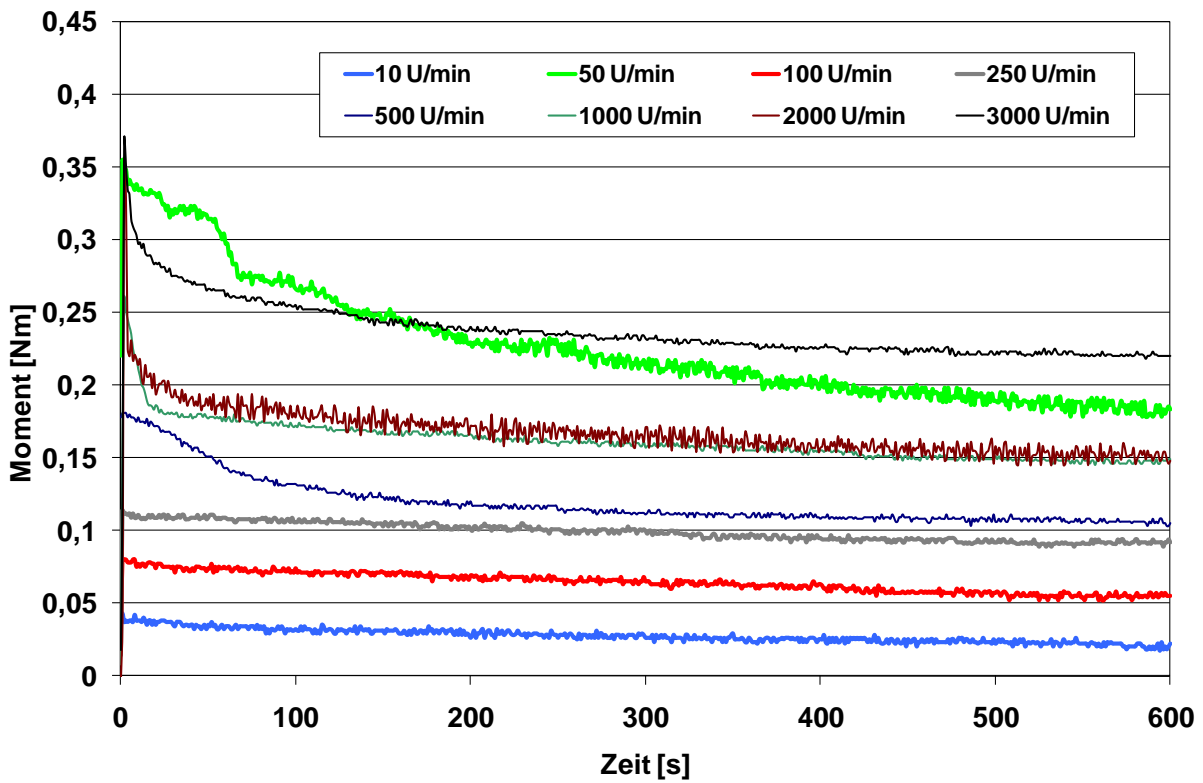


Bild 138: Momentverläufe Dichtsystem EIN 03 bei Fett C, 0,75 mm Spalthöhe

7.1.3.3 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse der Axialspalt-Dichtsysteme EIN

Die Versuche an den Dichtsystemen vom Typ EIN waren durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Durch die Spaltgeometrie mit „einfördernder“ Charakteristik kann der Dichtspalt auch bei hochviskosen Fetten geschlossen gehalten werden.
- Niedrigviskosere Fette vergrößern diese Haltedauer des geschl. Dichtspaltes.
- Die axiale und radiale Spaltausdehnung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Haltedauer. Mit steigender Baugröße nimmt die Haltedauer zu.
- Diese Dichtspaltbauform hat ein hohes Verlustmoment und dieses führt zu starker Erwärmung.

7.1.4 Versuchsergebnisse Axialspalt-Dichtsysteme AUS (ausfördernd)

Werden nun die Momentkurven der Bauform AUS betrachtet, so ergibt sich ein komplett anderer Kurvenverlauf. Durch eine Durchmesserergrößerung im Dichtsystem, von innen nach außen betrachtet, besitzt diese Bauform eine „ausfördernde“ Charakteristik. Folgende Einflüsse sollen genauer betrachtet werden:

- Einfluss der Fett-Konsistenz auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.
- Einfluss der Dichtsystem-Baugröße auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes.

7.1.4.1 Einfluss der Fett-Konsistenz auf die Haltedauer eines geschlossenen Dichtspaltes

Die Momentkurven des Fetts mit hoher Viskosität fallen bei nahezu allen Drehzahlen ab einer gewissen Mindestdrehzahl zielstrebig auf den Moment null ab. Fette mit niedriger Viskosität verbleiben länger im Dichtspalt (Bild 139 bis Bild 144). Hier liegt die Mindestdrehzahl zum gezielten Öffnen des Spaltes höher. Bei weiteren Versuchen mit längerer Laufzeit (7200 s) und Sandbeaufschlagung hat sich aber gezeigt, dass sich auch bei niederviskosen Fetten bei nahezu allen untersuchten Drehzahlen kurze Zeit später ein Momentrückgang auf den Momentnullpunkt einstellte.

7.1.4.2 Einfluss der Dichtsystem-Baugröße auf die Haltedauerdauer eines geschl. Dichtspaltes

Bei den Dichtsystemen mit größerer Spalthöhe und räumlicher Ausdehnung vollzieht sich die Dichtspaltöffnung vor allem bei niederviskosen Fetten schneller und etwas zielgerichteter (Bild 139, Bild 141 und Bild 143). Bei hochviskosen Fetten ist der Unterschied weniger stark ausgeprägt.

Mit dieser „ausfördernden“ Dichtspaltgeometrie gelingt es erstmals, gezielt einen Dichtspalt zu öffnen. Ein stabiler reproduzierbarer Spaltzustand ist eine sehr wichtige Voraussetzung für eine sichere Abdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen. Für ein rasches Öffnen des Spaltes ist allerdings eine fettsortenabhängige Mindestdrehzahl erforderlich.

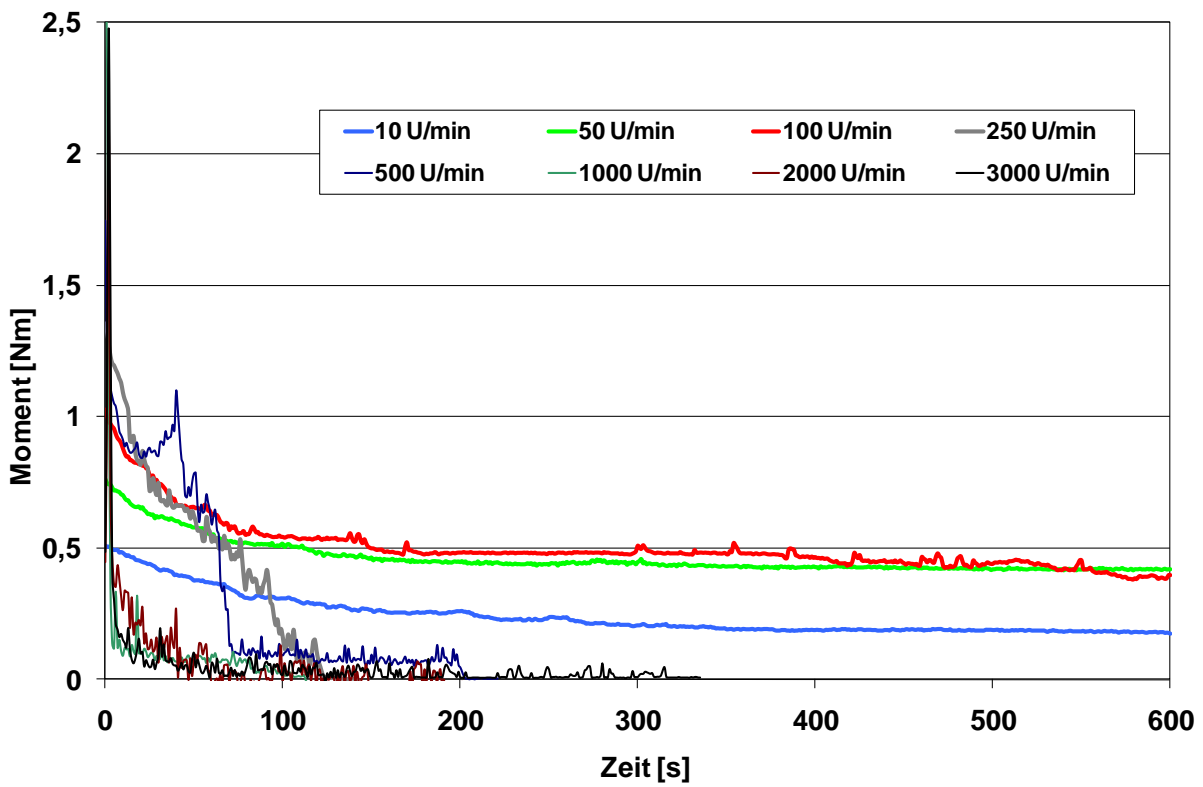


Bild 139: Momentverläufe Dichtsystem AUS 01 ax bei Fett A, 2 mm Spalthöhe, axialer Spalteingang

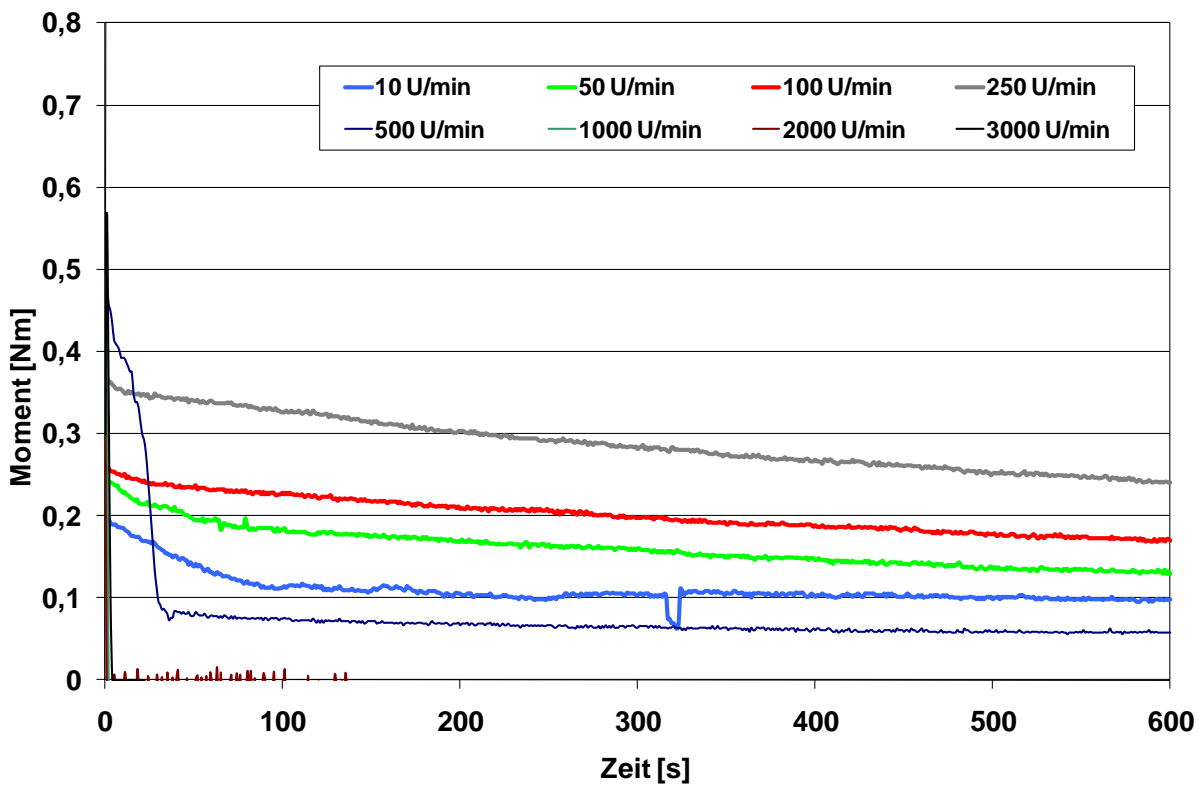


Bild 140: Momentverläufe Dichtsystem AUS 01 ax bei Fett C, 2 mm Spalthöhe, axialer Spalteingang

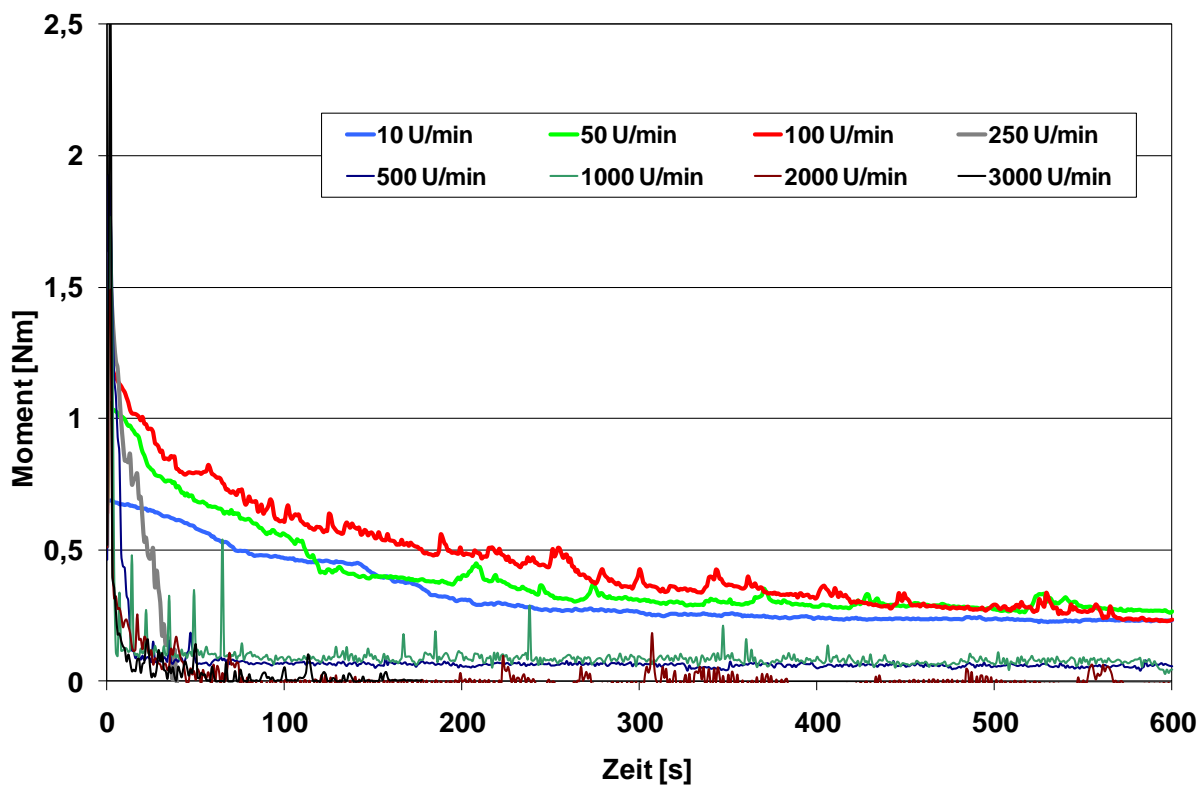


Bild 141: Momentverläufe Dichtsystem AUS 02 ax bei Fett A, 1,5 mm Spalthöhe, axialer Spalteingang

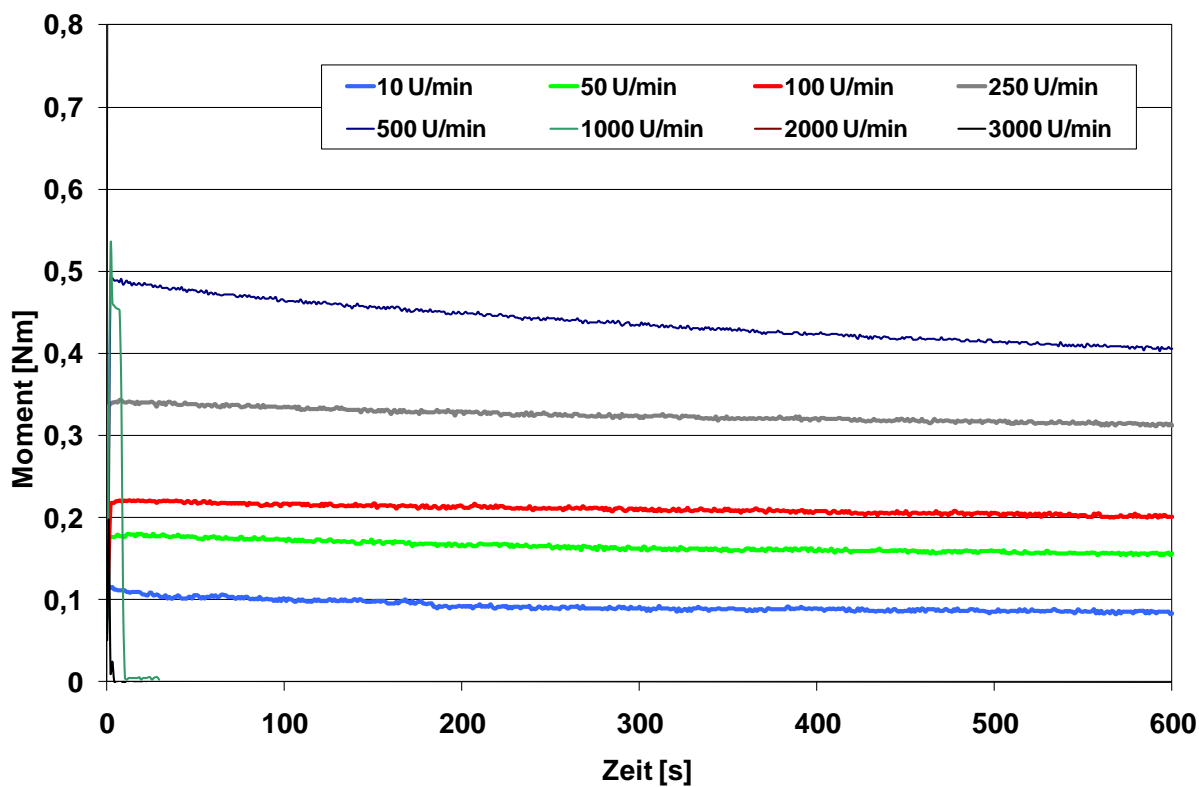


Bild 142: Momentverläufe Dichtsystem AUS 02 ax bei Fett C, 1,5 mm Spalthöhe, axialer Spalteingang

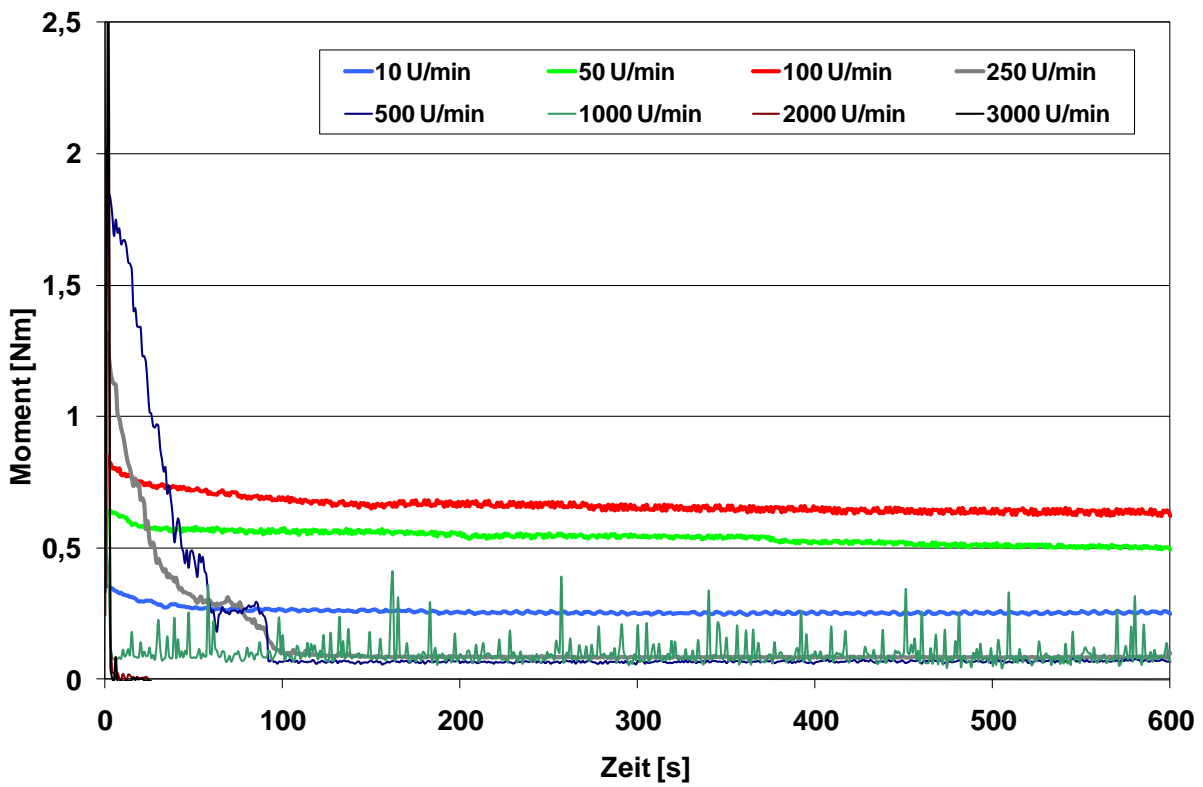


Bild 143: Momentverläufe Dichtsystem AUS 03 ax bei Fett A, 0,75 mm Spalthöhe, ax. Spalteingang

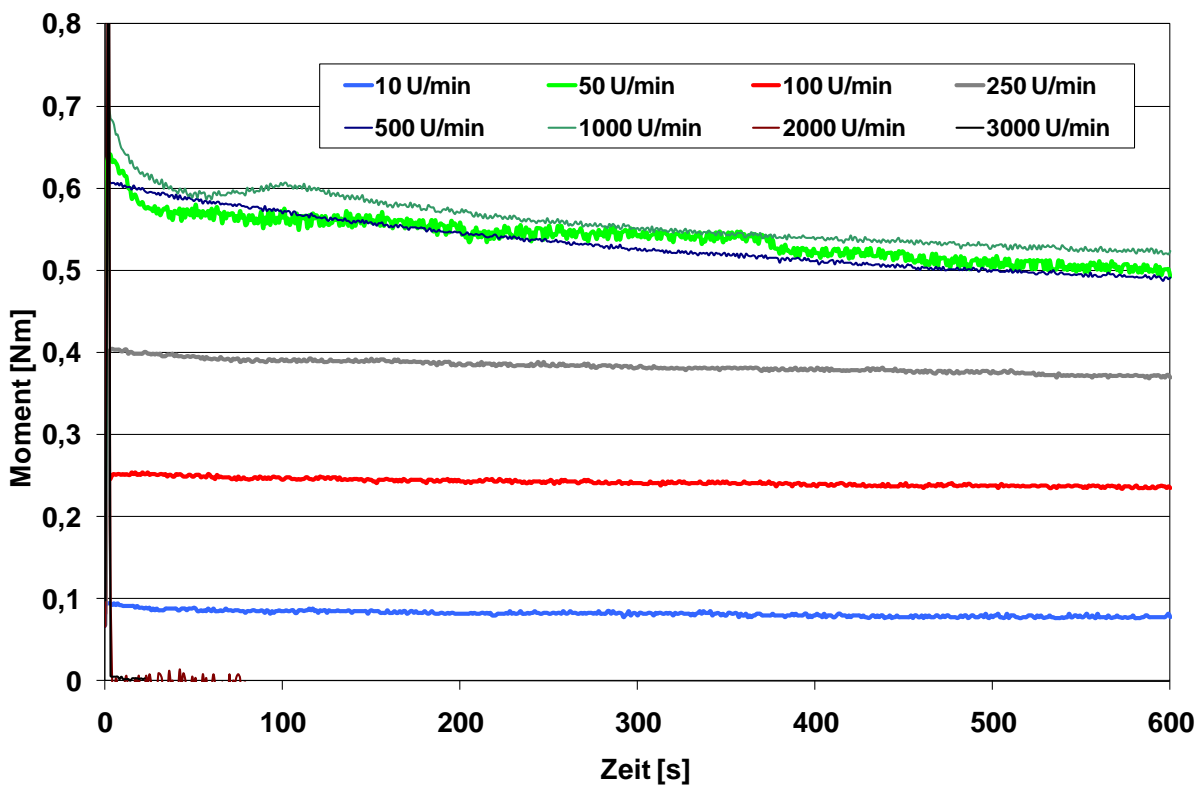


Bild 144: Momentverläufe Dichtsystem AU 03 ax bei Fett C, 0,75 mm Spalthöhe, ax. Spalteingang

7.1.4.3 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse der Axialspalt-Dichtsysteme AUS

Die Versuche an den Dichtsystemen vom Typ AUS waren durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Durch die Spaltgeometrie mit ausfördernder Charakteristik kann der Dichtspalt auch bei niedrigviskosen Fetten gezielt geöffnet werden.
- Niedrigviskosere Fette vergrößern die Verweildauer des geschlossenen Spaltes und dieser kann schwerer freigefördert werden.
- Bei Dichtsystemen mit kleinerer Spalthöhe ist der Spalt schwerer freizufördern.

7.2 Versuchsergebnisse der Strömungsversuche von Fett in Dichtspalten und Strömungsanalyse

Nachfolgend werden in einem ersten Teil die wichtigsten Ergebnisse der Versuchszyklen 1 und 2 der Strömungsversuche vorgestellt. Die Strömungsversuche wurden im Rahmen einer Studienarbeit (18) durchgeführt und die Strömung im Spalt grob beschrieben. Im Anschluss wurden die umfangreichen Videoaufzeichnungen aus (18) vom Autor der vorliegenden Arbeit nochmals genau auf die im Spalt herrschenden Strömungsvorgänge und deren Ursachen hin untersucht. Diese Ergebnisse werden im zweiten Teil des Kapitels vorgestellt. Der Versuchsaufbau ist in Kapitel 6.2.1 beschrieben.

7.2.1 Ergebnisse der Strömungsversuche Zyklus 1

Hier wurde das Strömungsverhalten von Fetten in Radialspalten untersucht. Der Versuchsablauf wird in Kapitel 6.2.2 erklärt.

7.2.1.1 Visualisierung der Strömung durch farbiges Fett

Durch Einspritzen von farbigem Fett in den vorderen Radialspalt konnte die vorherrschende Strömung ermittelt werden. Es hat sich dabei gezeigt, dass der Einspritzdruck auf das beobachtbare Strömungsbild, jedoch nicht auf die Strömung selbst, einen entscheidenden Einfluss hat. Nachfolgend wird an einem niedrigviskosen Fett die sich einstellende Fettströmung durch das Einspritzen bei zuerst niederem und dann höherem Einspritzdruck von farbigem Fett in den vorderen Radialspalt sichtbar gemacht.

Beim Einspritzen des Fettes mit sanftem Druck konnte beobachtet werden, dass das gefärbte Fett durch die statorseitige Strömung spiralförmig in Richtung Welle abgelenkt wird. Das aus den zugehörigen Filmaufnahmen entnommene Bild 145 zeigt den Einspritzvorgang bei einem Versuch mit niedrigviskosem Fett bei 1000 min^{-1} . Ist das gefärbte Fett am Spaltinnendurchmesser nahe der Welle angekommen, kommt anfangs nur ein kleiner Anteil aus dem vorderen Spaltende und lagert sich dort als Fettkragen an. Der Großteil des Fetts wird von der Strömung an der Rotorscheibe erfasst und wieder radial nach außen beschleunigt. Diese innenliegende Strömung kann durch Einspritzen von farbigem Fett mit höherem Druck visualisiert werden.

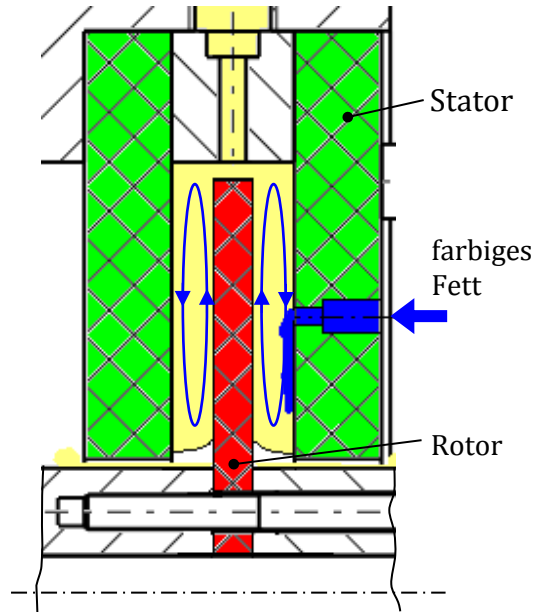
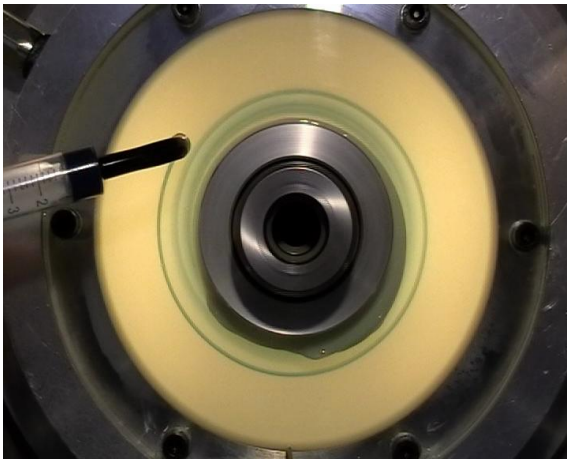


Bild 145: Farbeinspritzvorgang bei 1000 min^{-1} , geringer Spritzdruck (18)

Bild 146 zeigt den Einspritzvorgang wiederum bei einem Versuch des gleichen Fetts bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} . Durch das Einspritzen des farbigen Fetts mit höherem Druck gelangt ein Teil des Fetts axial tiefer in den Dichtspalt und durchdringt die statorseitige Strömung. Ein Teil des Fetts wurde so von der unter Fliehkräfteinfluss stehenden Rotorströmung erfasst und nach radial außen gedrängt. In den Filmaufnahmen ist durch eine türkis gefärbte zum größeren Durchmesser wandernde Schattierung zu sehen, wie das tiefer injektierte Fett von der Rotorströmung mitgenommen wird.

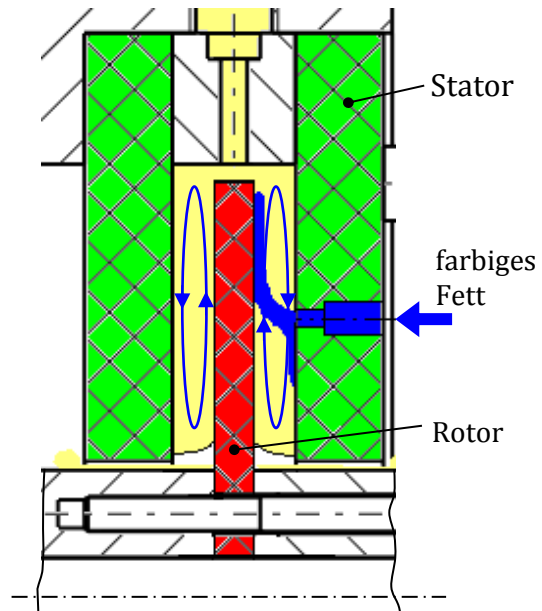
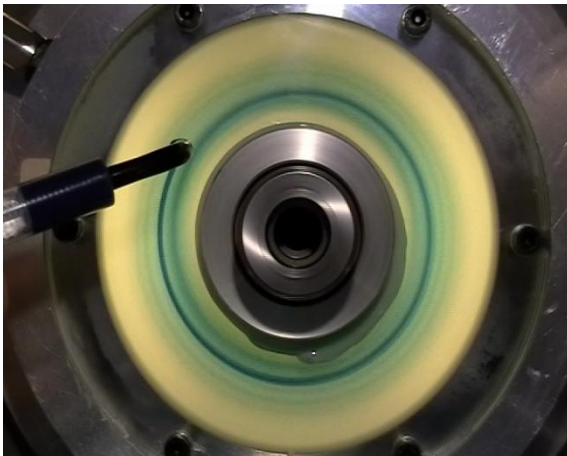


Bild 146: Farbeinspritzvorgang Fett C bei 1000 min^{-1} , hoher Spritzdruck (18)

War das gefärbte Fett in der Rotorströmung am Außendurchmesser angekommen, erfolgte wieder ein Rückfluss in der statorseitigen Kehrströmung radial nach innen Richtung Welle. Bei vollständig ausgebildeter Zirkulationsströmung wurde bei beiden Einspritzmethoden das gesamte gefärbte Fett im Dichtsystem verteilt und gemischt. Eine Durchmischung des Fetts beider Radialspalte konnte somit nachgewiesen werden (Bild 147). Bei höheren Drehzahlen sind die Strömungsverhältnisse bei niedrigviskosen Fetten im Dichtsystem ähnlich wie in einer Zentrifugal-

Wellendichtung (37) für Flüssigkeiten. Durch die Fließgrenze der Schmierfette läuft diese im Gegensatz zur reinen Flüssigkeitsbefüllung bei Wellenstillstand nicht leer.

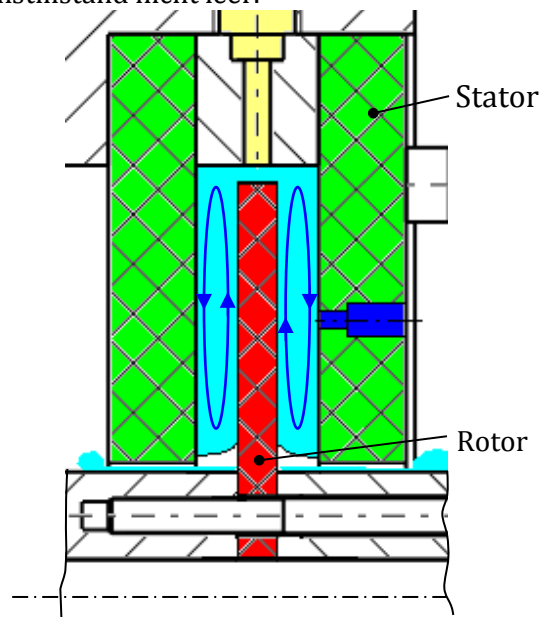
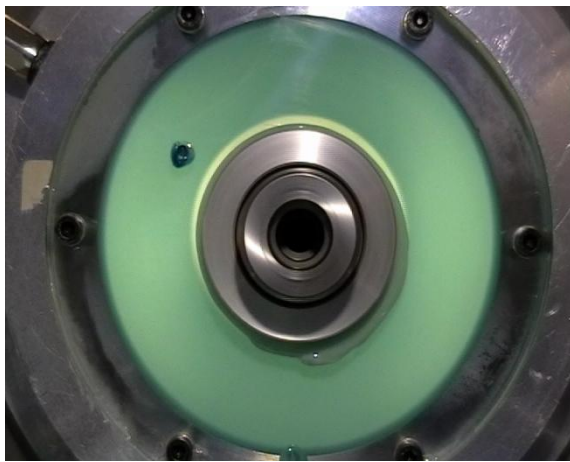


Bild 147: Farbverteilung Fett C bei 1000 min^{-1} nach erfolgter Farbeinspritzung (18)

Wurde die Drehzahl weiter gesteigert, konnte bei manchen Fetten beobachtet werden, wie die Fettströmung unruhig wurde und Luft aus dem Spalt zwischen Welle und Statorscheibe angesaugt hat. Durch angesaugte Luftblasen, bzw. durch Luftblasen, die direkt mit dem Fett ins Dichtsystem eingebacht wurden, kann die Zirkulationsströmung derart gestört werden, dass Fett schlagartig aus dem Dichtspalt gedrängt wird. Dieser Fördermechanismus ist vor allem bei hochviskosen Fetten derart ausgeprägt, dass nach kurzer Zeit kein Fettkontakt mehr zwischen Rotorscheibe und Statorscheiben besteht.

7.2.1.2 Strömungsverhalten von Fett B

Bei allen Drehzahlen quoll das hochviskose Fett B (Kapitel 6.2.3.2) aus dem Dichtsystem. Nach Ablauf einer verlängerten Versuchszeit von 25 Minuten war selbst bei einer Drehzahl von 10 min^{-1} der Dichtspalt komplett geöffnet. Bild 148 und Bild 149 zeigen den Dichtspalt des Versuchs bei Versuchsstart und Versuchsende. Wie in Bild 149 zu sehen ist, hatte kein Farbaustausch bzw. die Durchmischung von Fett der vorderen und hinteren Kammer stattgefunden. Bei Drehzahlen zwischen 50 min^{-1} und 500 min^{-1} hat sich ebenfalls der Spalt unter erheblichem Fettausfluss geöffnet. Auch hier konnte kein Durchmischen oder Austausch des farbigen Fettes mit der Rückseite festgestellt werden. Auf Bild 150 sind die Momentverläufe über der Versuchszeit bei den untersuchten Drehzahlen dargestellt. Alle Momente fallen nach kurzer Zeit auf den Momentnullpunkt.

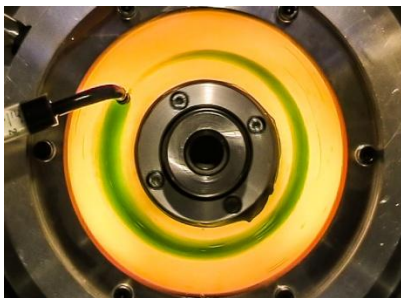


Bild 148: Versuchsbeginn - 10 min^{-1} (18)

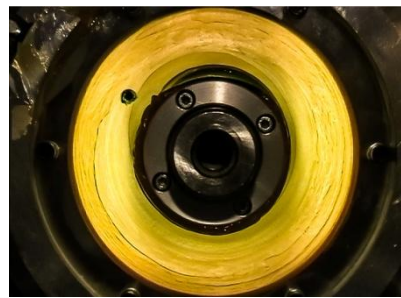


Bild 149: Versuchsende - 10 min^{-1}

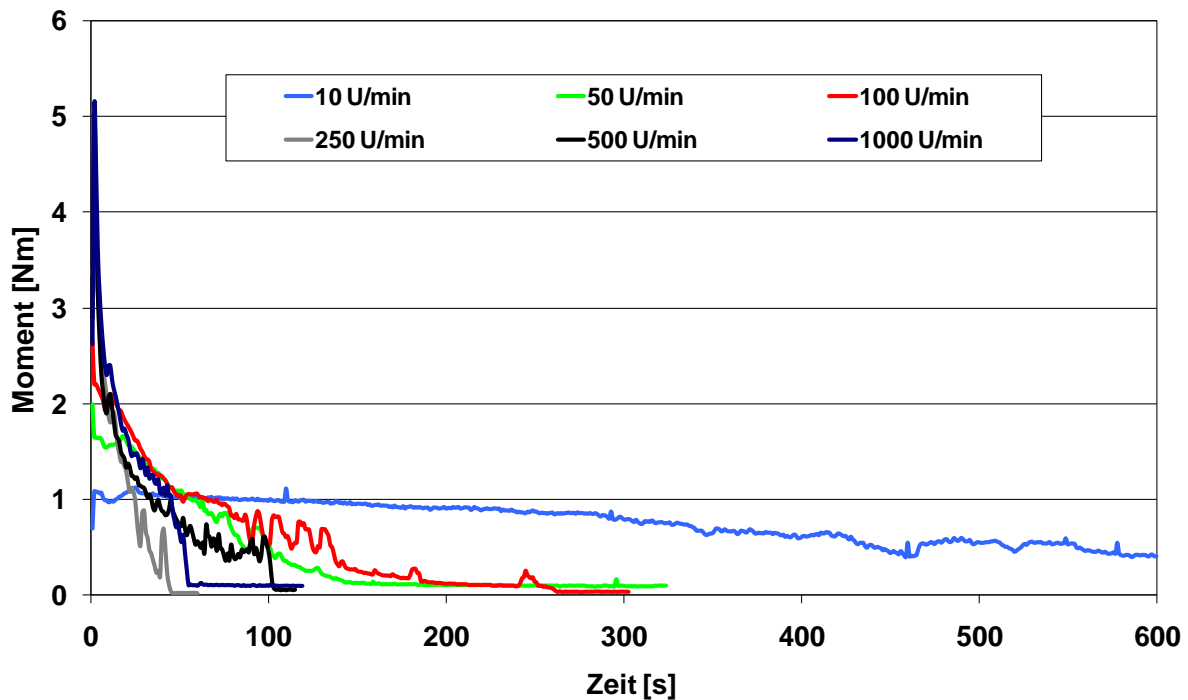


Bild 150: Momentenverläufe Fett B, 1 mm Stirnspalt und Farbeintrag (18)

Bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} wird das Fett innerhalb kurzer Zeit aus dem Dichtsystem gefördert. Trotz der kurzen Zeit bis zum Öffnen des Spaltes war ein Teil der Farbe bis auf die Rückseite vorgedrungen. So konnte nachgewiesen werden, dass ein Austausch des Fettes zwischen Dichtsystem Vorder- und Rückseite stattgefunden hatte (Bild 151 bis Bild 153).

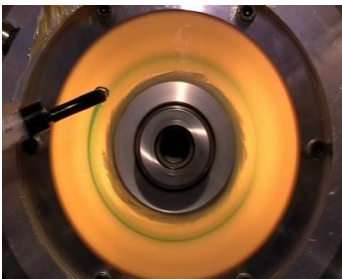


Bild 151: Versuchsbeginn
 1000 min^{-1} (18)



Bild 152: Versuchsdauer
30 sec, 1000 min^{-1} (18)



Bild 153: Versuchsende
 1000 min^{-1} (18)

7.2.1.3 Strömungsverhalten von Fett C

Fett C zeigt bei diesen Versuchen ein ähnlich stabiles Verhalten wie bei den Versuchen mit den Innenrotor-Dichtsystemen (6.1.3.1). Die Momentkurven (Bild 154) verlaufen abgesehen vom Anlaufmoment, ziemlich horizontal. Die Versuchsdauer bei 10 min^{-1} wurde auf eine Stunde verlängert. Nach Ablauf der Versuchszeit war der Spalt immer noch geschlossen und nur ein geringer Anteil des Fettes war aus dem Dichtsystem ausgefördert. Trotz der niederen Versuchsdrehzahl fand ein Durchmischen des Fettes von Vorder- zur Rückseite statt. Bild 155 bis Bild 157 zeigen die voll ausgeprägte Zirkulationsströmung bei 1000 U/min . Bereits nach kurzer Zeit hatte eine komplette Farbdurchmischung stattgefunden.

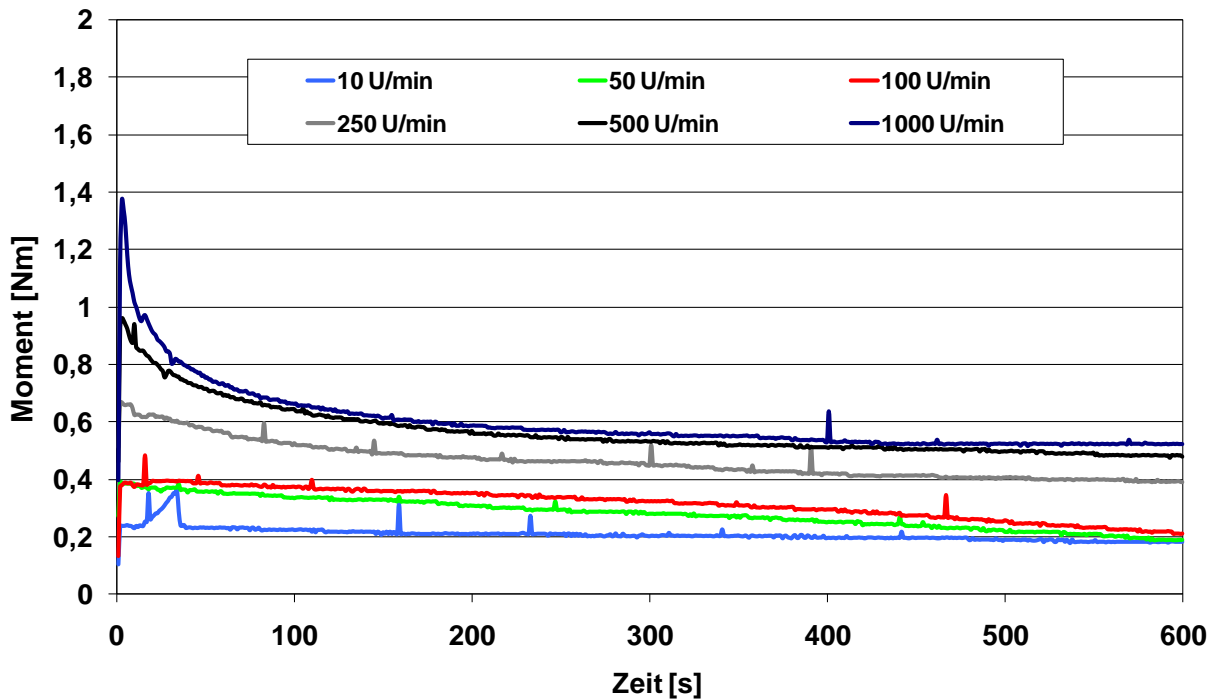
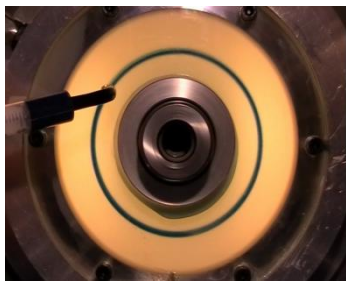
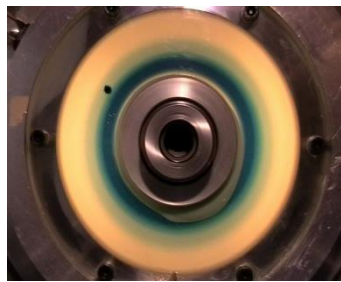
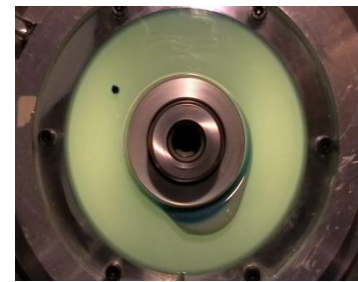


Bild 154: Momentenverläufe Fett C, 1 mm Stirnspalt und Farbeintrag (18)

Bild 155: Versuchsbeginn
1000 min⁻¹ (18)Bild 156: kurz nach
Farbeintrag, 1000 min⁻¹ (18)Bild 157: Versuchsende
1000 min⁻¹ (18)

7.2.2 Ergebnisse der Strömungsversuche Zyklus 2

In Zyklus 2 wurde Fett B in verschiedenen Konzentrationen mit Messingstaub verunreinigt und auf das sich verändernde Strömungsverhalten hin untersucht. Erst ab einem sehr großen Staubanteil im Fett konnte überhaupt eine merkliche Änderung des Strömungsverhaltens festgestellt werden. Aus diesem Grund werden hier nur die Ergebnisse mit einer Verschmutzungskonzentration von 75 Massenprozent vorgestellt.

Bei einer Verunreinigung von Fett B mit 75 Massenprozent Staub zeigt dieses im Gegensatz zu Kapitel 7.2.1.2 ein völlig verändertes Strömungsverhalten. Das mit 75 % Staub verunreinigte Fett wurde weniger stark aus dem Dichtsystem ausgefördert. Bild 158 zeigt die Momentverläufe. Alle Momentkurven nehmen, abgesehen von der Anlaufphase, einen ziemlich horizontalen Verlauf ein.

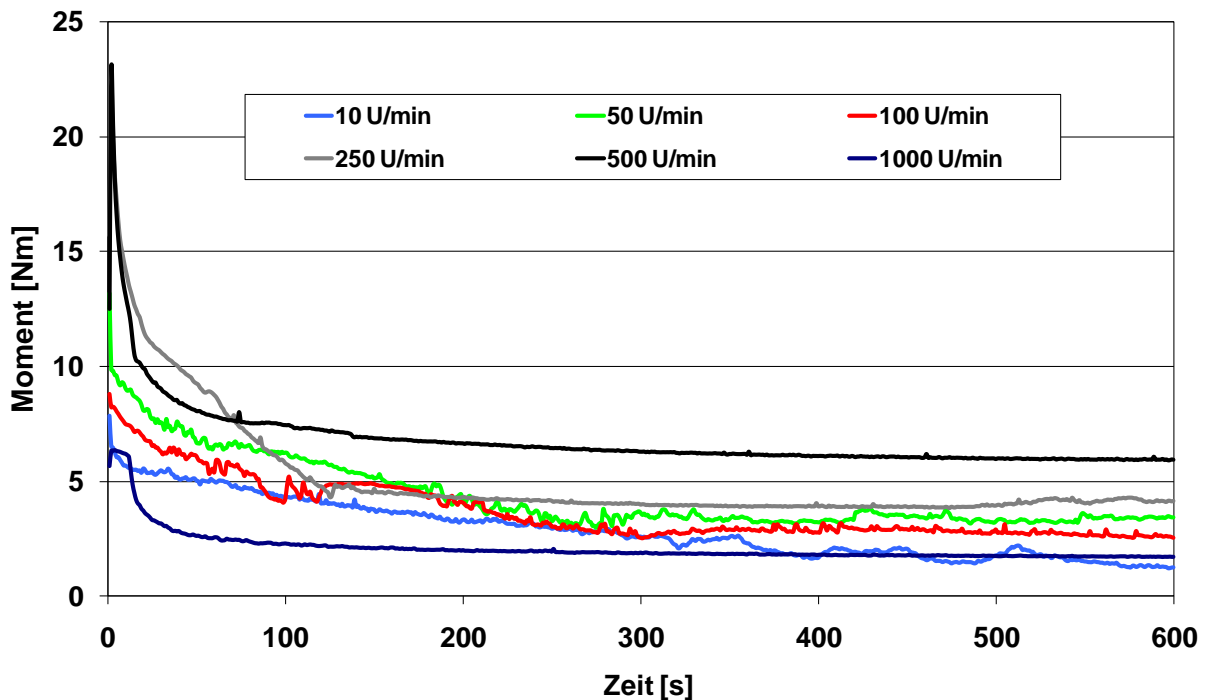


Bild 158: Momentenverläufe Fett B, 1 mm Stirnspalt, 75 % Staub (18)

Auch bei den Versuchen mit verunreinigtem Fett wurde zur Analyse der sich einstellenden Strömungsverhältnisse bei unterschiedlichen Drehzahlen farbiges Fett in das Dichtsystem eingebracht. Der Einspritzvorgang bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} ist in Bild 159 dargestellt. Das farbige Fett wird von der statorseitigen Strömung erfasst und spiralförmig Richtung Welle gefördert. Der Dichtspalt öffnet sich dabei nicht und es wird fast kein Fett ausgefördert. Der große Fettkragen in Bild 160 entstand durch das zusätzliche Einspritzen von farbigem Fett in den bereits vollständig gefüllten Dichtspalt. Die homogene Einfärbung des Fetts in Bild 160 und auf der Rückseite des Dichtsystems zeigt, dass eine vollständige Fettdurchmischung stattgefunden haben muss.

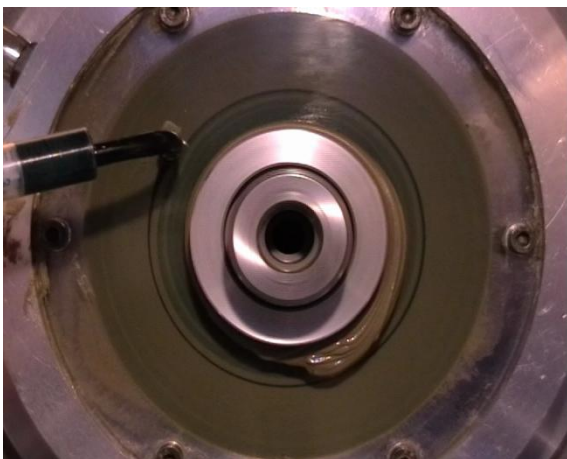


Bild 159: Einspritzvorgang, 1000 min^{-1} (18)



Bild 160: Einspritzende, 1000 min^{-1} (18)

Dieses Versuchsergebnis ist sehr überraschend, da Fett B ohne Verschmutzung zuvor nie im Dichtsystem gehalten werden konnte.

7.2.3 Analyse der am Prüfstand festgestellten Strömungsverhältnisse

In diesem dritten Teil des Kapitels 7.2 soll aufbauend auf den zuvor vorgestellten Strömungsuntersuchungen (18) und (19) nach Ursachen für das Fließverhalten der Fette gesucht werden. Die Beantwortung folgender zwei Fragen war hierbei von besonderem Interesse:

- Welche Fördereffekte bewirken, dass sich bei hochviskosen Fetten der Dichtspalt schneller öffnet als bei Fetten von niedrigerer Viskosität?
- Warum bewirkt die Zugabe von Schmutzpartikeln bei Fetten mit hoher Viskosität, dass die Dichtspalte wieder geschlossen bleiben?

7.2.3.1 Strömungsverhalten und Ursachen für ein schnelles Öffnen der Dichtspalte bei hochviskosen Fetten

Aus den Beobachtungen am Dichtspalt und der Analyse von Videoaufzeichnungen konnten folgende Strömungsphänomene beobachtet werden:

- Ausfördern von Fett bei atmenden Dichtspalten durch Quetschströmung.
- Viskositätssprünge im Fett an Phasengrenzen im Dichtspalt.
- Ausfördern von Fett durch eine von der Fett-Luftverteilung im Dichtspalt verursachten Quetschströmung.
- Strömungsvorgänge am Dichtspalteingang.
- Auswirkung der Einzelphänomene auf die Gesamtströmung beim Öffnen des Dichtspaltes.

Manche dieser Strömungsformen führen direkt zum Ausfördern von Fett und damit zum Öffnen des Dichtspaltes. Durch andere wird der Vorgang der Spaltöffnung alleine nicht bewirkt, sondern nur begünstigt, was z. T. erst beim Betrachten der Gesamtströmung deutlich wird. Aus diesem Grund werden nachfolgend die oben genannten Strömungsphänomene detailliert beschrieben und ggf. am Ende deren Einfluss auf die Gesamtströmung erklärt.

Zum Verständnis ist die Kenntnis der Fließkurven der verwendeten Fette „B“ und „C“ notwendig. Aus diesem Grund sind in Bild 161 die Fließkurven der Fette „B“ und „C“ bei einer Temperatur von 20 °C dargestellt.

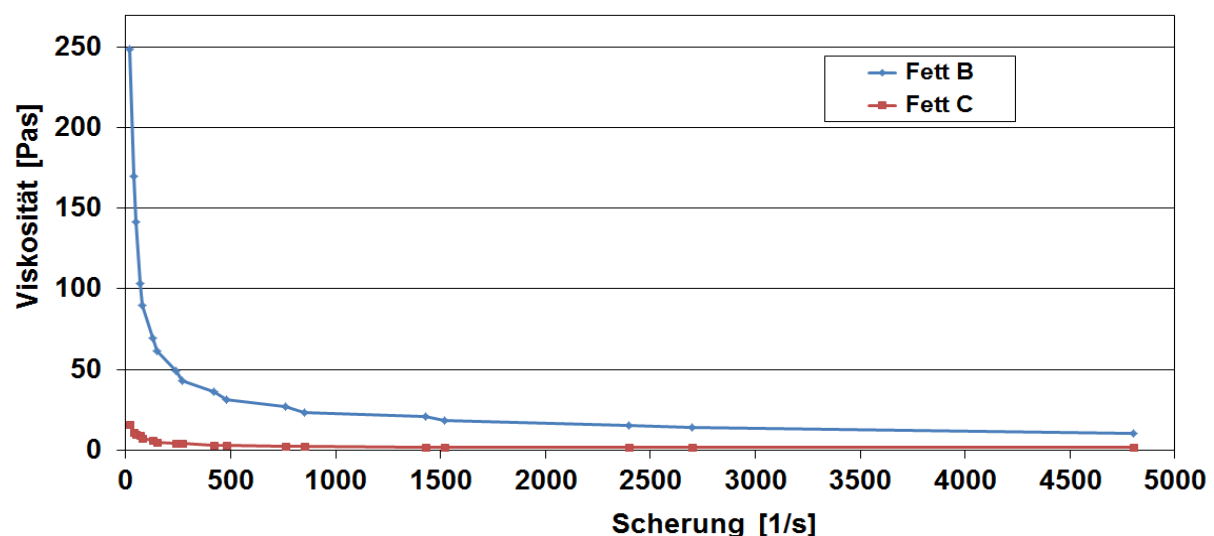


Bild 161: Fließkurven der Fette „B“ und „C“ bei 20 °C

Die Fließkurven wurden mit dem in Kapitel 4.2.9 vorgestellten Rheometer aufgenommen. Bei beiden Fetten ist der scherungsabhängige Viskositätsverlauf mit einer Fließgrenze in ungeschertem Zustand sehr gut zu erkennen. Fett „B“ ist erheblich steifer als Fett „C“. Bei Fett „B“ ist die Viskositätsänderung infolge von Scherung viel Größer.

Ausfordern von Fett bei atmenden Dichtspalten durch Quetschströmung:

Geringe Rund- und Planlaufabweichungen sind bei allen rotierenden Systemen vorhanden. Dies führt zu atmenden Dichtspalten. Hier wird durch die örtliche Volumenverkleinerung des Dichtspaltes Fett aus dem Spalt gedrückt und im Idealfall anschließend bei örtlicher Volumenvergrößerung wieder eingesaugt. Ist die Volumenänderung gering, so bildet sich am äußeren Dichtspaltende bei Volumenverkleinerung eine bauchige Fettwulst. Häufig kann dieses Fett aber nicht wieder eingesaugt werden, da Fett eine z. T. ausgeprägte Fließgrenze besitzt und diese durch die Kohäsionskräfte nicht überwunden werden kann. Beim Einsaugen kommt es an einer Schwachstelle der Fettwulst, die z. B. aus einer Luftblase oder durch ein durch Rotation (24) entstandenes Fettklumpchen besteht, zu lokal größerer Scherung. Dies hat zur Folge, dass an dieser Stelle die Viskosität weiter abfällt und zunächst das in der Viskosität herabgesetzte Fett eingesaugt wird. Reicht die viskositätsreduzierte Fettmenge nicht aus, wird Luft in den Dichtspalt eingesaugt. Es entsteht ein „Luftkanal“. Der in Bild 162 dargestellte Fett-Saugversuch, bei dem Wasser bzw. steifes Fett in eine Spritze eingesaugt wird, verdeutlicht die Vorgänge am Dichtspalt. Je steifer ein Fett ist, desto stärker ist dieser Effekt ausgeprägt.

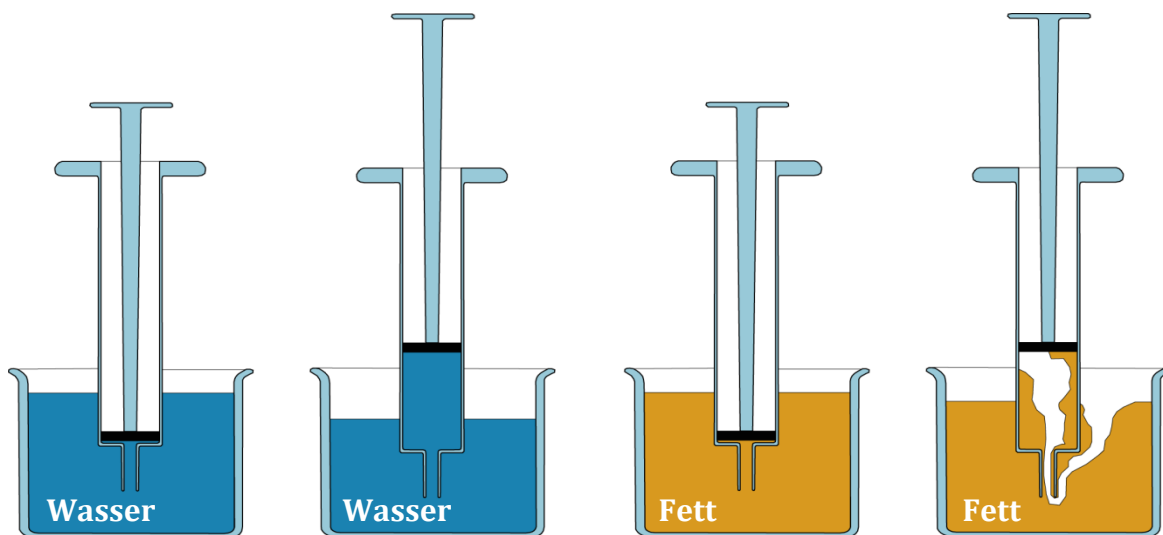


Bild 162: Fett Saugversuch

Viskositätssprünge im Fett an Phasengrenzen im Dichtspalt:

Sind in einem fettgefüllten Dichtspalt Luftblasen vorhanden, so hat dies erhebliche Auswirkungen auf das Fließverhalten des Fetts im Spalt. In Bild 163 und Bild 164 ist jeweils eine Luftblase im Dichtspalt in der Vorder- und Schnittansicht und in Bild 164 am Prüfstand dargestellt. Bild 163 zeigt eine Luftblase in Ruhe, so wie sie z. B. nach dem Befüllvorgang mit frischem Fett im Spalt bei Wellenstillstand vorliegen könnte.

Wird die Rotorlamelle nun in Pfeilrichtung bewegt (Bild 164), so erfahren die Bereiche vor und hinter der Luftblase ① (in Bewegungsrichtung betrachtet) eine andere Scherung als die Bereiche seitlich neben der Luftblase ③ zu den Scheiben hin. Dies geht aus dem in Bild 164 im Schnitt B-B dargestellten theoretischen Geschwindigkeitsprofil über der Spalthöhe hervor. Wird nun zusätzlich die in Bild 161 vorgestellte von der Scherung abhängige Fließkurve der untersuchten Fette herangezogen, so ergibt sich der in Bild 164 rechts unten qualitativ dargestellte Verlauf von Scherung und Viskosität über der Dichtspalthöhe.

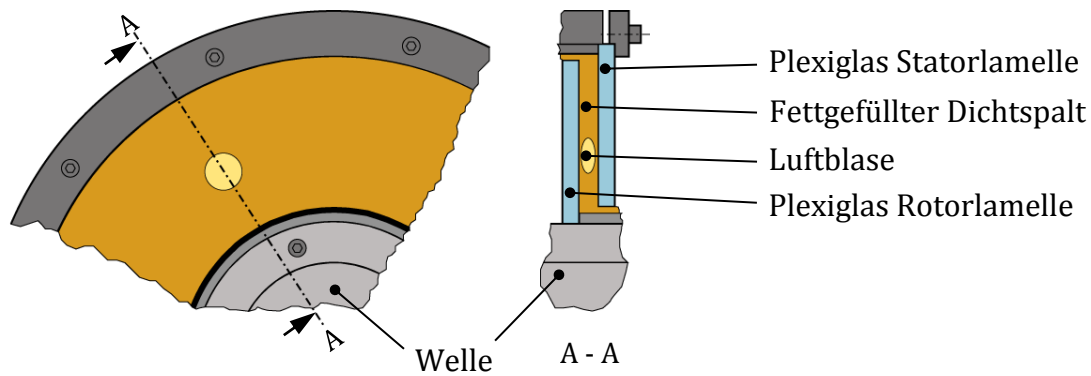


Bild 163: Luftblase im Dichtspalt in Ruhe

In den Bereichen ① und ③ scheinen die Verhältnisse klar zu sein, an den Phasengrenzen in den Bereichen ② und ④ jedoch muss es zum Viskositätsprung kommen.

Hier treffen in beiden Fällen Fettströmungen unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten aufeinander. Es ergeben sich folglich besonders stark gescherte Bereiche und die Viskosität verringert sich hier stark. Die Folge dieses Vorganges ist in Bild 164 rechts oben am Prüfstand sehr gut zu erkennen. Der Dichtspalt „reißt“ auf einem großen Teil über den Umfang auf (heller Streifen im grün eingefärbten Fett) und die Luftblase plattet sich ab. Selbst bei einer kleinen Luftblase trennt sich die statorseitige von der rotorseitigen Fettströmung auf großen Teilen des Umfangs.

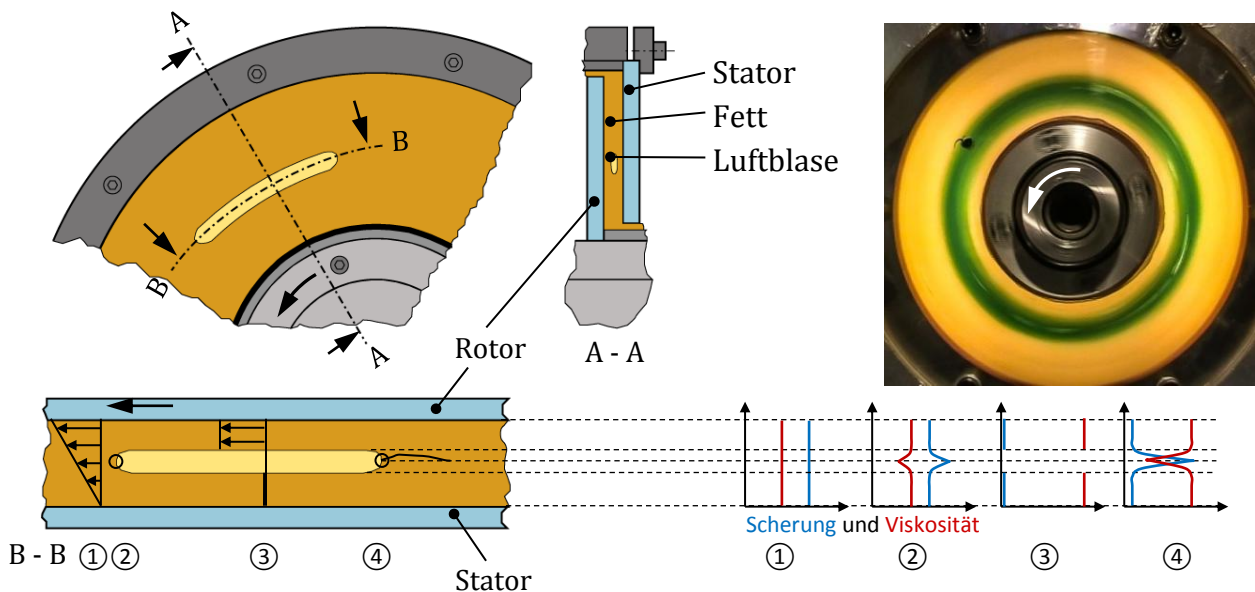


Bild 164: Luftblase im Dichtspalt bewegt

Ausfördern von Fett durch eine von der Fett-Luftverteilung im Dichtspalt verursachten Quetschströmung:

Hat sich der Dichtspalt bereits teilweise geöffnet, so treffen bei Drehbewegungen des Rotors weniger und stärker mit Fett benetzte Bereiche der Rotor- und Statorscheiben aufeinander. Ist die örtliche Fettschichtdicke von Rotor und Stator zusammen größer als die Dichtspalthöhe, kommt es zum „Fettstau“. Die Staubecken sind häufig „herzförmig“ ausgeprägt, hier ist der Dichtspalt vollständig mit Fett gefüllt (geschlossen). Diesen Zustand zeigt Bild 165 bei einer Rotordrehzahl von 10 min^{-1} als Vorderansicht am Prüfstand und als Modell mit Querschnittsdarstellungen. Diese Staubecken laufen meist mit um, aber erheblich langsamer als der Rotor des Dichtsystems. Im Staubecken erfährt das Fett Scherung, in den Bereichen davor und dahinter nicht. Nach der Fließkurve von Bild 161 hat das Fett im Staubecken eine geringere Viskosität als davor und danach. Treffen jetzt bei weiterer Drehung des Rotors neue ungescherte und damit „feste“ Fetthügel auf die Vorderseite der

geschlossenen Spaltbereiche, so bewirkt dies ein Verdrängen von Fett innerhalb des geschlossenen Bereichs in radialer Richtung. Reicht der geschlossene Bereich bis zum Dichtspalteingang am Innendurchmesser, wird Fett aus dem Spalt gequetscht und verbleibt am Spalteingang als Fettkragen.

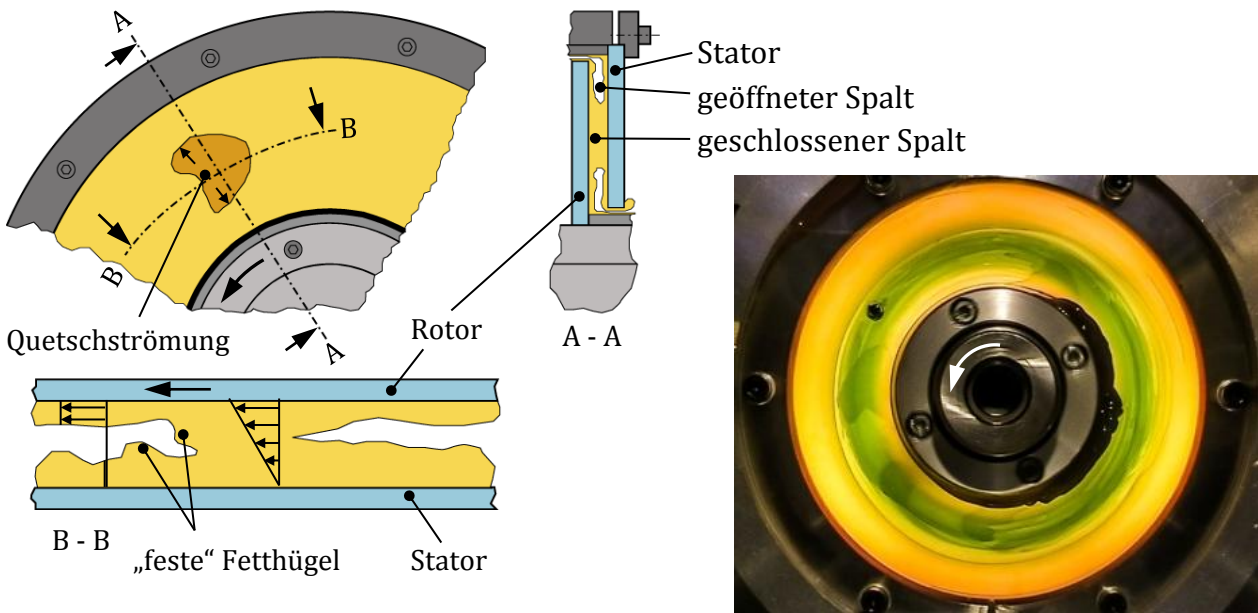
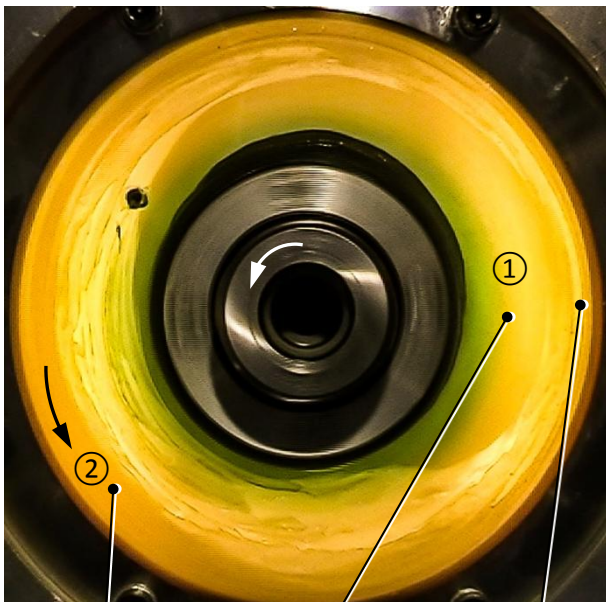
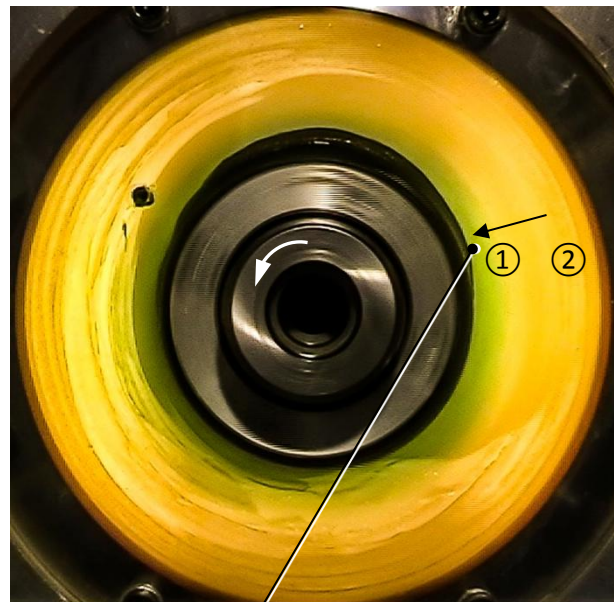


Bild 165: Quetschströmung an teilweise geschlossenen Spaltbereichen

Eine weitere Form einer Quetschströmung, die ein Ausfordern von Fett zur Folge hat, zeigen Bild 166 und Bild 167. In Bild 166 sind die beiden geschlossenen Spaltbereiche ① und ② weit voneinander entfernt. Spaltbereich ① verharrt in Ruhe, Spaltbereich ② läuft um.



geschlossener Spalt umlaufend
geschlossener Spalt stillstehend
geöffneter Spalt



Quetschströmung Richtung Welle (Pfeil), da ① und ② zusammenkommen

Bild 166: Spaltzustand vor der „Quetschphase“

Bild 167: Spaltzustand in der „Quetschphase“

Ein örtlich fester, ständig mit Fett gefüllter (geschlossener) Spaltbereich hat seine Ursache in einer örtlich festen Dichtspaltverringering, z. B. eine Formabweichung der vorderen Statorplatte. Für einen umlaufenden geschlossenen Spaltabschnitt gibt es mehrere Ursachen. Sofern der geschlossene

ne Bereich langsamer als die Rotordrehzahl umläuft, handelt es sich um einen zufälligen Staubeereich von Fett wie er zuvor beschrieben und in Bild 165 dargestellt ist. Läuft der geschlossene Bereich jedoch mit Rotordrehzahl um, kann z. B. eine Form- oder Laufabweichung (oder beides) des Rotors eine umlaufende, für den Fettstau verantwortliche Dichtspaltverringern verursachen. Treffen beide geschlossenen Bereiche aufeinander, kommt es, wie in Bild 167 bei einer Rotordrehzahl von 100 min^{-1} zu sehen ist, zu einer Quetschströmung. Dabei wird Fett zum Spalteingang hinausgequetscht. Während der vorangegangenen Umdrehung des Rotors hatten sich weitere Fettteilchen an den Staubeichen angelagert, so dass diese ohne die Verdrängung von Fett sich nicht aneinander vorbei bewegen konnten. Luft ist am Ausquetschprozess nicht sichtbar beteiligt, sie ist zum einen kompressibel und kann zum anderen bedingt durch ihre niedere Viskosität und Dichte im Vergleich zum Fett einfach in Bereiche vor oder nach der Engstelle überströmen.

Strömungsvorgänge am Dichtspalteingang:

Bei der Untersuchung von Lufteinschlüssen im Dichtspalt hat sich gezeigt, dass Fette an solchen Phasengrenzen sehr unterschiedlich stark geschert werden und demzufolge auch großen Viskositätsschwankungen unterliegen. Dies wurde zu Beginn des Kapitels beschrieben. Eine weitere Phasengrenze liegt am Dichtspalteingang vor, deren Strömungsvorgänge nachfolgend beschrieben werden. In Bild 168 ist der große Fettkragen eines einfachen Axialspalt-Dichtsystems aus älteren Untersuchungen (19) am Institut für Maschinenelemente zu sehen. Eine große Menge Fett hat sich vor dem eigentlichen axialen Dichtspalt abgelagert. Das Besondere ist, dass sich der Spalt außen nicht öffnete. Es bildeten sich Fettklumpchen mit einem Durchmesser von bis zu 5 mm, die angetrieben vom Rotor auf dem eigentlichen Dichtspaltende umliefen. In Bild 168 a bis g ist die Bewegung eines Fettklumpchens dargestellt. Die Bewegung des Klumpchens erfolgt dabei keineswegs gleichförmig, sondern sehr ruckartig. Nach dem Verweilen von kurzer Dauer (z. B. 1 s) wird es von der umgebenden Strömung erfasst, einige Grad um die eigene Achse gedreht und mehrere Millimeter am Umfang in Bewegungsrichtung des Rotors weiterschleppt. Die in der Literatur (24) (Bild 169) beschriebene Drehung von Festkörperteilchen in einer reibungsbehafteten Flüssigkeit bei Scherung kann hier im Großen veranschaulicht werden.

Der Dichtspalteingang stellt in diesem Versuch eine sehr unruhige Phasengrenze dar. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei den chaotischen Mischvorgängen Luftblasen ins eigentliche Dichtsystem geschleppt werden. Doch ist dieser Versuch auf die Verhältnisse im z. T. wesentlich kleineren Dichtspalt übertragbar?

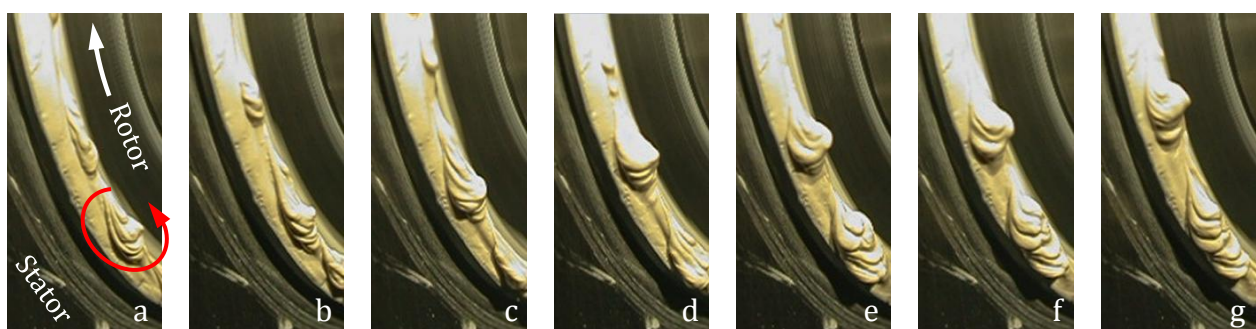


Bild 168: Klumpchenbewegung an Axialspalt mit 0,3 mm Spalthöhe bei 600 min^{-1}

Auf der Suche nach den Vorgängen im Dichtspalt an der Phasengrenze wurden so auch weitere Bilder älterer Untersuchungen am Institut für Maschinenelemente ausgewertet. Bild 170 (19) zeigt die Phasengrenze von Fett und Luft an einem Spalteingang eines Axialspalt-Dichtsystems. Hier liegt die Fettgrenze im Innern des Dichtspaltes. Die Spalthöhe ist mit 0,15 mm sehr klein. Auch hier ist zu erkennen, dass die Fettoberfläche zu Klumpchenbildung neigt. Somit muss festgestellt werden, dass eine Phasengrenze einen Bereich im Dichtspalt bei gängigen Dichtspalthöhen darstellt, der von großen Viskositätsschwankungen gezeichnet ist, weil das Fett durch die Klumpchenbildung lokal sehr unterschiedlich stark geschert wird.

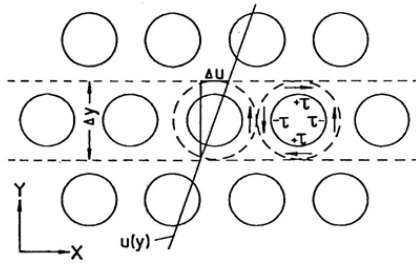


Bild 169: Drehung von Festkörperteilchen in einer Flüssigkeit (24)

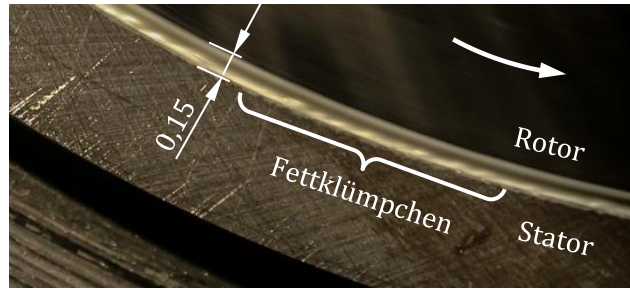


Bild 170: Axialspalt - 0,15 mm bei 25 min⁻¹ (19)

Bild 171 zeigt den axialen Dichtspalteingang des Radialspalt-Dichtsystems mit Klümpchenbildung und Lufteneinschluss als Schema.

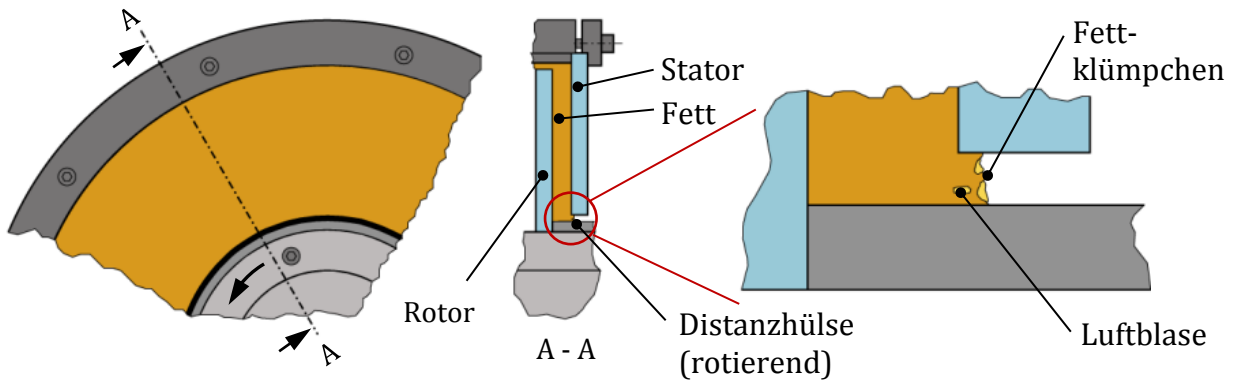


Bild 171: Phasengrenze von Fett und Luft im axialen Spalteingangsbereich

Auswirkung der Einzelphänomene auf die Gesamtströmung beim Öffnen des Dichtspaltes:

In Bild 172 a bis p ist der Dichtspalt-Öffnungsvorgang bei Fett B und 500 min⁻¹ dargestellt. Die zuvor beschriebenen Einzeleffekte kommen hier alle vor und so kann erklärt werden, wie bei diesem Dichtsystem die vorliegende Zirkulationsströmung (Bild 147) zum Erliegen kommt - genauer warum bei hochviskosen Fetten die Fettrückströmung an der Statorlamelle nicht wieder in den Einflussbereich der unter Fliehkrafteinfluss stehenden Rotorströmung kommen kann.

In Bild 172 a, das in den ersten Sekunden des Versuchs entstand, ist erkennbar, dass Luft an der Phasengrenze im axialen Dichtspalteingangsbereich eingedrungen und in den Saugbereich der Rotorströmung (ganz am Innendurchmesser, weißer Pfeil) vorgedrungen war. Dieser Vorgang ist in Bild 173 schematisch dargestellt. Die Phasengrenze zeigt sich somit auch hier als Schwachstelle, an der es bei hochviskosen Fetten folglich zum Abfall der Viskosität kommen kann. Es wird dann anstelle von Fett Luft in den Dichtspalt eingesaugt. Ist Luft ins Dichtsystem eingedrungen, so reißt aufgrund der großen Viskositätsunterschiede zwischen gescherten und ungescherten Bereichen im Fett der Dichtspalt großflächig auf. Die Bilder a bis j entstanden innerhalb der ersten 5 Sekunden des Versuchs. Da der geöffnete Spaltbereich stets an der selben Stelle verharrt, kommt es auch hier zu Quetschströmungen durch atmende Spalte. Im weiteren Verlauf des Versuchs setzt sich der Vorgang fort und das jetzt überschüssige Fett verlässt den Dichtspalt über den Dichtspalteingang und legt sich dort als Fettkragen ab. Bild l entstand nach 10 Sekunden Versuchslaufzeit. Ab ca. 20 Sekunden Versuchslaufzeit sind Quetschströmungen (weißer Pfeil in Bild m und Bild n) erkennbar, die weiteres Fett zum Dichtspalteingang schieben. Nach 45 Sekunden hatte sich der Dichtspalt vollständig geöffnet. Rotor und Stator sind nur noch mit Restfettsschichten benetzt, die sich nicht mehr berühren.



Bild 172: Dichtspaltöffnung bei 500 min⁻¹ - Fett B

Initiale Luftblase bei „a“ breitet sich zu vollständig geöffnetem Dichtspalt bei „p“ aus.

In Bild 173 ist der Beginn der Dichtspaltöffnung dargestellt. Bereits hier wird deutlich, dass ein großflächiges Aufreißen des Dichtspaltes die Zirkulationsströmung (gestrichelt eingezeichnet) sehr schnell unmöglich macht.

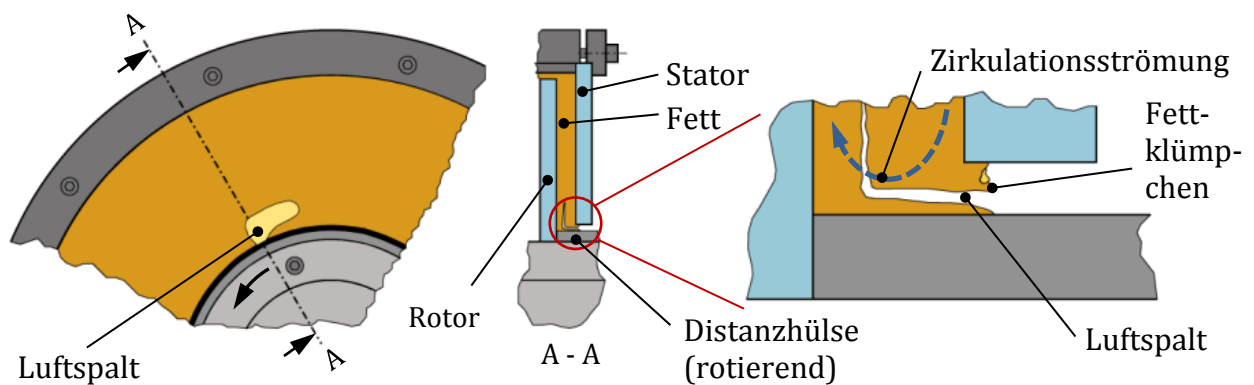


Bild 173: Initiale Dichtspaltöffnung

7.2.3.2 Ursache, die dem schnellen Öffnen des Dichtspaltes bei hochviskosen verschmutzten Fetten entgegenwirkt

Wird nun nach den Veränderungen des Fließverhaltens in Dichtspalten von stark verschmutztem Fett gesucht, so ist das erschwerte Öffnen der Spalte neben einem erhöhten Reibmoment an erster Stelle zu nennen. Dieser Effekt wurde auch in anderen Untersuchungen am Institut für Maschinenelemente (23) bei Fetten mit Festschmierstoffpartikeln festgestellt.

Wird die Zirkulationsströmung in Kapitel 7.2.3.1 betrachtet, so können die Effekte, die das Ausfordern auslösen, sehr gut beobachtet werden. Wie bereits vorher beschrieben, befindet sich die Schwachstelle der Strömung an der Phasengrenze zwischen Luft und Fett am Übergang von Stator- zu Rotorströmung. Hier wird durch unterschiedliche Scherung ein Aufreißen des Dichtspaltes durch ein örtlich begrenztes Absinken der Viskosität und das Ansaugen von Luft beobachtet. Würde man nun dem Fett eine große Anzahl an Staubpartikeln zugeben, könnten die Partikel an dieser Stelle im Fett ihre Wirkung zeigen und als eine Art Armierung die Schwachstelle stabilisieren. Bild 174 zeigt den Bereich der Phasengrenze im Dichtsystem. Links ist das Fett mit vielen großen Partikeln vermischt, auf der rechten Seite sind es kleine Partikel. Scher-, Zug- und Druckkräfte werden über die mechanisch stabilen (Schmutz-)Partikel weitergeleitet. Diese haben eine räumlich viel größere Ausdehnung als die Verdickerteilchen im Fett. Scher- und Zugkraftspitzen, die z. B. bei atmenden Dichtspalten auftreten, wirken durch die Partikel so auf einem größeren Bereich auf die „Fetteilchen“ ein. Die Folge davon wäre eine lokal geringere Scherung und dies wiederum bewirkt einen geringeren Abfall der Viskosität. In gewissen Grenzen können somit große Partikel, wenn sie in genügend großer Anzahl vorliegen, Fett besser stabilisieren als viele kleine Partikel. Werden die Größen von Verdicker (Kap. 5.2.1.2) und Schmutzpartikeln (Kap. 5.3.1) miteinander verglichen, so ist diese Vermutung realistisch. Die Schmutzpartikel sind um ein Mehrfaches größer und müssen in genügend großer Anzahl (18) vorkommen.

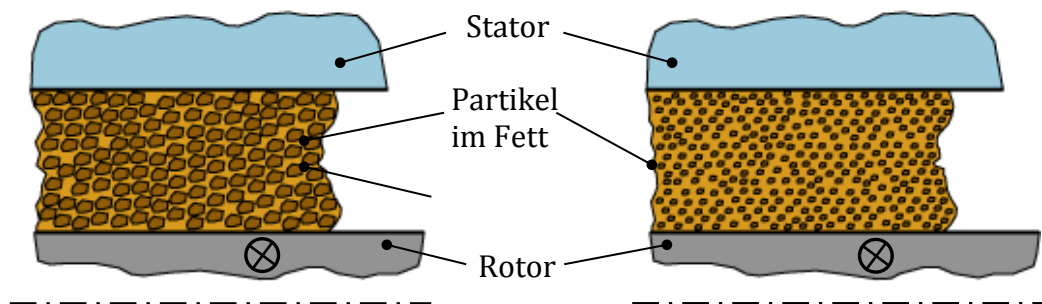


Bild 174: Wirkung von Partikeln im Fett

Die großen Partikel links überbrücken einen größeren Fettbereich als die kleineren rechts.

Bild 175 und Bild 176 zeigen die direkten Auswirkungen der Partikel im Fett bei den Versuchen. Beim Dichtsystem in Bild 175 öffnete sich bei Fett B ohne Partikel der Dichtspalt nach sehr kurzer Zeit. Der Fettkragen zeigt ein sehr unruhiges Bild mit zeitweiser Klümpchenbildung. Die Klümpchen wurden der Gewichtskraft folgend weit entfernt vom Spalteingang im unteren Bereich abgelagert.



Bild 175: Fett B - 500 min⁻¹ - ohne Staub (18)

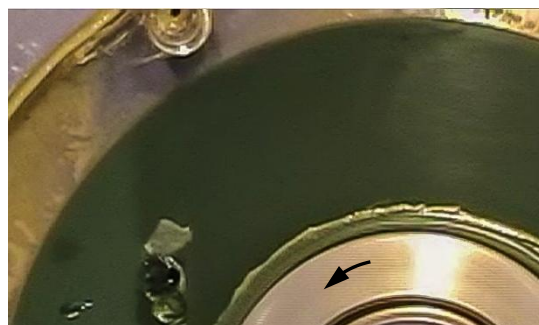


Bild 176: Fett B - 500 min⁻¹ - mit 75 % Staub (18)

Wurde beim gleichen Versuchsablauf dem Fett 75 Massenprozent Staubpartikel zugefügt, blieb der Dichtspalt geschlossen. Der Fettkragen zeigte ein ruhiges Bild. Es wurden keine Fettklumpchen außerhalb des Strömungsbereiches am Fettkragen abgelagert. Dies bedeutet, dass Fett bei Bedarf hätte wieder in den Dichtspalt zurückgefördert werden können. Die Farbvermischung zeigt eine voll ausgeprägte Zirkulationsströmung, wie sie im Schema in Bild 177 zu sehen ist. Es kommt nicht zum Ansaugen von Luft an der Phasengrenze. Die Strömung ist stabil.

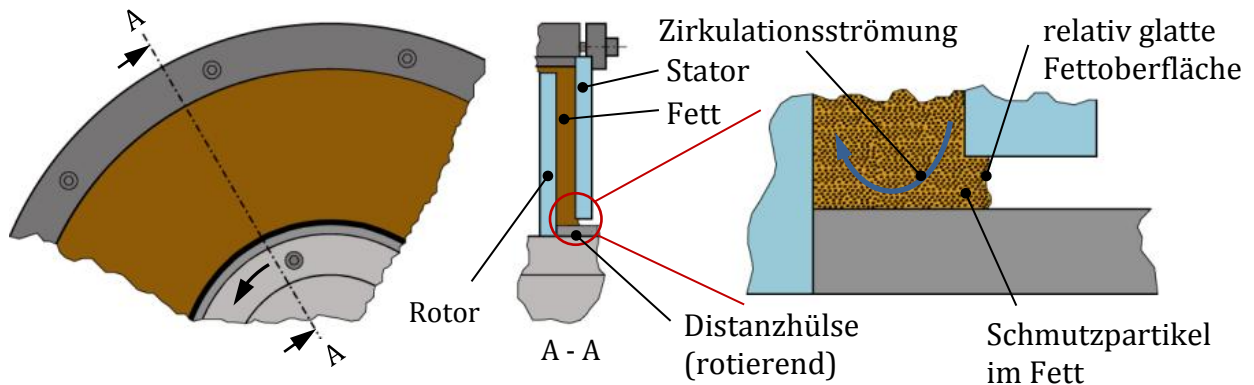


Bild 177: Zirkulationsströmung durch Partikel im Fett

7.2.3.3 Kurzzusammenfassung der Strömungsmechanismen von Fett im Dichtspalt

Folgende Effekte führen zum Öffnen des Dichtspaltes oder erschweren diesen Vorgang:

- Bei steiferen Fetten sind die Viskositätsänderungen infolge von Scherung viel größer. Die Fettströmung wird dadurch störanfälliger.
- Atmende Dichtspalte rufen eine Quetschströmung im Fett hervor, wodurch dieses ausgefördert wird und sich der Spalt öffnet.
- Fett wird an Phasengrenzen von Fett und Luft lokal stark geschert. Hierdurch entstehen große Viskositätssprünge im Fett, die zum großflächigen Aufreißen des Dichtspaltes führen können. Die Fett-Zirkulationsströmung im Dichtspalt wird dadurch unterbrochen.
- Eine Fett-Luftverteilung im Dichtspalt verursacht Quetschströmungen, die Fett ausfördert und den Spalt öffnet.
- Die Phasengrenze am Dichtspalteingang ist eine Schwachstelle für eine stabile Strömung hochviskoser Fette und durch große Viskositätsschwankungen gekennzeichnet.
- Partikel in großer Konzentration im Fett haben einen strömungsstabilisierenden Effekt und wirken daher einer Spaltöffnung entgegen.

7.3 Druckhalte- und Luftdurchsatzversuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Druckhalte- und Luftdurchsatzversuche vorgestellt.

7.3.1 Versuchsergebnisse Druckhalteversuche

Die Druckhalteversuche wurden nur bei den Dichtsystemen durchgeführt, die einen geschlossenen Dichtspalt über längere Zeit ermöglichten. Die Druckhalteversuche werden in Kapitel 6.3.1 vorgestellt.

7.3.1.1 Ergebnisse Druckhalteversuche Innenrotor-Dichtsystem 04

Auf dem nachfolgenden Diagramm (Bild 178) ist das Druckhaltevermögen der einzelnen Fette A bis F über der Drehzahl aufgetragen. Bei 10 min^{-1} bleibt der Dichtspalt bei Fetten aller Konsistenzklassen geschlossen. Bei 50 bis 100 min^{-1} wird das Fett im Spalt etwas mehr geschert. Diese Scherung bewirkt im Fett ein Herabsetzen der scheinbaren dynamischen Viskosität, und so reicht die Zusatzkraft eines angelegten Druckes aus, dass das Fett aus dem Spalt gefördert wird und sich dieser öffnet. Bei höheren Drehzahlen kann die Fliehkraft immer mehr der, durch den Druck hervorgerufenen, äußeren Kraft entgegenwirken. Dies ist natürlich nur bei Fetten möglich, deren Fähigkeit im Dichtspalt zu verbleiben groß genug ist. Bei den Fetten A und B öffnet sich der Spalt auch ohne Druckbeaufschlagung bei fast allen Drehzahlen. Am eindrucksvollsten wird dieser Effekt deutlich bei Fett C. Hier steigt der abdichtbare Druck kontinuierlich mit der Drehzahl an. Bei 3000 min^{-1} können 130 mbar Druckdifferenz ertragen werden ohne dass der Spalt aufreißt. Bei allen anderen Fetten treten ab 2500 min^{-1} Störungen im Spalt auf, die keine Druckbeaufschlagung mehr zulassen.

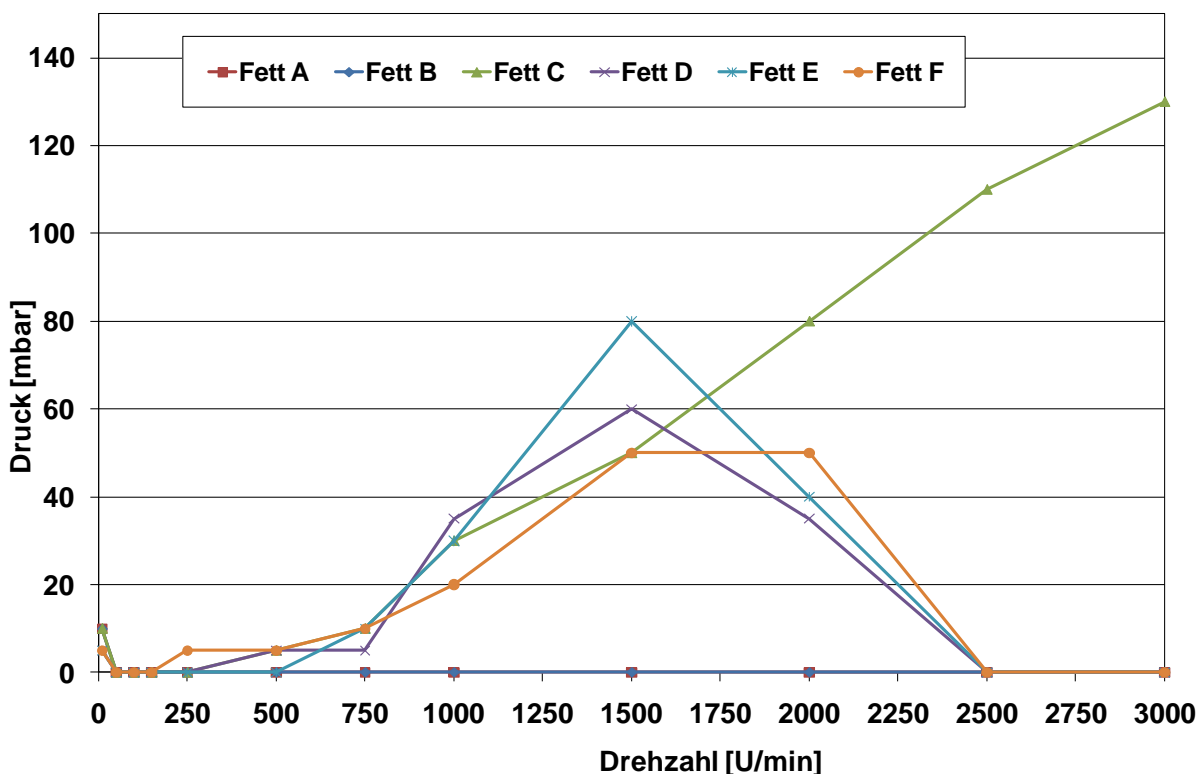


Bild 178: Druckhaltevermögen der Fette A bis F bei Dichtsystem 4, 0,75 mm, 7 Lamellen

7.3.1.2 Ergebnisse Druckhalteversuche Außenrotor-Dichtsysteme

Auf dem nachfolgenden Diagramm (Bild 179) ist das Druckhaltevermögen der Fette A und C an den Dichtsystemen AU 1 (axiale Spalthöhe 2 mm) und AU 4 (axiale Spalthöhe 0,75 mm) über der Drehzahl aufgetragen. Bei Drehzahlen bis 500 min^{-1} öffnet sich der Spalt bei beiden Fetten und Dichtsystemen meist schon bei einem Überdruck von 5 mbar. Im Spalt wird das Fett bei Wellenrotation geschert. Diese Scherung bewirkt im Fett ein Herabsetzen der scheinbaren dynamischen Viskosität, und so reicht die Zusatzkraft eines angelegten Druckes aus, dass das Fett aus dem Spalt gefördert

wird und sich dieser öffnet. Insgesamt ist bei den außenrotierenden Dichtsystemen das Druckhaltevermögen etwas größer als bei den Innenrotor-Dichtsystemen und so kann bei kleinen Dichtspalthöhen (Dichtsystem AU 4) bei beiden Fetten eine kleine Druckdifferenz ab 500 min^{-1} ertragen werden. Die ertragbare Druckdifferenz nimmt mit weiter ansteigender Drehzahl ebenfalls zu. Bei größerer Spalthöhe hat der einseitig anstehende Druck einen stärkeren Einfluss. Erst ab einer Drehzahl von 1500 min^{-1} kann durch die wirkende Fliehkraft hier dem Druck entgegengewirkt werden. Der Kurvenverlauf ist bei AU 1 erheblich steiler als bei AU 4. Auffällig ist der fast identische Kurvenverlauf beider Fette bei den Druckhaltevermögen-Versuchen.

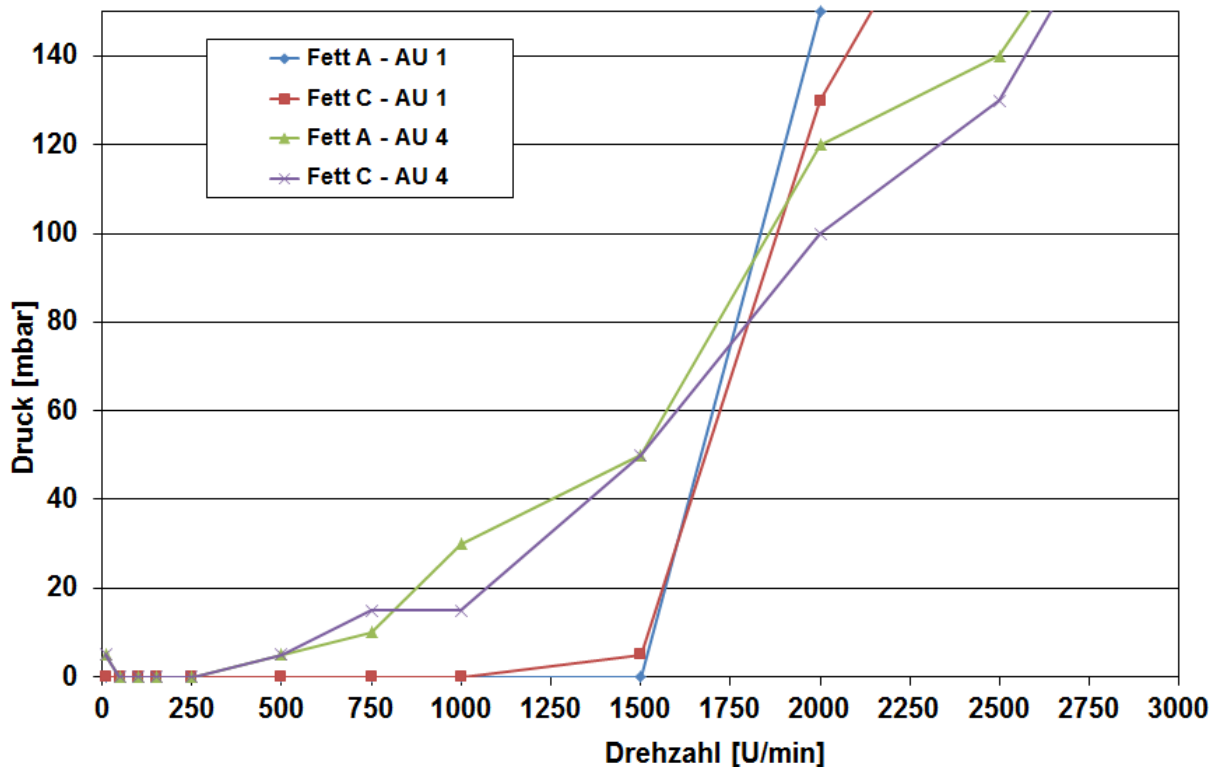


Bild 179: Druckhaltevermögen der Fette A und C bei Dichtsystemen AU 1 und AU 4, 7 Lamellen

7.3.1.3 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse der Druckhalteversuche

Wird die Fliehkraft genutzt, ist es bei fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen mit besonderen Maßnahmen möglich gegen eine kleine Druckdifferenz abzudichten. Sie sind hierfür aber nicht grundsätzlich geeignet.

7.3.2 Luftdurchsatzmessungen

Bei den Luftdurchsatzmessungen wurde die Luftmenge gemessen, die bei bestimmten einseitigen Überdrücken, verschiedener Drehzahlen und geöffnetem Dichtspalt durch die Dichtsysteme hindurchströmt. Der Dichtspalt wurde hierbei möglichst bei der Prüfdrehzahl zum Öffnen gebracht.

7.3.2.1 Versuchsergebnisse Luftdurchsatzmessungen bei Dichtsystem 4 und Fett A

Bei den Ergebnissen der Luftdurchsatzmessungen wurden hier stellvertretend die Ergebnisse von Fett A ausgewählt. Auf dem nachfolgenden Diagramm in Bild 180 ist der Luftdurchsatz durch das Dichtsystem in l/min über dem einseitig anstehenden Luftüberdruck am vorderen Dichtspaltende dargestellt. Bei den Volumenstromangaben handelt es sich um Normliter, bezogen auf 20°C und einen Luftdruck von 1013 mbar . Die Drehzahlen 0 bis 250 min^{-1} wurden zusammengefasst, weil hier die Kurven im Diagramm alle nahezu übereinanderliegen würden. Allgemein ist die Änderung des Luftdurchsatzes über der Drehzahl nur sehr gering. Erst bei der Kombination von Drehzahlen

ab 2000 min^{-1} und einem Druck ab 20 mbar kommt es zu Fettbewegungen im Spalt. Sie vergrößern den Spalt und so steigt der Luftdurchsatz hier an.

Wird der Luftdurchsatz fettgefüllter Dichtspalte mit dem von Dichtsystemen ohne Fettfüllung verglichen, so fällt der positive Einfluss der Fettfüllung auf das Dichtverhalten erst richtig auf. Verglichen mit der Spalthöhe des nicht mit Fett gefüllten Dichtspaltes, die zwischen den Lamellen nur 0,75 mm beträgt, reduziert sich die Spalthöhe auf einen Bruchteil. Bei überschlägigen Berechnungen konnten z. B. mittlere Dichtspalthöhen von 0,26 mm bei Dichtsystem 4, 2000 min^{-1} und 20 mbar Druck ermittelt werden. Der Luftdurchsatz variiert bei diesem Vergleich beinahe um den Faktor 10.

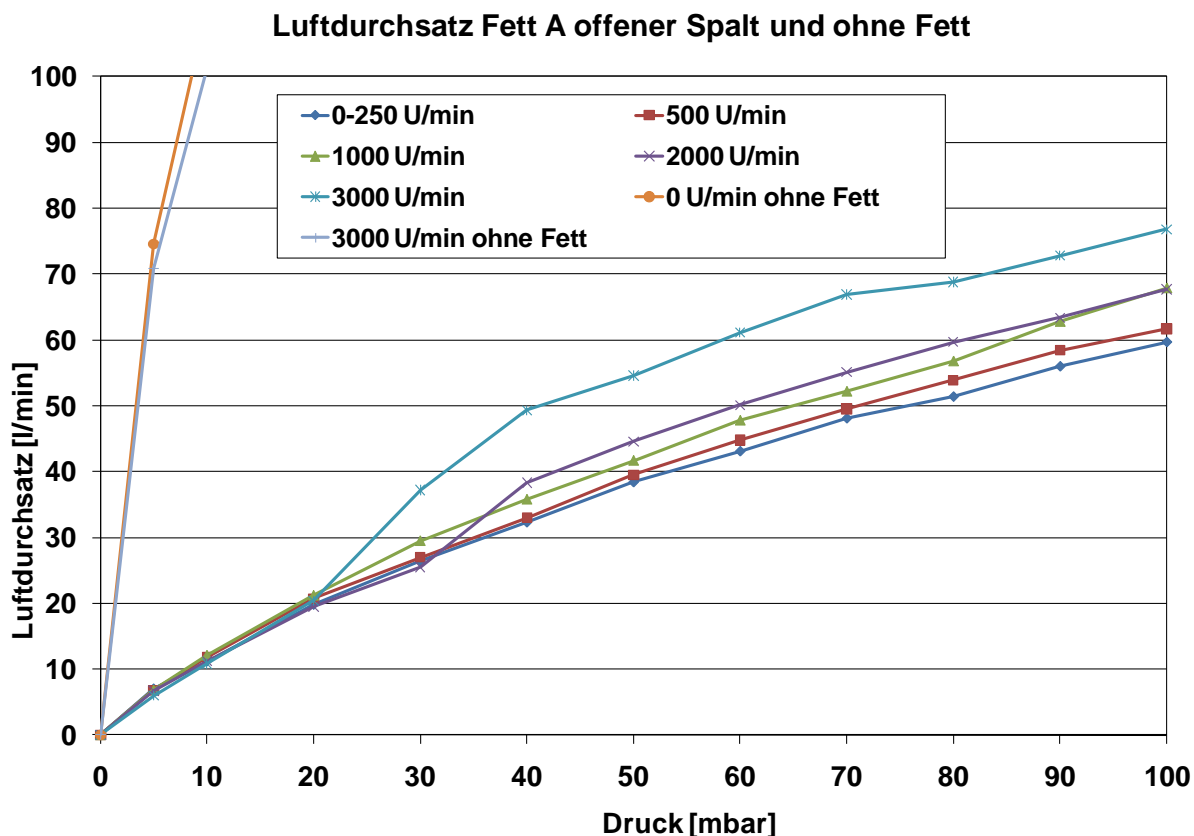


Bild 180: Luftdurchsatz bei Dichtsystem 4, Fett A, und ohne Fett, 0,75 mm Spalthöhe, 7 Lamellen

7.3.2.2 Versuchsergebnisse Luftdurchsatzmessungen bei Dichtsystemen AU 1 und AU4

Die Ergebnisse der Luftdurchsatzmessungen der Fette A und C bei den Dichtsystemen AU 1 und AU 4 (Kapitel 5.1.1.2) sind in den Diagrammen (Bild 181 bis Bild 184) dargestellt. Hier ist jeweils der Luftdurchsatz durch das Dichtsystem in l/min über dem einseitig anstehenden Luftüberdruck am vorderen Dichtspaltende dargestellt. Die Drehzahlen 0 bis 250 min^{-1} wurden wieder zusammengefasst. Zusätzlich ist in jedem Diagramm der Luftdurchsatz bei 0 und 3000 min^{-1} ohne Fett im jeweiligen Dichtsystem abgebildet.

Werden nun die Diagramme miteinander verglichen, so können einige Tendenzen abgelesen werden. Mit steigender Drehzahl sinkt allgemein der Luftdurchsatz. Von der schnellen Drehung des Rotors hervorgerufene Verwirbelungen im Dichtsystem führen zu diesen Messergebnissen (Bild 181 bis Bild 184). Ebenfalls zur Reduktion des Luftdurchsatzes führt die Verringerung der Dichtspalthöhe (vgl. Bild 181 mit Bild 183 und Bild 182 mit Bild 184). Ein steiferes Fett kann ebenfalls den Luftdurchsatz mindern. Hat sich der Dichtspalt geöffnet, so verbleibt das Fett höherer Konsistenzklassen besser an Ort und Stelle, was ein weiteres Öffnen des Spaltes z. B. durch die an den Lamellen vorbeiströmende Luft, erschwert (vgl. Bild 181 mit Bild 182 und Bild 183 mit Bild 184). Wird der Luftdurchsatz fettgefüllter Dichtspalte mit dem von Dichtsystemen ohne Fettfüllung verglichen, so fällt der positive Einfluss der Fettfüllung auf das Dichtverhalten auch hier auf. Mit der Fettfüllung können somit auf einfache Weise sehr kleine Dichtspalthöhen realisiert werden.

An dieser Stelle soll jetzt auch noch auf ein paar besondere Phänomene hingewiesen werden. Der Luftdurchsatz unterliegt auch bei selben Randbedingungen (Druck, Drehzahl und Temperatur) starken Schwankungen. Dies ist einerseits in der ungleichmäßig und nach jedem Freiräumen durch das Fett anders gestalteten Spaltform begründet. Aber auch die unterschiedliche Ausbildung der Luftströmung (laminar, turbulent) hat hier einen großen Einfluss. In Bild 182 sind für die Drehzahlen $0-250 \text{ min}^{-1}$ und 500 min^{-1} jeweils 2 Kurven eingezeichnet. Je nachdem, ob die Druckkurve von oben oder von unten bei Beibehaltung der Drehzahl durchfahren wurde, kamen unterschiedliche Luftdurchsätze heraus. Es gab also eine Hysterese.

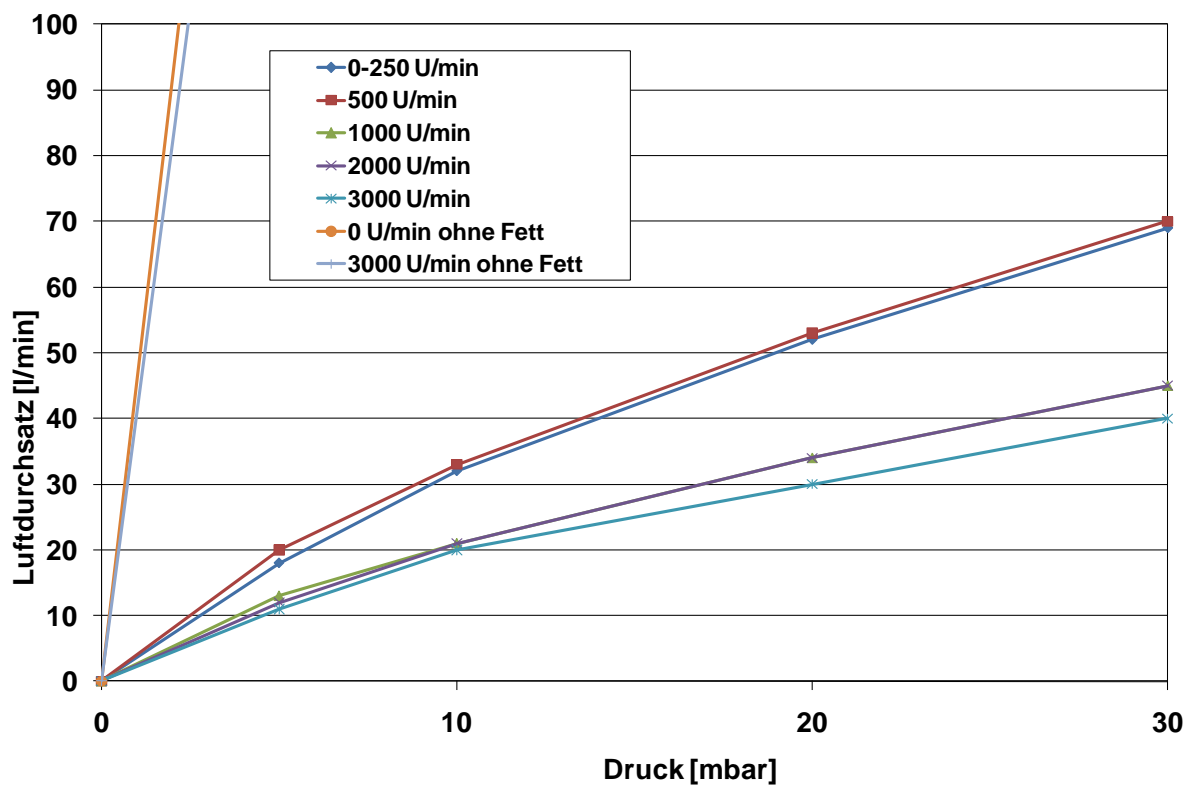


Bild 181: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AU 1, Fett A, offener Spalt, 2 mm Spalthöhe, 5 Lamellen

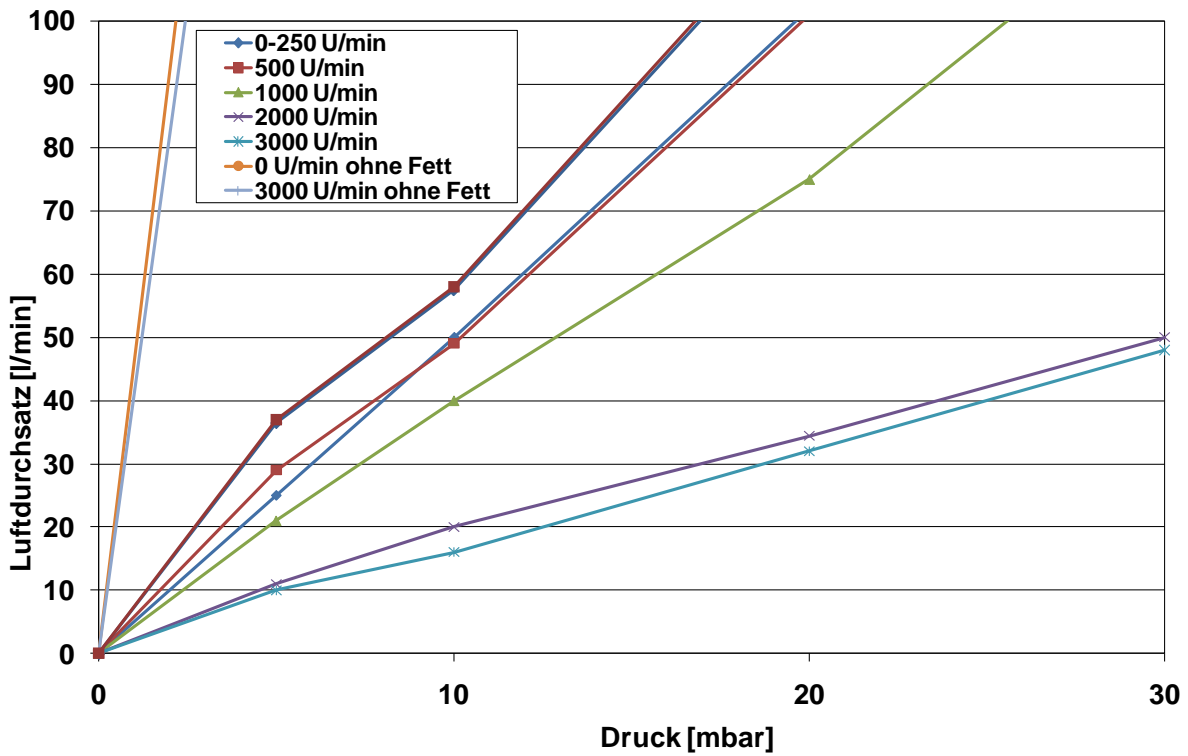


Bild 182: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AU 1, Fett C, offener Spalt, 2 mm Spalthöhe, 5 Lamellen

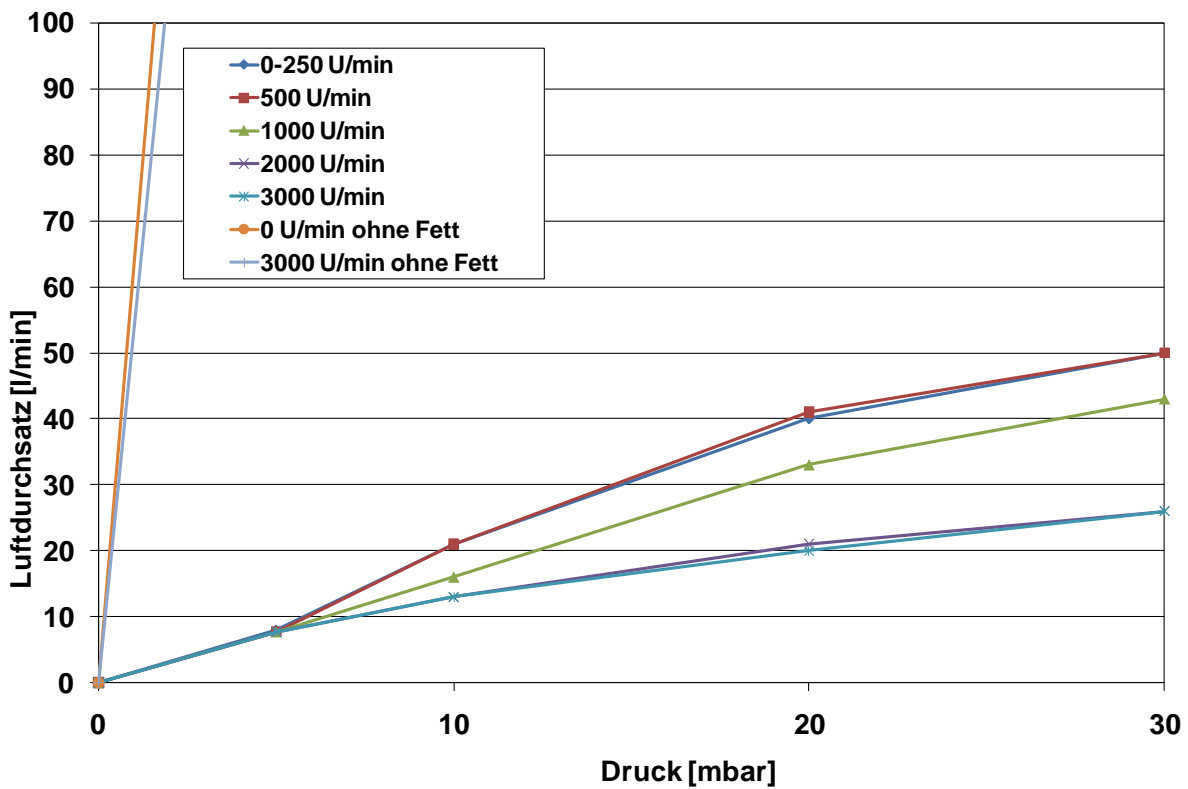


Bild 183: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AU 4, Fett A, offener Spalt; 0,75 mm Spalthöhe, 5 Lamellen

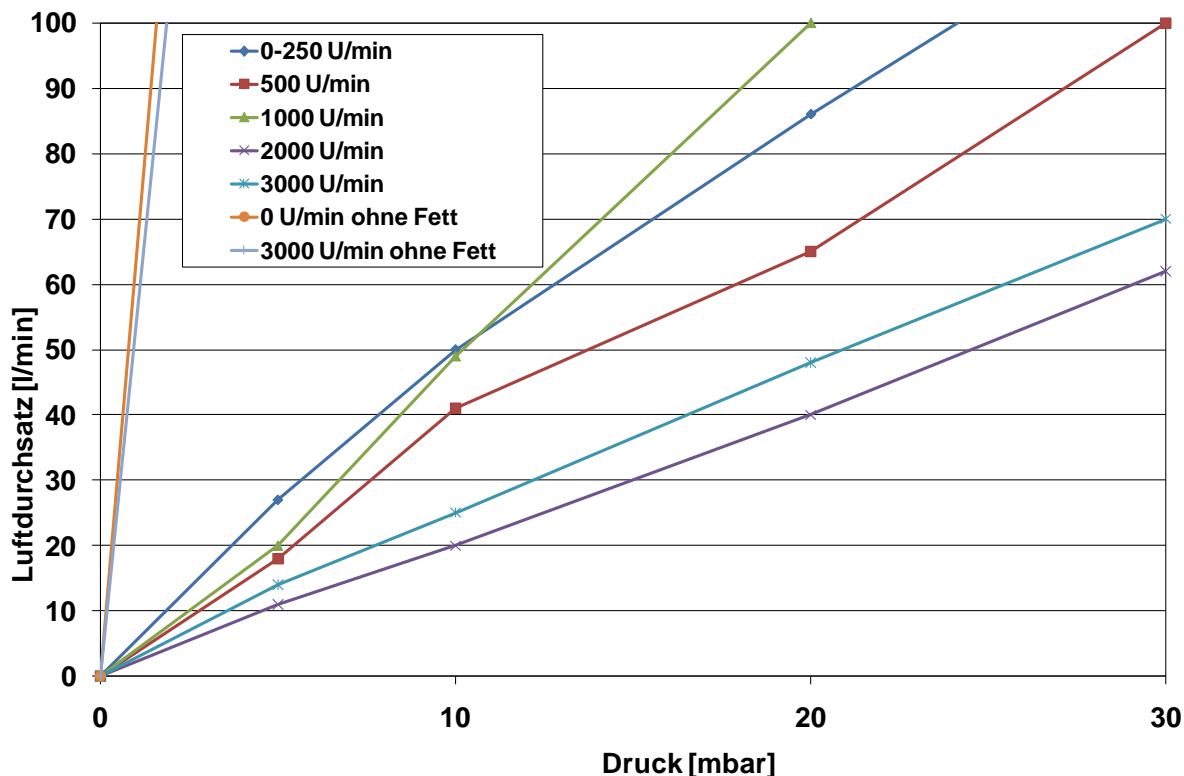


Bild 184: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AU 4, Fett C, offener Spalt, 0,75 mm Spalthöhe, 5 Lamellen

7.3.2.3 Versuchsergebnisse Luftdurchsatz bei Dichtsystemen AUS 01 und AUS 03

In den Diagrammen auf Bild 185 bis Bild 188 ist der Luftdurchsatz der Axialspalt-Dichtsysteme AUS 01 und AUS 03 (Kapitel 5.1.2) bei den Fetten A und C und ohne Fettfüllung bei den Drücken 5, 10, 20 und 30 mbar dargestellt. Auch hier ist der positive Effekt einer Fettfüllung auf die Reduktion des Luftdurchsatzes klar erkennbar. Teilweise sind hochviskosere Fette (Fett A) für diese Drosselfunktion etwas besser geeignet als niedrigviskose Fette (Fett C). Bei abknickenden Kurven wird folgender Vorgang im Dichtspalt vermutet: Bei Wellenrotation wirkt im geöffneten Dichtspalt auf das Fett die Fliehkraft, die Luftströmung in Umfangsrichtung und durch die Druckdifferenz eine längs des Dichtspaltes verlaufende zusätzliche Luftströmung. Bei einer überschlägig berechneten mittleren Luftspalthöhe von 0,31 mm bei Dichtsystem AUS 01, Fett A, 20 mbar Überdruck und 18 l/min Luftdurchsatz ergibt sich z. B. eine Luftgeschwindigkeit von 3,11 m/s. Diese zusätzliche Luftströmung ist alleine nicht in der Lage das Fett im Dichtspalt zu verschieben. Es werden aber partiell im Zusammenspiel mit den anderen wirkenden Größen (Fliehkraft und Luftströmung in Umfangsrichtung) kleine Fettteilchen verschoben. Dies bewirkt vermutlich ein lokal kleinräumiges Verschließen des Dichtspaltes. An diesen geschlossenen Stellen wirkt nun wieder die Scherung im Fett und die Viskosität des Fetts verkleinert sich dramatisch. Der sich dort zusätzlich aufbauende Druck kann ein plötzliches Ausfördern von Fett aus dem Dichtspalt begünstigen.

Bei dieser Versuchsreihe lieferten Dichtsysteme mit kleinen Spalthöhen in Verbindung mit steifen Fetten das beste Ergebnis. Der Drehzahleinfluss auf die sich einstellende Fettspalthöhe war dagegen eher gering. Hier spielen die beim Öffnen des Fettspaltes herrschenden chaotischen Zustände eine größere Rolle. So liegt zum Beispiel bei der Drehzahl von 3000 min⁻¹ in den folgenden Diagrammen mehrmals der niederste, mal ein mittlerer und einmal der höchste Luftdurchsatz vor.

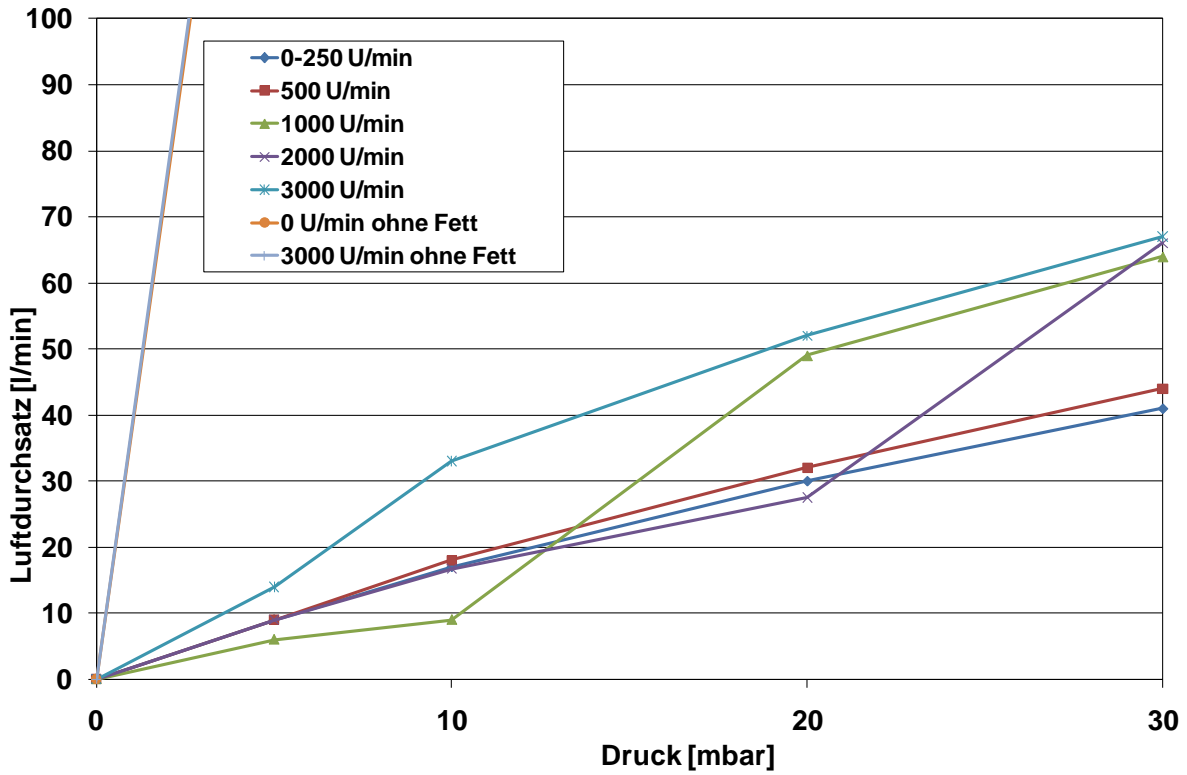


Bild 185: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AUS 01, Fett A und ohne Fett, offener Spalt, 2 mm Spalthöhe

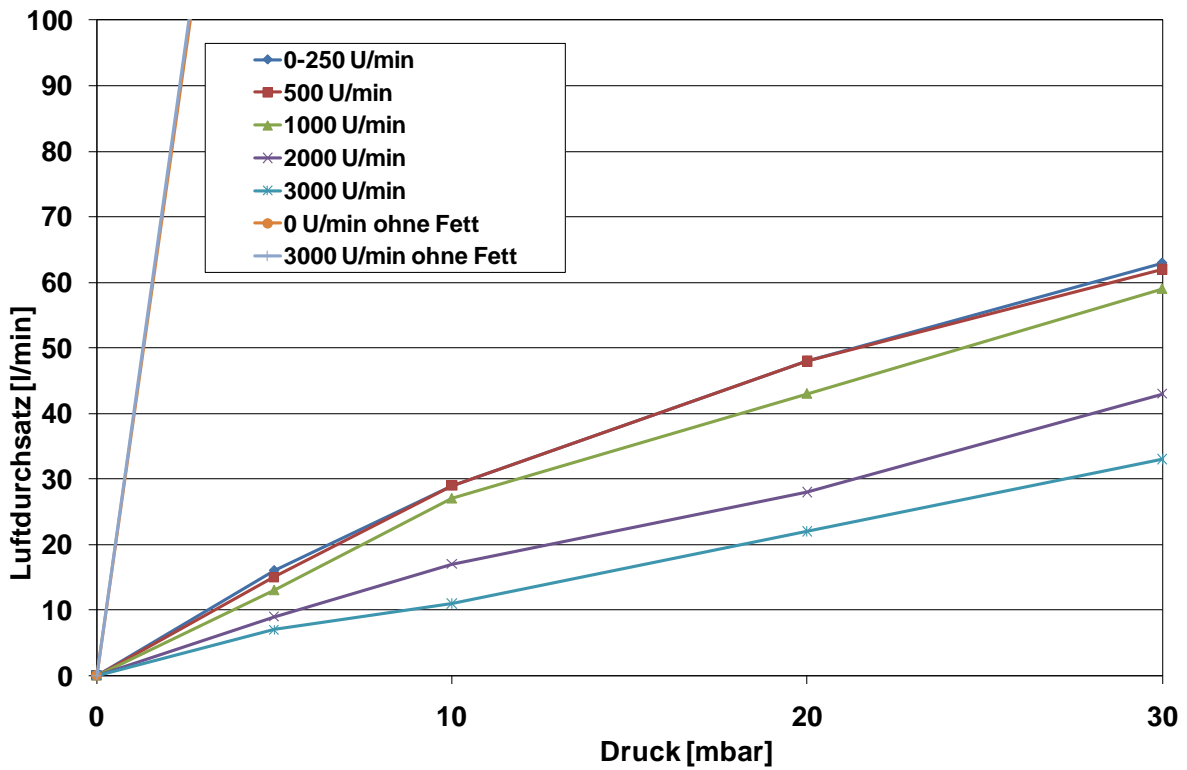


Bild 186: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AUS 01, Fett C und ohne Fett, offener Spalt, 2 mm Spalthöhe

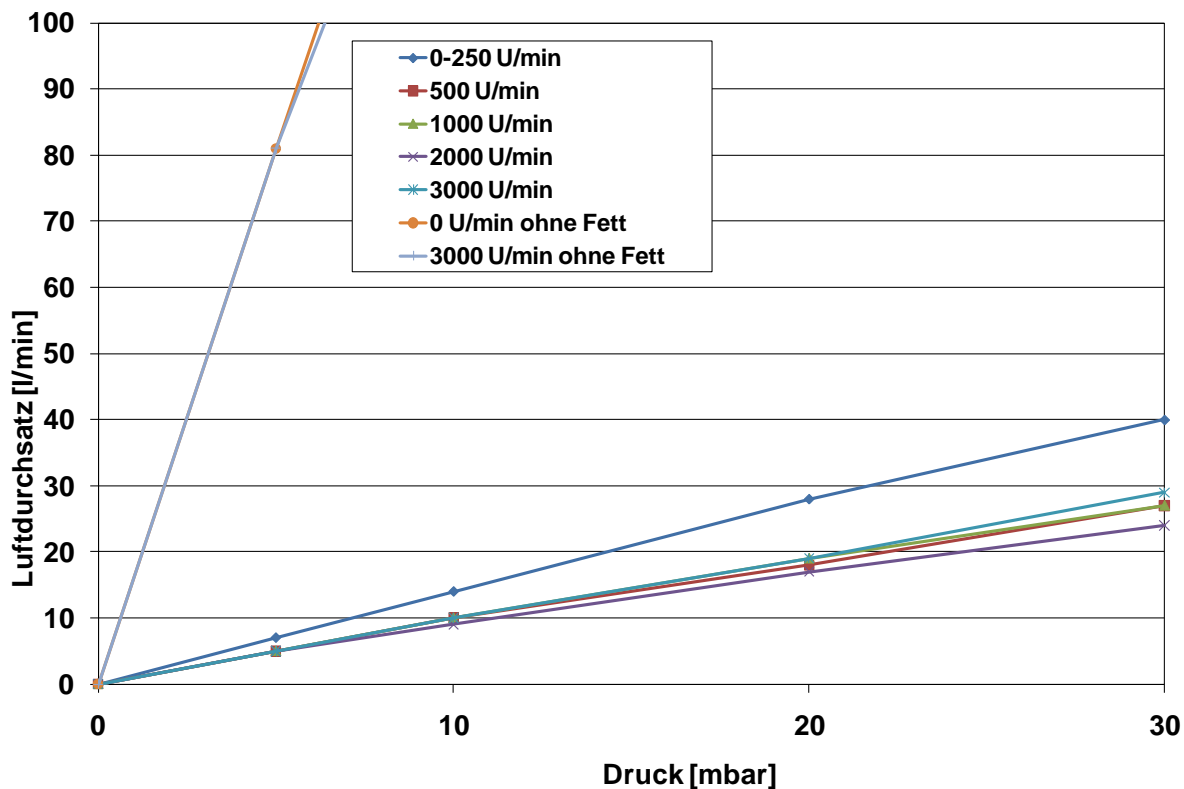


Bild 187: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AUS 03, Fett A, offener Spalt, 0,75 mm Spalthöhe

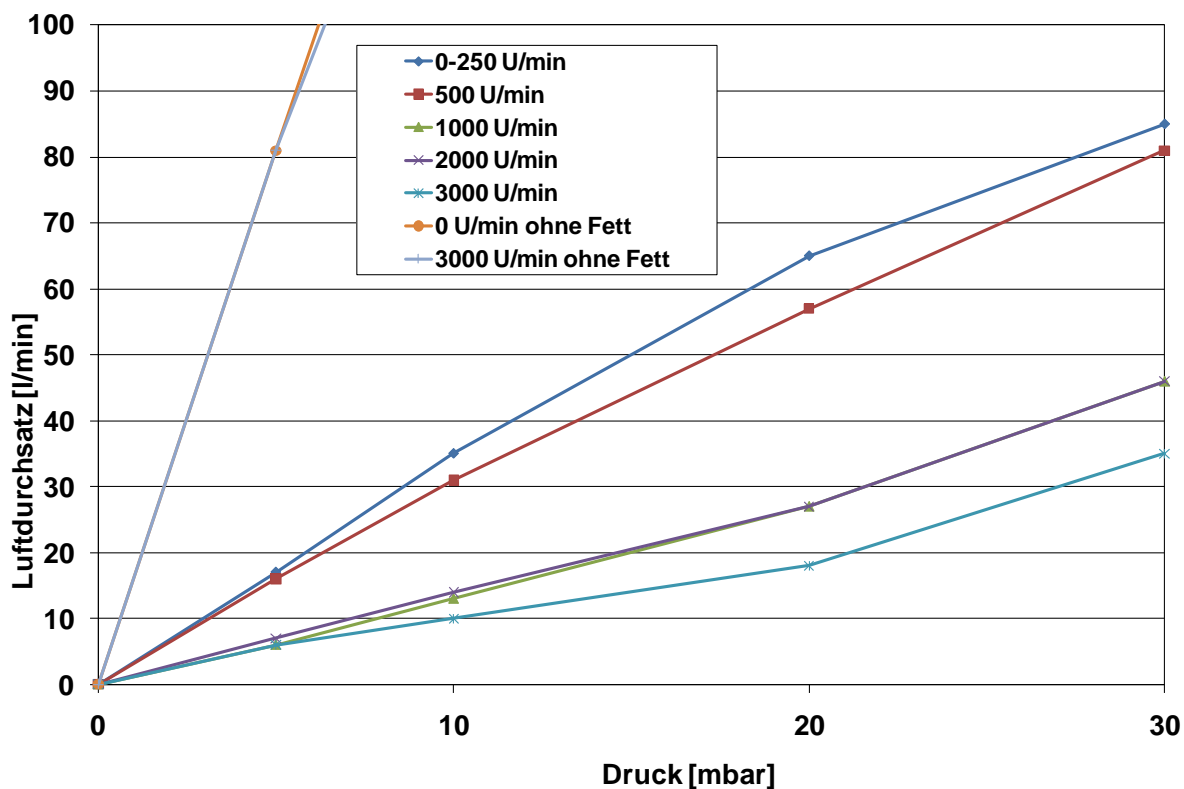


Bild 188: Luftdurchsatz bei Dichtsystem AUS 03, Fett C, offener Spalt, 0,75 mm Spalthöhe

7.3.2.4 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse der Luftdurchsatzmessungen

Durch Fett in den Spalten Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen kann der Luftdurchzug durch das Dichtsystem um ca. Faktor 10 reduziert werden. Die Dichtspalthöhe des Labyrinthspalts hat hierbei einen kleineren Einfluss als die Steifigkeit des Fetts. Steifere Fette verbleiben im Spalt besser an Ort und Stelle. Der Drehzahleinfluss auf den Luftdurchsatz bei steiferem Fett ist hierbei relativ gering.

7.4 Untersuchung FBFWD bei Schmutzbeaufschlagung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche mit Schmutzbeaufschlagung an FBFWD vorgestellt.

7.4.1 Versuchsergebnisse bei Staubbeaufschlagung

Versuche mit Staubbeaufschlagung wurden sowohl an Innenrotor-Dichtsystemen als auch an Axialspalt-Dichtsystemen durchgeführt. Bei den Versuchen am Innenrotor-Dichtsystem wurde das Dichtsystem 4 (Kap. 5.1.1.1) ausgewählt. Bei diesem Dichtsystem mit 7 Lamellen und einer Spalthöhe zwischen den Lamellen von 0,75 mm, waren die Momentkurvenverläufe bei den Kurzzeitversuchen am homogensten. Zu diesem Zeitpunkt war man noch der Meinung, dass für eine gute Dichtwirkung gegenüber Stäuben ein geschlossener Dichtspalt vorhanden sein sollte. Dieser Zustand war am besten mit Dichtsystem 4 zu erreichen.

Bei den Axialspalt-Dichtsystemen wurden sowohl Dichtsysteme der Bauform AUS als auch die der Bauform EIN untersucht. Die Ergebnisse der Bauform AUS haben sich als die wirkungsvollsten erwiesen. Deren Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben. Die Versuche an den Dichtsystemen der Bauform EIN wurden aus verschiedenen Gründen abgebrochen: Die Ergebnisse der Versuche der Bauform EIN waren nicht reproduzierbar. Entweder öffnete sich der Dichtspalt der Kombination, die aus einem sog. abgedeckten Eingangsspalt und einem sich daran anschließenden prinzipbedingt langen Axialspalt bestand, und funktionierte so gut, dass entweder keine Partikel bis ins eigentliche Labyrinth vordrangen, oder der Dichtspalt blieb geschlossen und die eingedrungenen Partikel wurden von der dort vorherrschenden Strömung im ganzen Dichtsystem verteilt. Zudem wurde bei geschlossenem Dichtspalt durch die hohen inneren Reibungsverluste das Fett so warm, dass es seine für die Abdichtung notwendige Fließgrenze verlor und auch der Prüfstand nicht mehr fehlerfrei arbeiten konnte.

7.4.1.1 Staubbeaufschlagung bei Innenrotor-Dichtsystemen

Bei dieser Versuchsreihe (Beschreibung in Kapitel 6.4.1.2) wurde das Dichtsystem mit Staub und teilweise auch mit einem Druck von 5 mbar beaufschlagt. Die nachfolgend erläuterten Versuchsergebnisse wurden alle der Drehzahlgruppe 4 (1500 bis 3000 min⁻¹) entnommen. Es werden nachfolgend drei Versuche miteinander verglichen und die Fett-Staubverteilung der einzelnen Dichtlamellen eines jeden Versuches gegenübergestellt (Bild 190 bis Bild 214). Beim ersten Versuch kam Fett A zum Einsatz und es bestand am vorderen Spalteingang kein Überdruck zur Umgebung. Die im weiteren Verlauf aufgezeigten Bilder der linken Spalte gehören zu diesem Versuch. Der zweite Versuch wurde ebenfalls mit Fett A durchgeführt. Am vorderen Spalteingang bestand hier ein Überdruck von 5 mbar zur Umgebung. Bilder der mittleren Spalte gehören zu Versuch zwei. Fett C kam beim dritten Versuch zum Einsatz. Auch hier herrschte ein Überdruck in der Staubkammer von 5 mbar (Bilder Spalte rechts). Auf der nachfolgenden Abbildung (Bild 189) sind die Aufnahmeorte der Bilder eines jeden Versuches dargestellt. Es wurden Bilder vom Fett-Staubkragen auf der ersten Lamelle außen (Reihen 1, 2 und 3) und innen (Reihen 4 und 5) aufgenommen. Alle weiteren Reihen sind Bilder der Vorderseite der 1. (Reihe 6 und 7) und der 3. (Reihen 8 und 9) Innenlamelle.

Der Fett-Staubkragen ist bei allen drei Versuchen fast identisch. Der Eingangsspalt (Reihe 1) ist immer geöffnet. Auf den Bildern der Reihe 4, der Rückseite der ersten Außenlamelle, ist das Fett bei Versuch 1 nur ganz am Innendurchmesser stark mit Messingpartikeln durchsetzt. Bei Versuch 2 und 3 ist das sich auf der Lamelle befindende Fett durch viele Partikel verfärbt. Reihe 5 zeigt die

Fettoberflächen von Reihe 4 nochmals im Detail. Auf der zugehörigen Gegenseite (Reihen 6 und 7), der Vorderseite der ersten Innenlamelle, präsentiert sich ein ähnliches Bild – Versuch 1 fast staubfrei, Versuch 2 und 3 staubdurchsetzt. Der Dichtspalt bei Versuch 3 war hier geschlossen, was am aufragenden Fettring, der beim Trennen zweier durch einen Fettpalt verbunden Lamellen entsteht, zu sehen ist. Bei Versuch 1 und 2 war der Spalt geöffnet. Auf allen weiteren Lamellen war bei Versuch 1 kein Messingstaub mehr zu finden. Bei Versuch 2 nahm die im Fett auf den Lamellen gefundene Partikelzahl rapide ab. Auf den Bildern in Reihe 8 und 9 sind praktisch keine Partikel mehr zu finden. Werden nun noch die verbleibenden Bilder von Versuch 3 betrachtet (Reihen 8 und 9), so sind dort auch auf der letzten Innenlamelle noch viele Messingpartikel zu finden. Der Fettpalt blieb zwar geschlossen, doch haben innere Mischvorgänge im Dichtspalt die vom Fett aufgenommenen Partikel weitertransportiert.

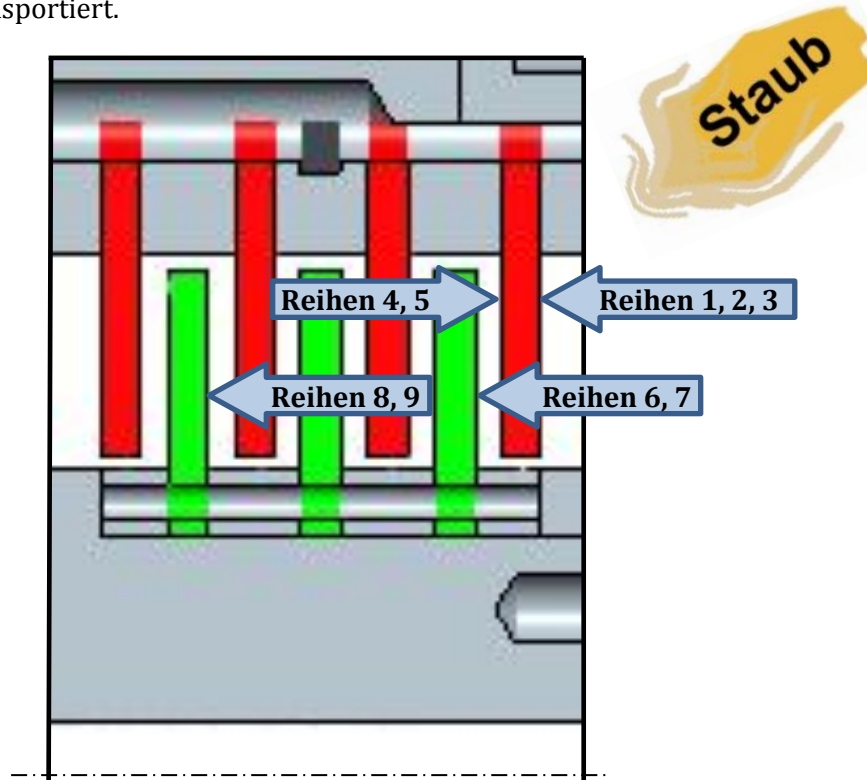


Bild 189: Aufnahmeorte der einzelnen Bilderreihen

Dichtung 4, Fett A, 0 mbar



Bild 190

Dichtung 4, Fett A, 5 mbar



Bild 197

Dichtung 4, Fett C, 5 mbar



Bild 206



Bild 191



Bild 198



Bild 207



Bild 192



Bild 199



Bild 208

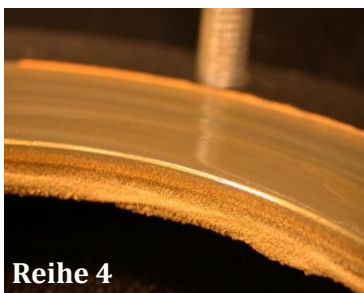


Bild 193

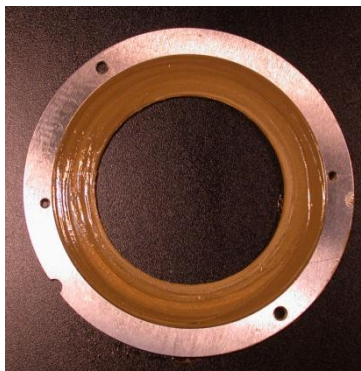


Bild 200



Bild 209



Bild 194



Bild 201

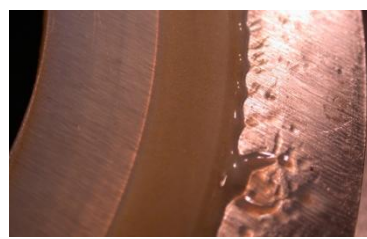


Bild 210



Bild 195

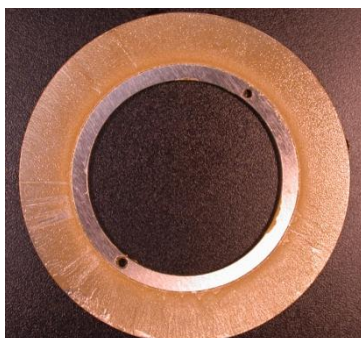


Bild 202



Bild 211



Bild 196



Bild 203

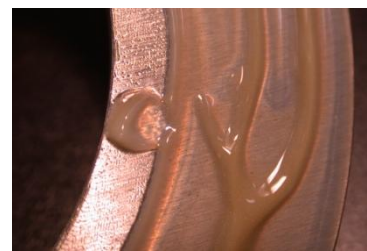


Bild 212

Reihe 8



Bild 204



Bild 213

Reihe 9



Bild 205



Bild 214

Bild 190 bis Bild 214: Fett-Staubverteilung in den Dichtspalten bei Fett A bei 0 und 5 mbar Kammerdruck und bei Fett C bei 5 mbar Kammerdruck

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse der Radialspalt-Dichtsysteme bei Staub:

Abschließend kann hier festgestellt werden, dass beim Einsatz von fettgefüllten BFWD ohne Druckunterschiede und geöffnetem Fettspalt die Schutzwirkung vor feinen Stäuben im hier vorgenommenen Versuch 1 sehr gut war. Bei Druckbeaufschlagung (Versuch 2) sind die Partikel erheblich weiter in das Dichtsystem eingedrungen, die Ausgangsspalte waren dennoch fast frei von Partikeln. Für beide Versuche gilt aber: Ein selbständiges Reinigen bzw. Ausfördern bei Partikelsättigung ist bei dieser Labyrinthbauart mit mehreren fliehkraftaktiven Kammern nicht möglich. Wird allerdings ein Fett verwendet, mit dem der Dichtspalt geschlossen gehalten werden kann, wie bei Versuch 3, so werden hier alle Staubpartikel im Fett gebunden. Das mit Staub durchsetzte Fett verteilt sich in diesem Fall jedoch im gesamten Dichtsystem.

7.4.1.2 Staubbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen

Nachfolgend werden aussagekräftige Versuchsergebnisse vorgestellt, an Hand derer die Wirkungsweise von fettgefüllten Wellendichtsystemen bei Schmutzbeaufschlagung erläutert werden kann. Hierfür wurden die Dichtsysteme in Versuchen mit 7200 s Laufzeit in der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Bestäubungskammer mit feinen Messingpartikeln beschossen (Versuchsbeschreibung siehe Kapitel 6.4.1). Die Staubmenge betrug 1 g/s. Es wurden die Drehzahlen 10, 100, 500, 1000, 2000 und 3000 min^{-1} an den Dichtsystemen (Kapitel 5.1.2) AUS 01 und AUS 03 untersucht. Nach jedem Einzelversuch wurde das Dichtsystem zerlegt und die Staubverteilung in den einzelnen Bereichen durch Entnahme einer Fettprobe und der anschließenden Betrachtung unter dem Mikroskop klassiert. Wie in der Versuchsbeschreibung ausgeführt, gibt es 5 Verschmutzungsclassen. Auf den nachfolgenden Diagrammen ist die Verschmutzung an den einzelnen Probeentnahmestellen bei den genannten Drehzahlen aufgeführt. Aus der kleinen Abbildung werden die Probeentnahmestellen ersichtlich.

Bei Fett A hat sich der Fettspalt bei allen Drehzahlen geöffnet. Die Abschirmung hat, wie in Bild 215 zu sehen, sehr gut funktioniert. Durch das Öffnen des Dichtspaltes hat sich kein verunreinigtes Fett im Spalt verteilen können.

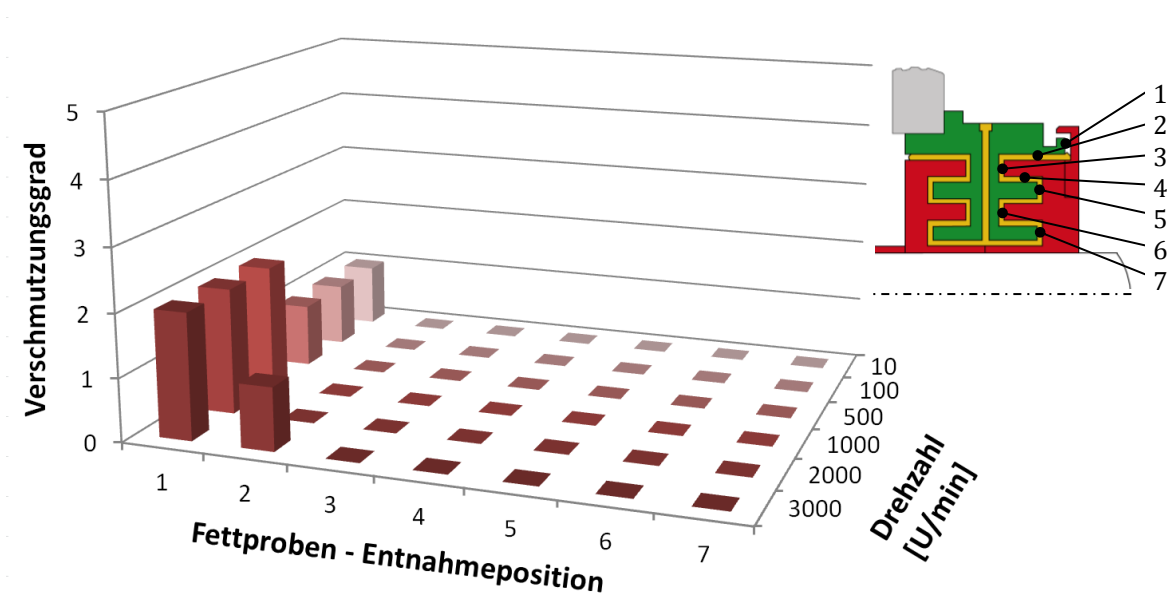


Bild 215: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Staub

Auf weiteren Bildern ist die Staub- und Fettverteilung auf den Dichtungsteilen bei den Drehzahlen 3000, 500 und 10 min^{-1} dargestellt. Die abschleudernde Wirkung der auf die Staubteilchen wirkenden Fliehkräfte bei Wellenrotation ist gut erkennbar. Bei 3000 min^{-1} ist der Rotor außen fast staubfrei.



Bild 216: Rotor 3000 min⁻¹



Bild 217: Dichtspalt Stator 3000 min⁻¹

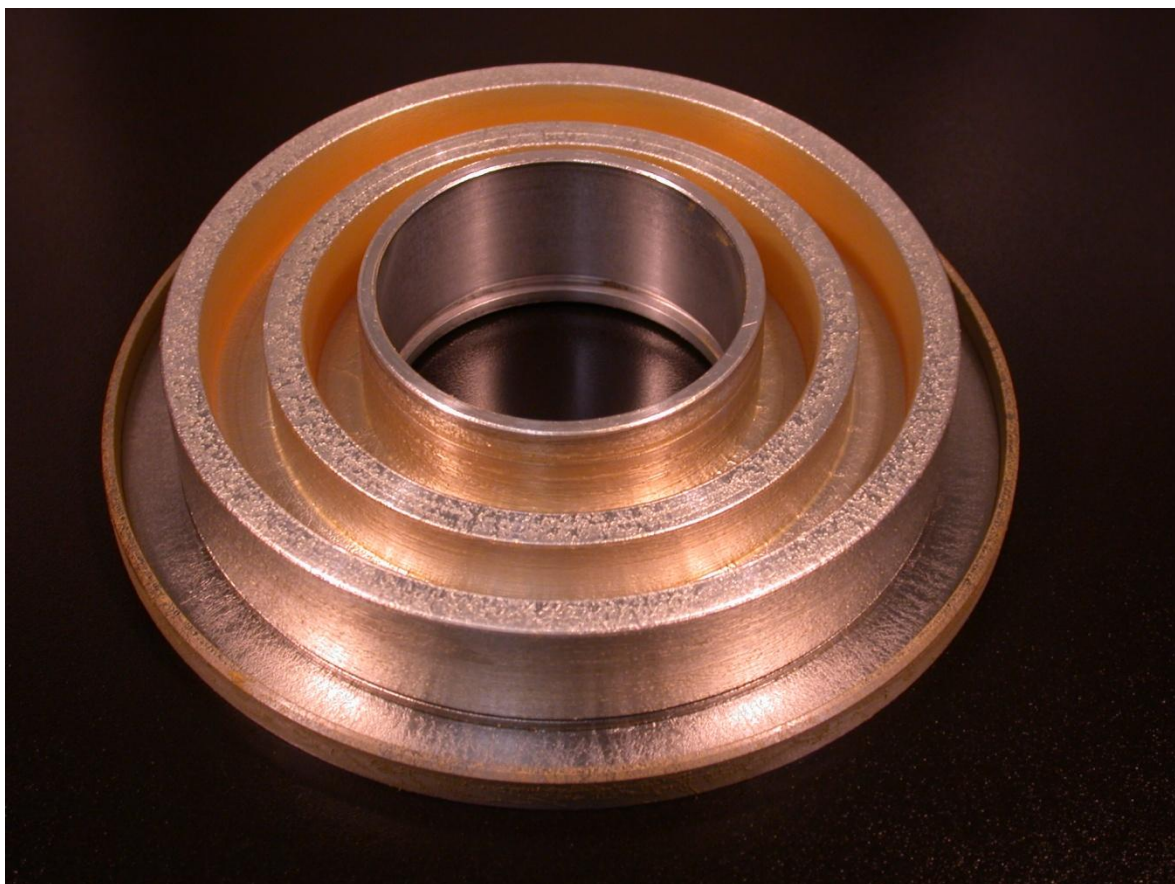


Bild 218: Dichtspalt Rotor 3000 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt



Bild 219: Rotor 500 min⁻¹



Bild 220: Dichtspalt Stator 500 min⁻¹



Bild 221: Dichtspalt Rotor 500 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt



Bild 222: Rotor 10 min⁻¹



Bild 223: Dichtspalt Stator 10 min⁻¹



Bild 224: Dichtspalt Rotor 10 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt

Beim betrachteten Dichtsystem Axial AUS 01 wird am vorderen Spalteingang ein sogenannter abgedeckter Spalteingang verwendet.

Als nächstes wird ein Dichtsystem mit identischer Spalt-Grundgeometrie betrachtet, jedoch besitzt es nur einen radial offenen Spalteingang. Werden die Ergebnisse mit dem zuvor genannten Dichtsystem verglichen, so kann der Staub etwas tiefer eindringen, aber auch hier war jederzeit die volle Schutzwirkung vorhanden (Bild 225).

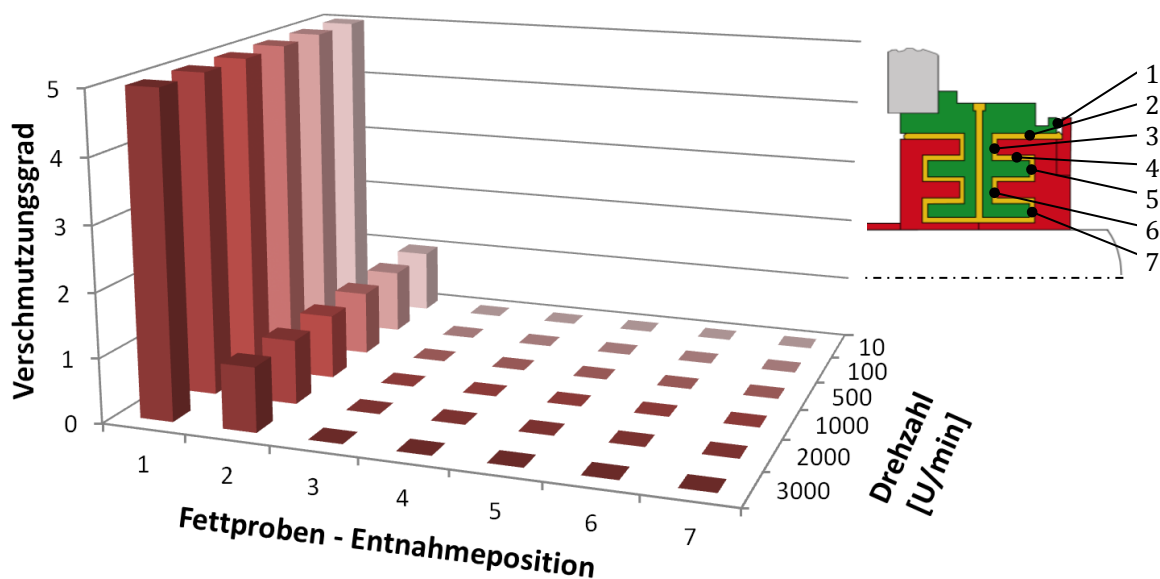


Bild 225: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-rad-Fett A-Staub

Die folgenden Bilder (Bild 226 bis Bild 228) zeigen die Fett- und Staubverteilung beim Dichtsystem „Axial AUS 01 rad“ bei 3000 min⁻¹. Auch auf den Bildern kann der größere Staubanteil an Messstelle 1 erkannt werden.



Bild 226: Rotor 3000 min⁻¹



Bild 227: Dichtspalt Stator 3000 min⁻¹

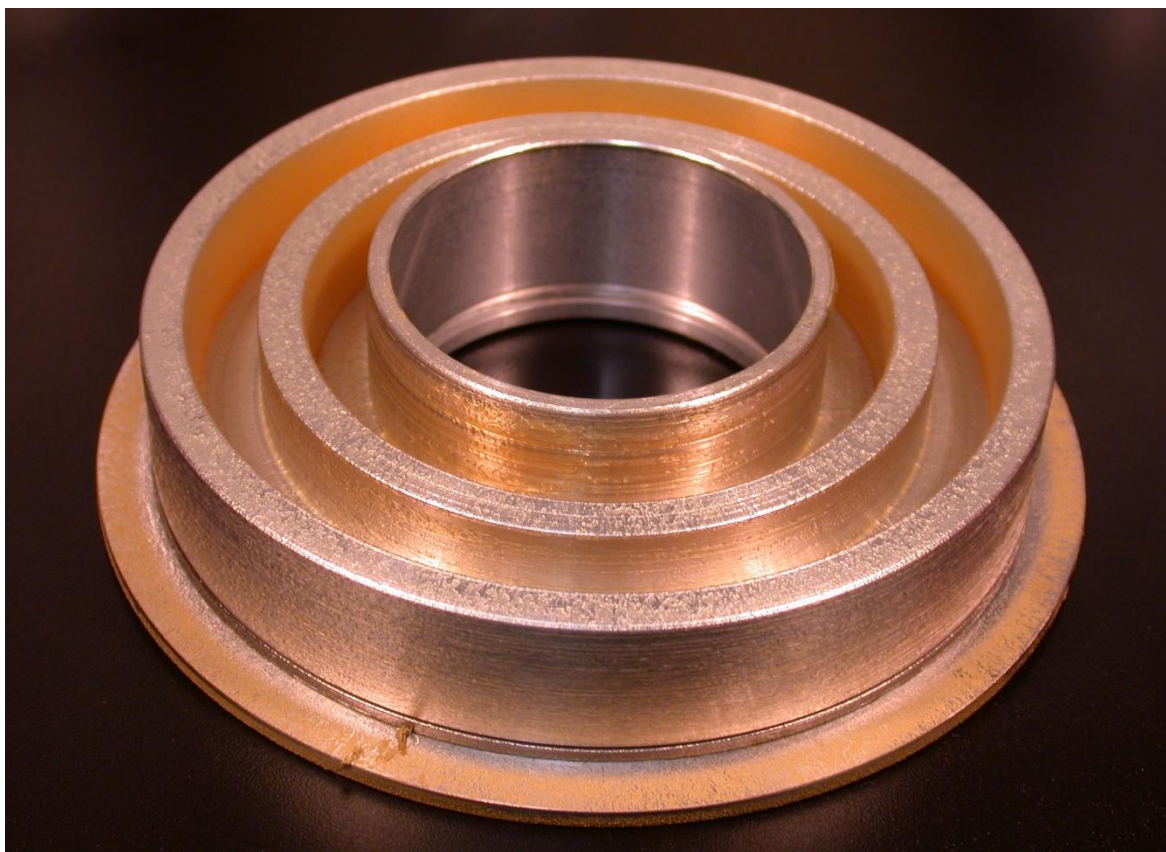


Bild 228: Dichtspalt Rotor 3000 min⁻¹, Spalteingang radial offen

Wird der Spalteingang noch weiter vereinfacht, so entsteht die Spalt-Eingangsgeometrie von Dichtsystem „Axial AUS 01 ax“. Es besitzt ein axial offenes Spaltende. Hier kann die eindringende Staubmenge in Abhängigkeit des sich ausbildenden Fettkragens sehr unterschiedlich sein. Sie war aber bei der Mehrzahl der Versuche deutlich größer als bei den beiden anderen Spalteingangsgeometrien (Bild 229 bis Bild 232).

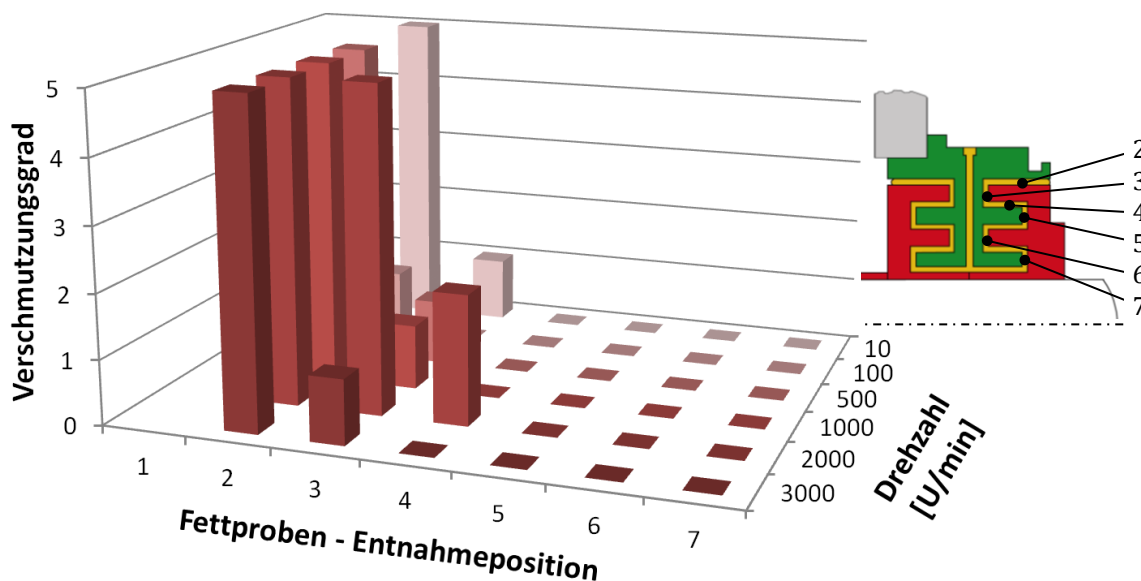


Bild 229: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-ax-Fett A-Staub



Bild 230: Rotor 3000 min⁻¹



Bild 231: Dichtspalt Stator 3000 min⁻¹ min⁻¹

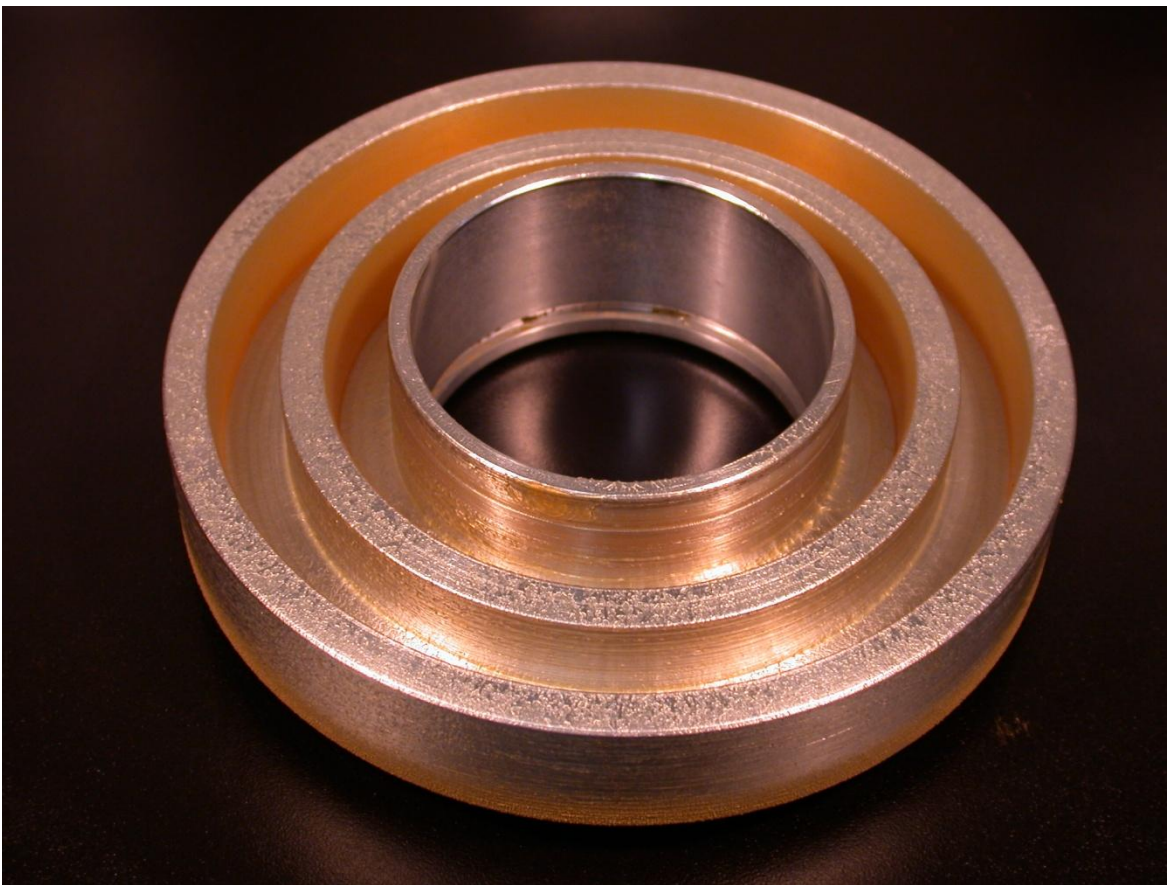


Bild 232: Dichtspalt Rotor 3000 min⁻¹, Spalteingang axial

Auch bei diesem Dichtsystem ohne rückfördernde Spalteingangsgeometrie kann das Dichtsystem ab einer gewissen Mindestdrehzahl die auftreffende Verschmutzung zuverlässig zurückhalten. Doch wie funktionieren solche fettgefüllten axialen Spalte? Die Fettspalte öffnen sich zu Beginn der

Versuche. Dann können Staubpartikel, je nach dem außen am System vorhandenen Fettkragen, mehr oder weniger direkt in den geöffneten Fettspalt eindringen. Dort werden sie entweder direkt von der klebrigen Fettoberfläche gebunden oder durch die im Spalt vorherrschende Luftströmung in Umfangsrichtung mitgenommen und durch Fliehkrafteinfluss an der nächsten radial äußeren Wandung abgelagert. Jedenfalls wächst der Spalt mit der Zeit durch immer neue Staubpartikel zu. Es kommt zum Berühren der beiden mit Staubpartikeln besetzten Fettoberflächen. Durch dieses Anschmieren kommt es lokal zu Mischvorgängen und dadurch wird die Fettoberfläche wieder erneuert, d. h. sie wird wieder „klebrig“ und neue Staubpartikel können sich anlagern. Auf den folgenden Bildern (Bild 233 und Bild 234) ist dieser Vorgang nachträglich ablesbar. Die beiden Fettoberflächen auf Rotor und Stator zeigen Spuren von Anschmiervorgängen und die Staubpartikel liegen nicht nur auf der Fettoberfläche, sondern es handelt sich hier um ein durchgängiges Fett-Staubgemenge. In Bild 233 ist dies deutlich zu sehen. Auf den radial weiter innen liegenden Axiallamellen (1) ist das Fett durchscheinend. Auf der äußeren Axiallamelle (2) ist es matt und tief mit Partikeln durchsetzt. Überschüssiges Fett-Staubgemisch wird durch die immer wieder auftretende Scherung zum vorderen Dichtspaltende gefördert. Irgendwann ist die Partikel aufnehmenfähigkeit des Fetts erschöpft. Dann ist es Zeit, durch einen Nachschmiervorgang das verschmutzte Fett auszutauschen. Dieser Zeitpunkt kann durch einen gut gestalteten Spalteingang sehr stark beeinflusst werden.



Bild 233: Dichtspalt Stator 2000 min⁻¹, Spalteingang axial

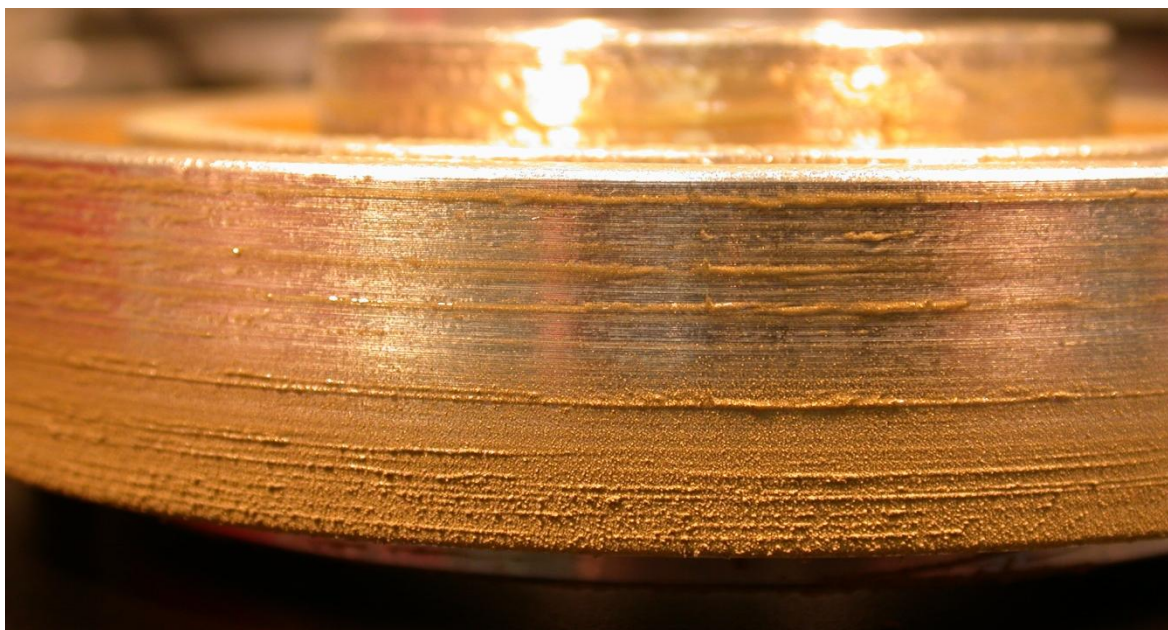


Bild 234: Dichtspalt Rotor 2000 min⁻¹ Spalteingang axial (Blick radial auf Rotor)

Bislang wurde als Fettfüllung das Versuchsfett A der NLGI-Klasse 2 verwendet. Nachfolgend sind die Ergebnisse mit Versuchsfett C aufgeführt. Fett C ist ein Fließfett der NLGI-Klasse 0/00. Bild 235 zeigt die Ergebnisse bei Dichtsystem „Axial AUS 01“ mit abgedecktem Spalteingang.

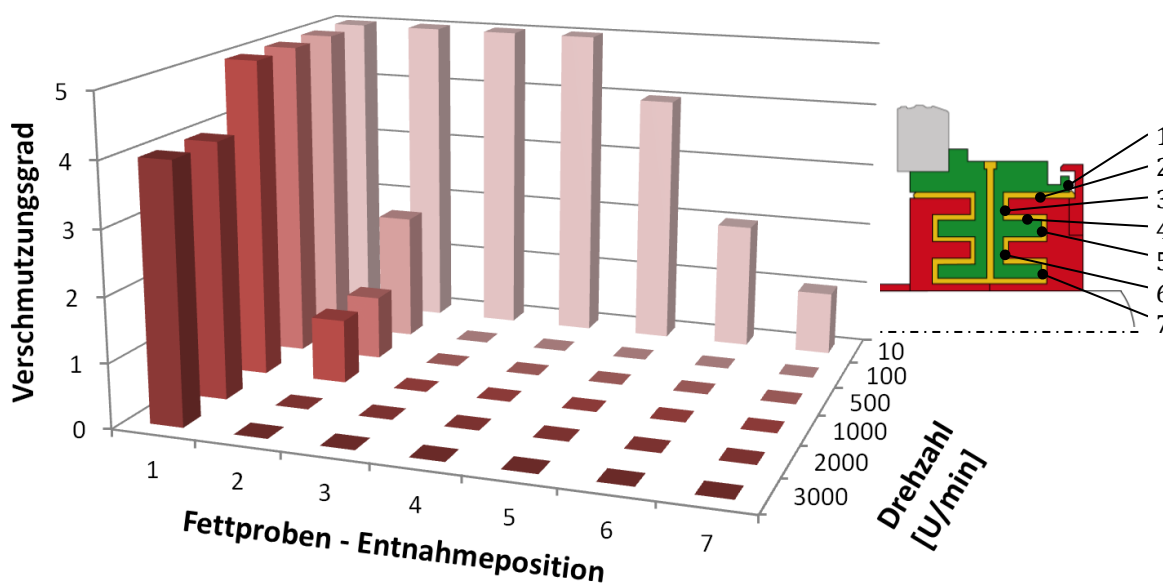


Bild 235: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett C-Staub

Das Fetthaltevermögen, also das Bestreben den Dichtspalt mit Fett gefüllt zu halten, ist bei diesem Fett insbesondere bei niederen Drehzahlen größer als bei Fett A. Dies hat zur Folge, dass das Fett im Spalt ständig durchgemischt wird. Verunreinigtes Fett wird so auch in das Dichtsystem hinein transportiert.

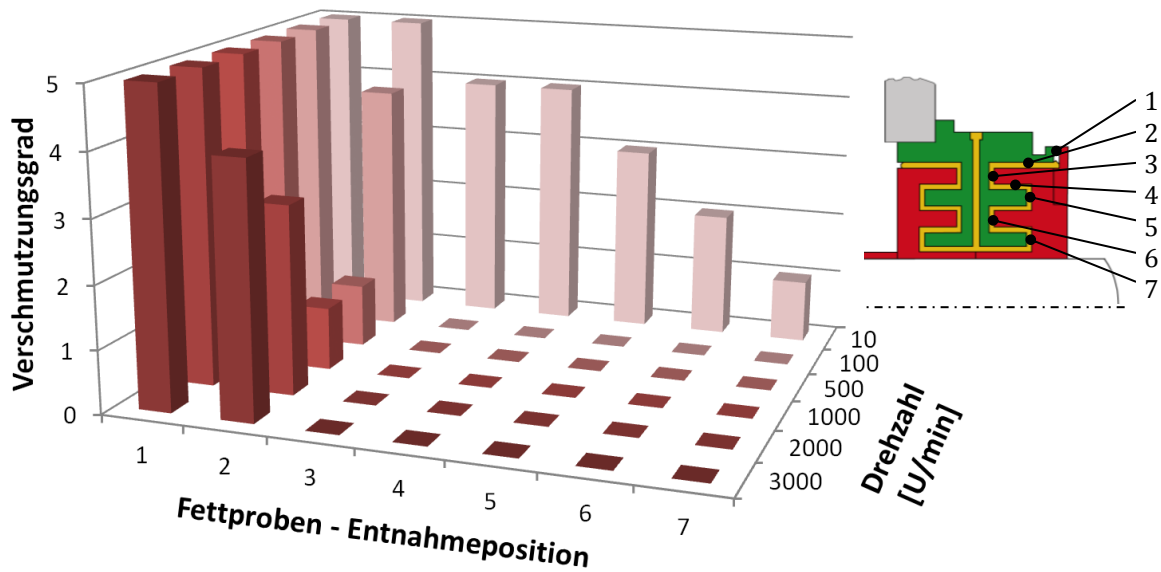


Bild 236: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-rad-Fett C-Staub

Auch hier ergibt sich die selbe Reihenfolge in der Wirksamkeit der Spalteingangsgeometrien wie bei Fett A (Bild 235, Bild 236 und Bild 237).

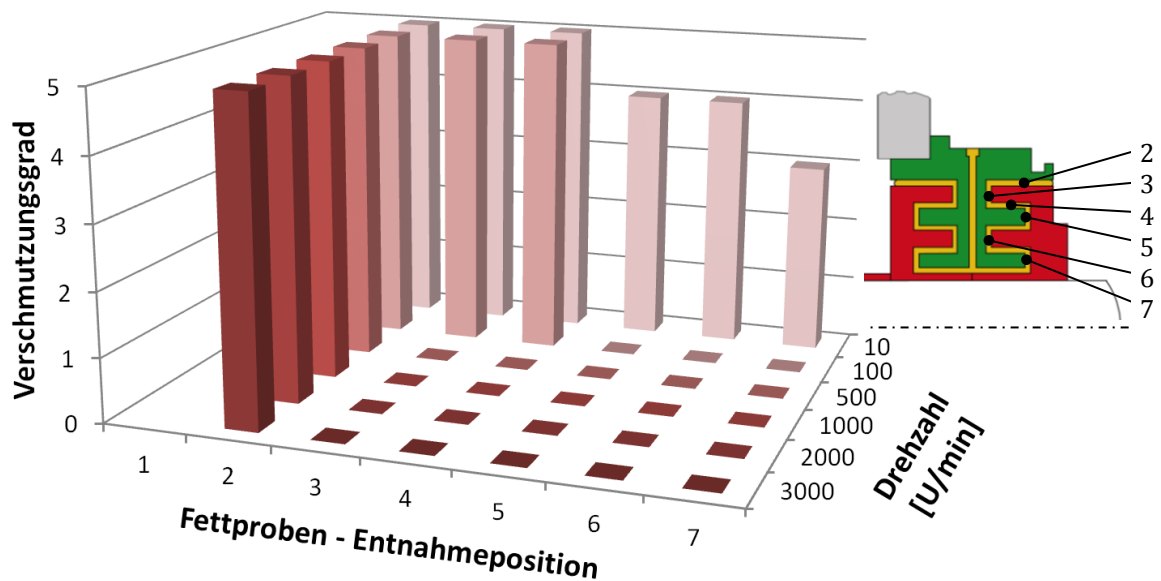


Bild 237: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-ax-Fett C-Staub

Als nächstes wird die Dichtspaltgeometrie verkleinert, indem Dichtsystem AUS 03 in Verbindung mit Fett C betrachtet wird. Dieses Dichtsystem besitzt wieder einen abgedeckten Spalteingang. Trotzdem war bei 100 min^{-1} der Schmutzeintrag besonders hoch. Das Fett hat sich bis weit in das System hinein verfärbt. Dies zeigen die folgenden Bilder (Bild 238 bis Bild 241).

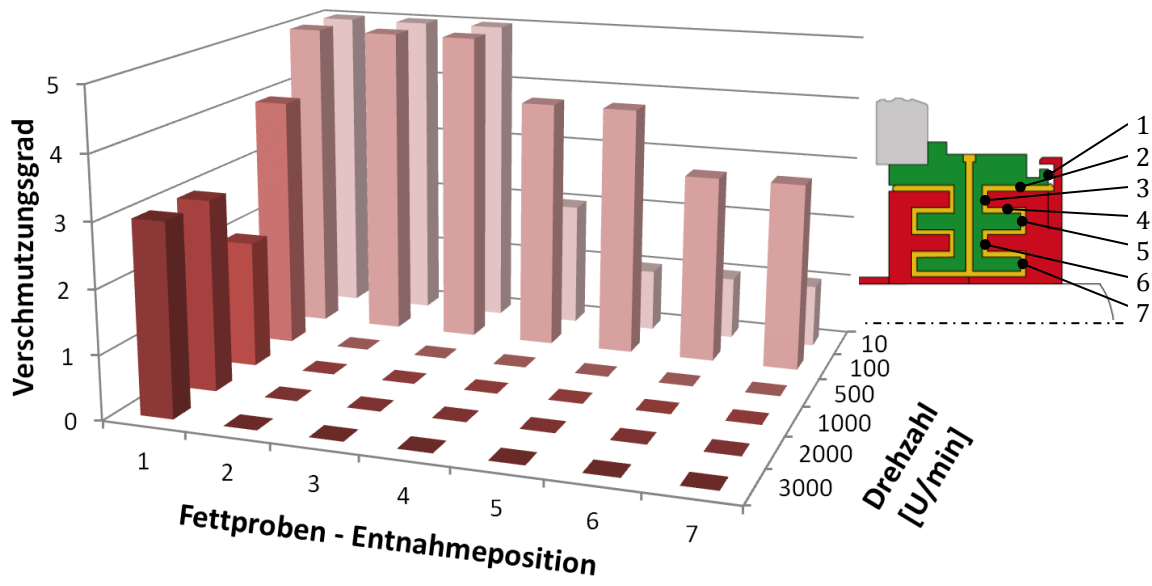


Bild 238: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett C-Staub



Bild 239: Rotor 100 min⁻¹



Bild 240: Dichtspalt Stator 100 min⁻¹



Bild 241: Dichtspalt Rotor 100 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse der Axialspalt-Dichtsysteme bei Staub:

Die Staubabschirmung hat bei allen Axialspalt-Dichtsystemen sehr gut funktioniert, bei denen sich ein geöffneter Dichtspalt eingestellt hatte. In diesen Fällen fand keine Durchmischung von sauberem und verunreinigtem Fett statt. Bei niederviskosen Fetten öffnet sich der Dichtspalt bei niederen Drehzahlen manchmal nicht. Hier werden dann Partikel mit dem Fett im System verteilt. Die Gestaltung des Spalteingangsbereiches ist von sehr großer Bedeutung. Abgedeckte radiale Spalteingänge funktionieren am besten.

7.4.2 Sandbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen

Als weiteres Verschmutzungsmedium wurde der in Kapitel 5.3.2 vorgestellte Versuchssand bei den Dichtsystemen AUS 01 und AUS 03 in Verbindung mit den Fetten A und C eingesetzt. Der Sand haftete nicht auf den trockenen Vorderseiten der Statorteile und des aerostatischen Lagers. Aus diesem Grund war bei den Sandversuchen eine aussagekräftige Momenterfassung möglich. Wird nun das folgende Diagramm (Bild 242) bei Dichtsystem AUS 01 und Fett A betrachtet, so kann bei den Drehzahlen 10 und 100 min⁻¹ ein Restmoment bis zum Versuchsende festgestellt werden. In den Spalteingängen hatte sich ein Konglomerat aus Fett und Sandkörnern gebildet. Grobkörnige und starke Verschmutzung führt ebenfalls, wie die Verringerung der Dichtspalthöhe, zu einem größeren Fetthaltevermögen. Bei 10 min⁻¹ sind Partikel bis zur Dichtsystemmitte, dem Axialspaltbereich mit der Fetteinleitung, gefördert worden. Bei den anderen Drehzahlen blieb der Dichtspalt durch die im Spalt bei Kontakt wirkende Scherung und den vorhandenen Fliehkräften geöffnet. In Bild 243 ist die Verschmutzung in den einzelnen Spaltbereichen aufgetragen.

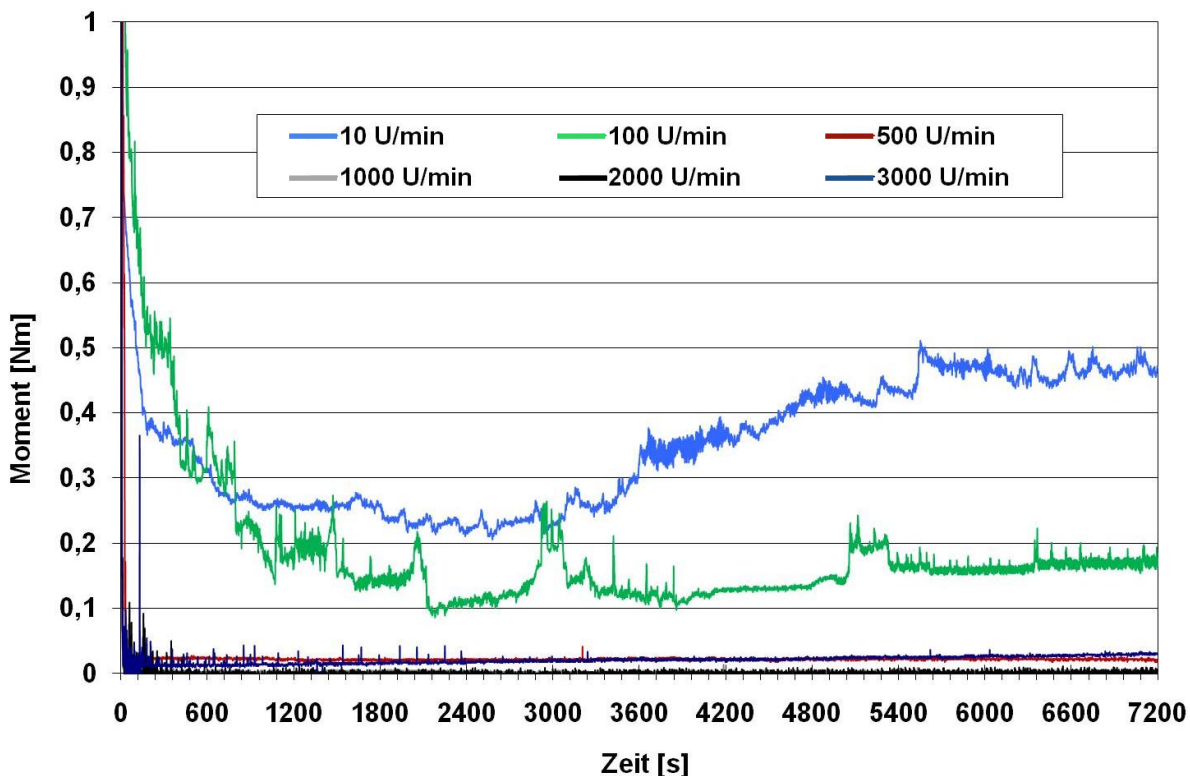


Bild 242: Momentverlauf bei Sandbeaufschlagung Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Sand

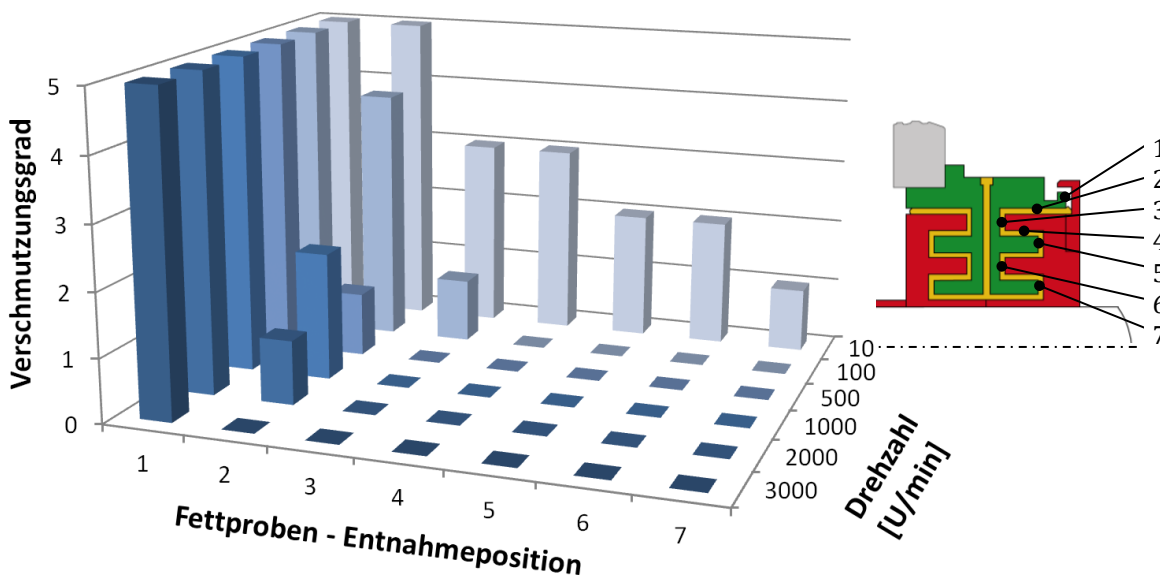


Bild 243: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Sand

Bild 244 zeigt die Partikelverteilung im Dichtsystem Axial AUS 01 bei axialem Spalteingang. Hier können viele Sandkörner direkt in den Dichtspalt eindringen und erschweren ein rasches Freifördern. Dies hat zur Folge, dass durch Mischvorgänge Sandkörner bis weit in das Dichtsystem hineingefördert werden. Die Abdichtleistung des Systems sinkt stark und Sicherheitsreserven werden teilweise vollständig aufgebraucht. Dieser Versuch zeigt, dass auch bei Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsystemen ein sog. Abgedeckter Spalteingang zwingend erforderlich ist.

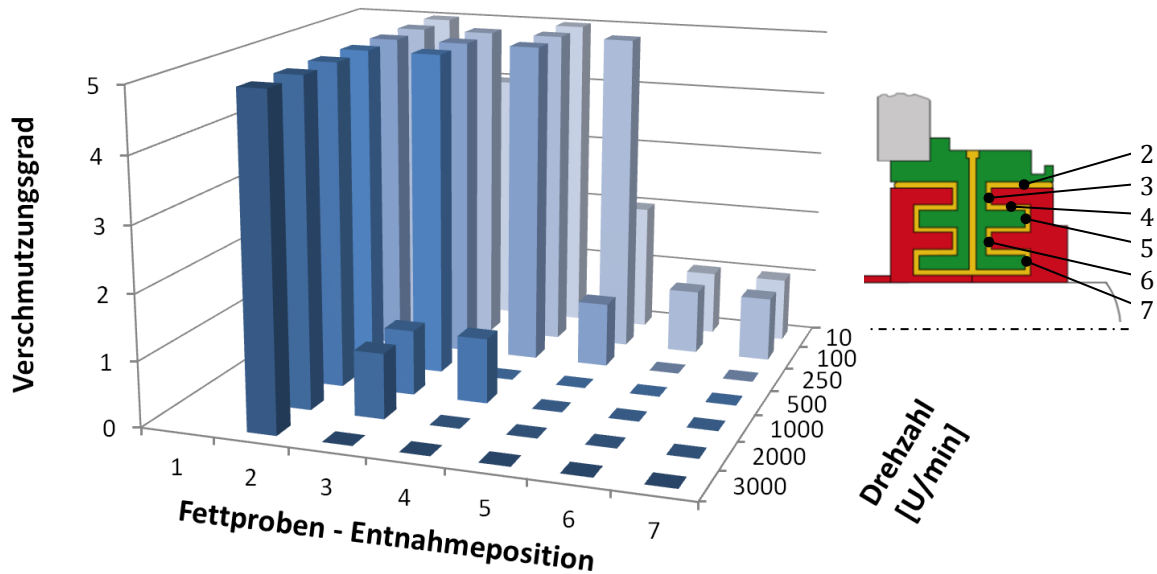


Bild 244: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-ax-Fett A-Sand

Bei vielen Anwendern herrscht oft große Skepsis gegenüber der Anwendung von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen. Hier wird argumentiert, dass Fett den Schmutz erst anziehe. Aus diesem Grund wurde das Dichtsystem Axial AUS 01 ohne Fettfüllung in den Ausführungen mit axialem und abgedecktem Spalteingang der Sandbeaufschlagung unterzogen. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 245 und Bild 246 dargestellt. In beiden Fällen sind Partikel in großen Mengen in die Dichtsysteme eingedrungen und konnten bei allen Drehzahlen alle für eine wirksame Abdichtung maßgebenden Spaltbereiche überwinden. Ein trockenes Labyrinth kann folglich Sand und Staub nicht zurückhalten.

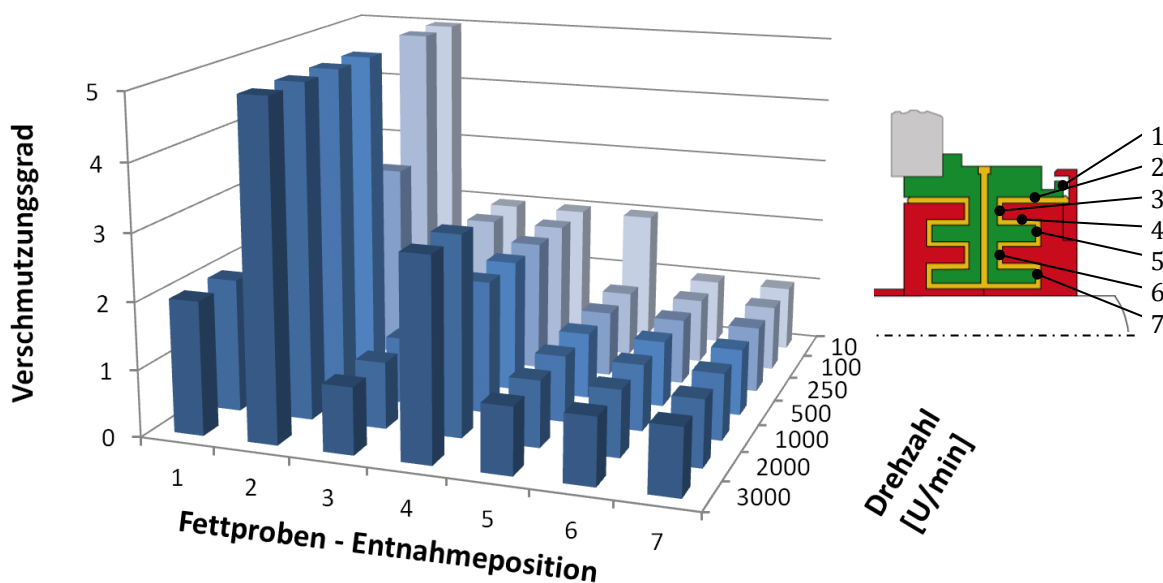


Bild 245: Sandverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-ohne Fett-Sand

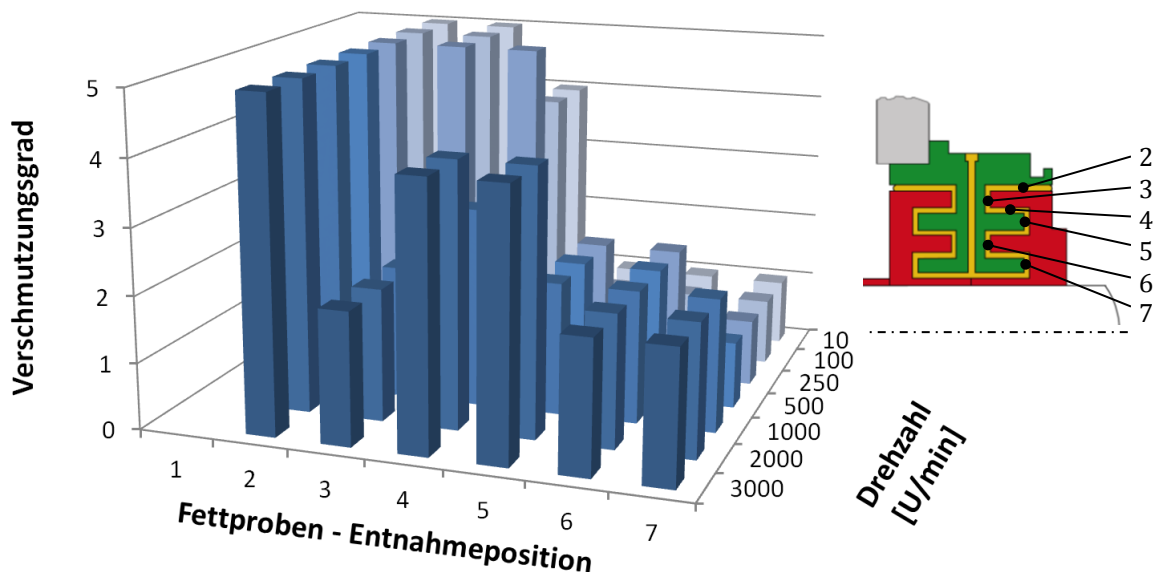


Bild 246: Sandverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-ax-ohne Fett-Sand

Wird nun die Dichtspalthöhe bei Dichtsystem „Axial AUS 03“ auf 0,75 mm reduziert, so sind sowohl die Spalthöhe als auch die Sandkörner im gleichen Größenbereich. Auf dem nachfolgenden Diagramm (Bild 247) sind immer wieder Momentspitzen von sich im Kontakt befindenden Sandkörnern ablesbar. Bei den niederen Drehzahlen bleibt auch ein Moment über die Versuchszeit erhalten.

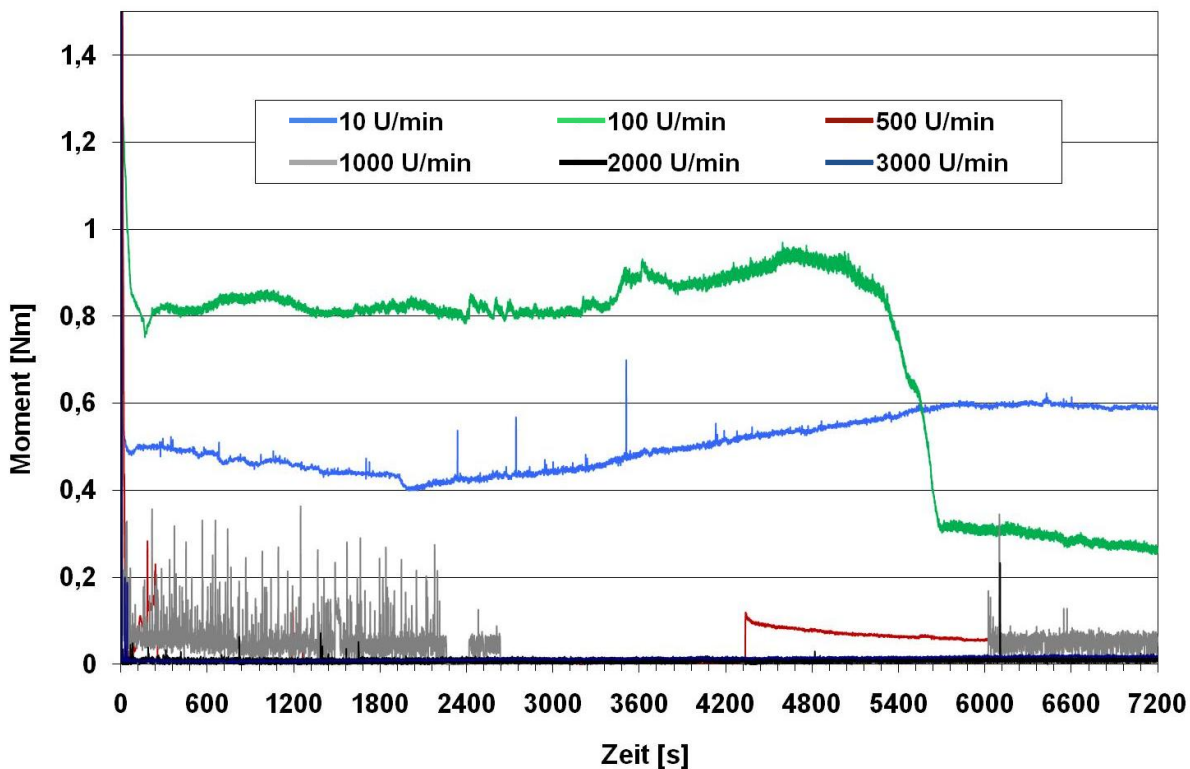


Bild 247: Momentverlauf bei Sandbeaufschlagung Dichtsystem Axial AUS 03-Fett A-Sand

Bild 248 zeigt die Verschmutzung im Dichtspalt bei AUS 03 und Fett A.

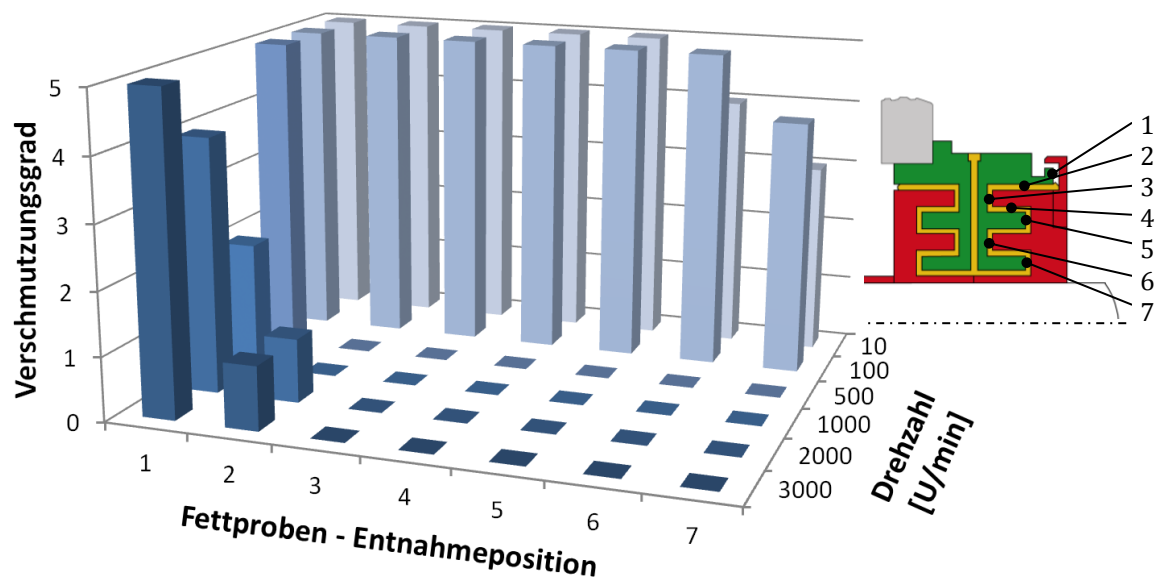


Bild 248: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 03-Fett A-Sand

Die Wirkung der Scherung und der Fliehkräfte wird auch in den Bildern nach den Versuchen mit 100 und 3000 min⁻¹ sehr deutlich (Bild 249 bis Bild 252). Sandkörner sind bei 100 min⁻¹ bis nach innen vorgedrungen.



Bild 249: Dichtspalt Stator 100 min⁻¹



Bild 250: Dichtspalt Stator 3000 min⁻¹



Bild 251: Dichtspalt Rotor 100 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt

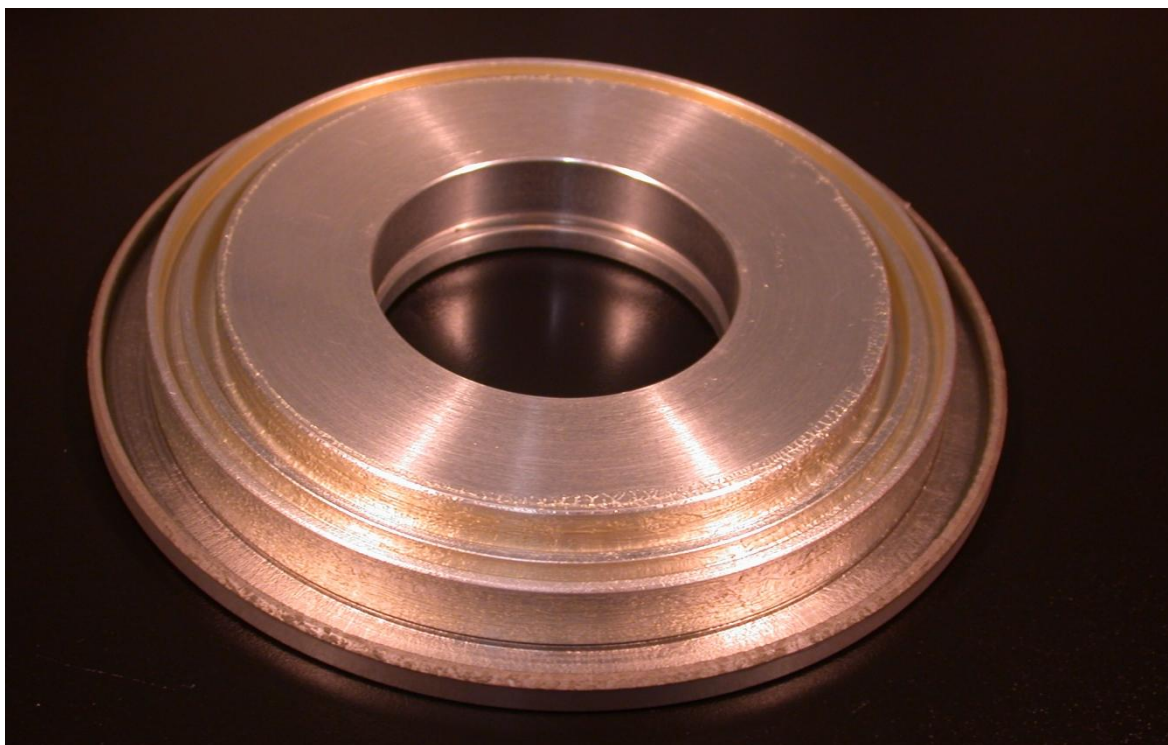


Bild 252: Dichtspalt Rotor 3000 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt

Wird anstelle von Fett A in Dichtsystem AUS 01 das niedrigviskosere Fett C eingesetzt, so ergibt sich folgender Sachverhalt: Auch mit Fett C ist die Abdichtung gegen Sand ab einer Mindestdrehzahl sehr gut möglich. Das Diagramm in Bild 253 zeigt die entsprechenden Momentkurven.

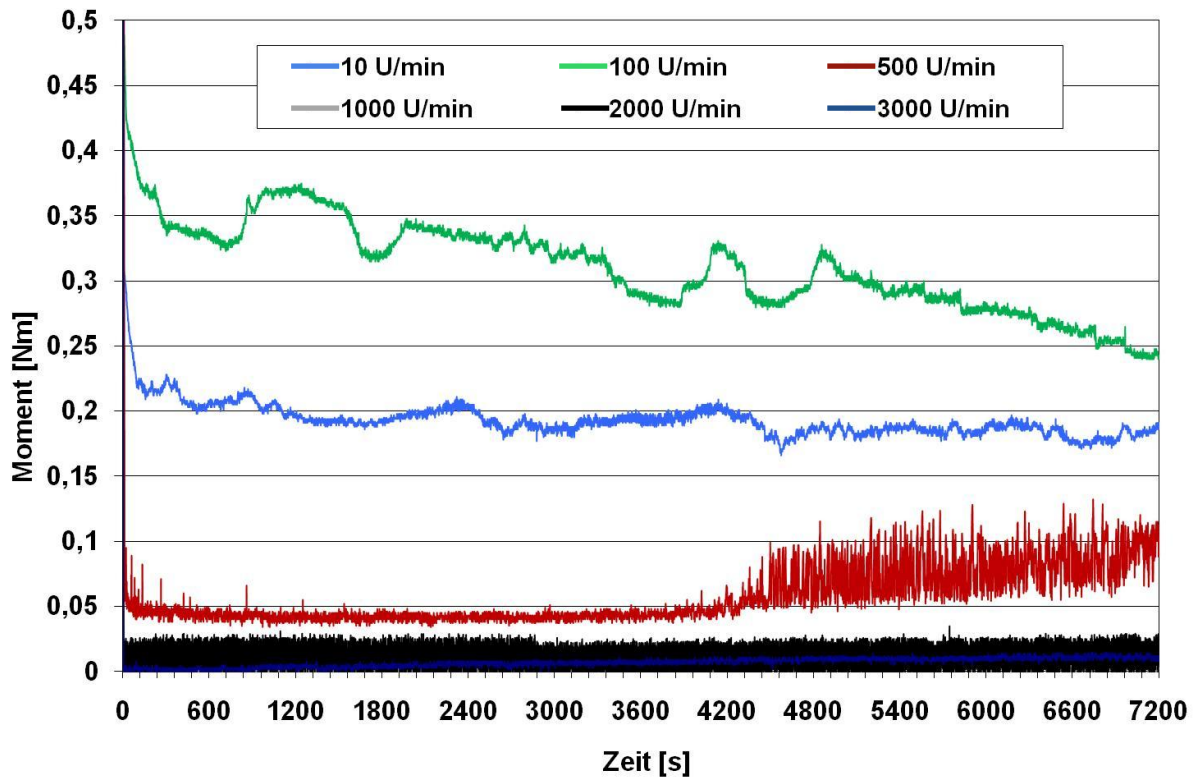


Bild 253: Momentverlauf bei Sandbeaufschlagung Dichtsystem Axial AUS 01-Fett C-Sand

Bei den niederen Drehzahlen 10 und 100 min^{-1} werden Partikel eingefördert (Bild 254).

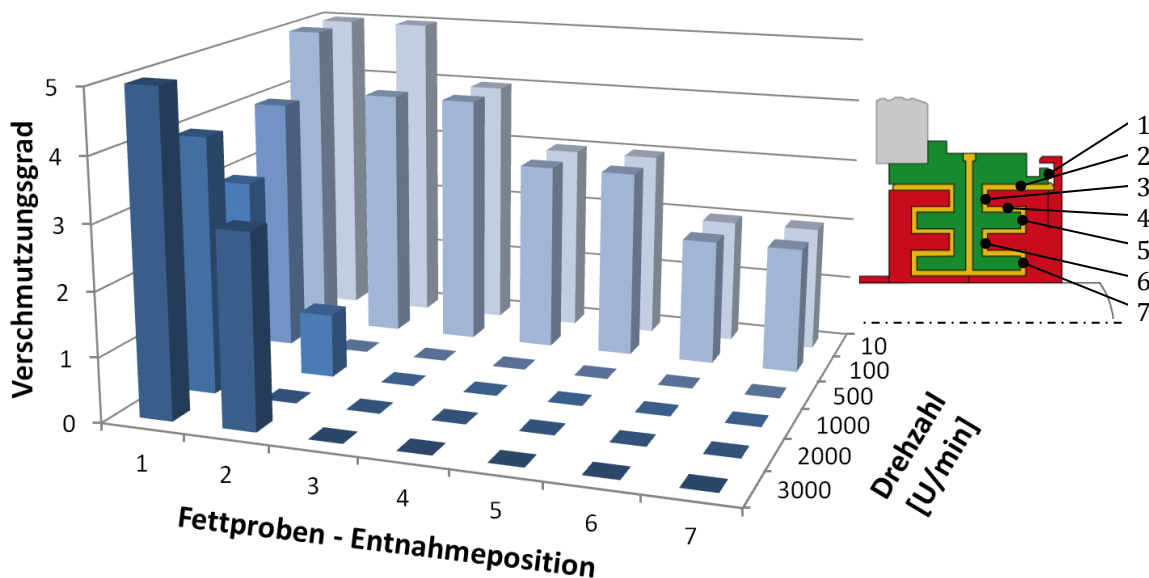


Bild 254: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett C-Sand

Bei Verkleinerung der Spalthöhe und der radialen und axialen Ausdehnung des Dichtsystems (Dichtsystem AUS 03) wird der Verlauf des Reibmoments (Bild 255) noch etwas chaotischer. Auch bei 500 min^{-1} bleibt noch relativ lange Zeit ein Restmoment vorhanden. Auf die Partikeleindringtiefe hat dies aber offensichtlich keinen großen Einfluss (Bild 256).

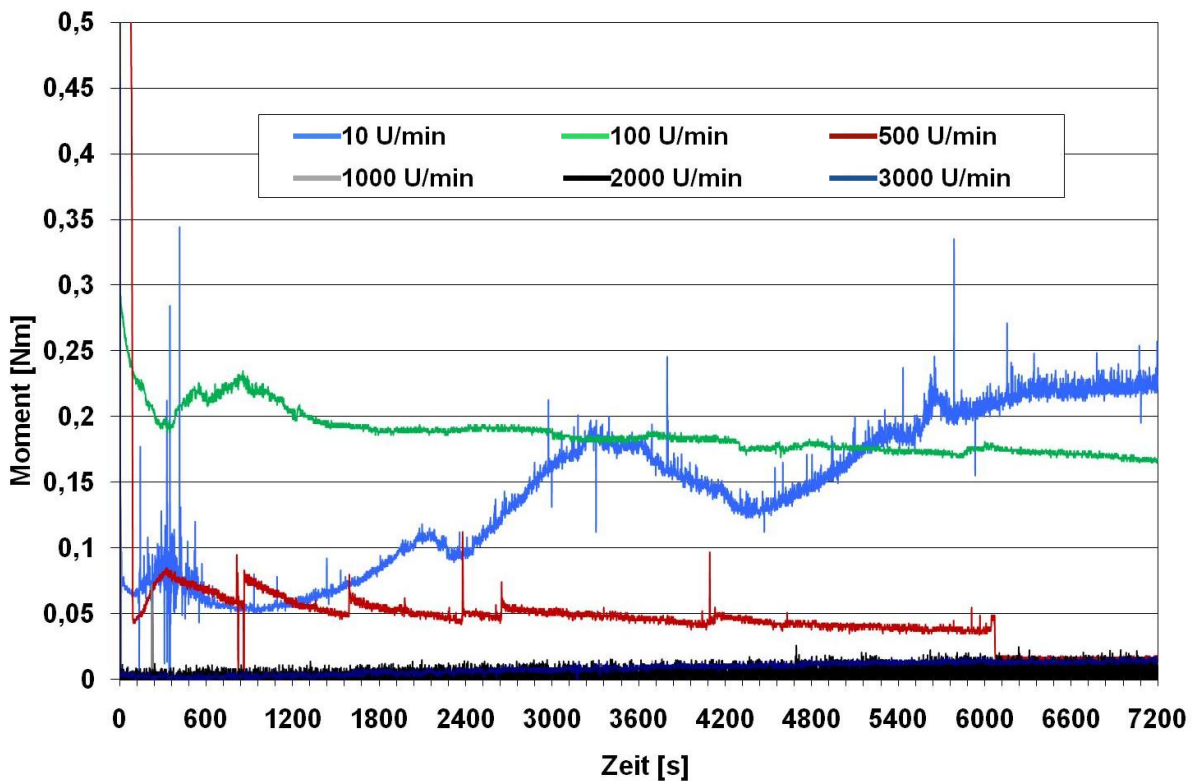


Bild 255: Momentverlauf bei Sandbeaufschlagung Dichtsystem Axial AUS 03-Fett C-Sand

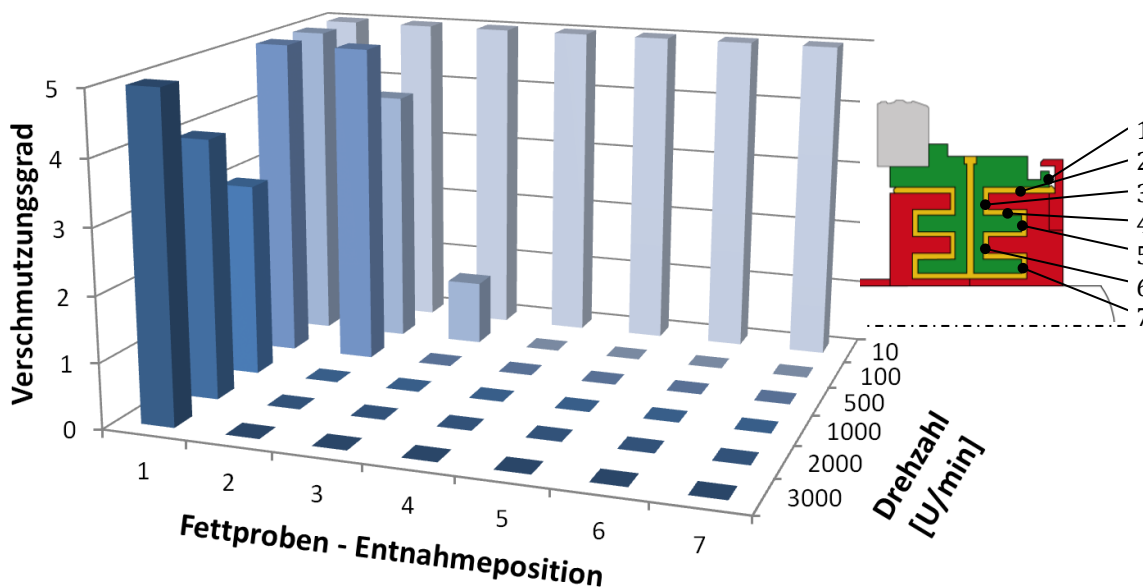


Bild 256: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 03-Fett C-Sand

Um das Versagen des Dichtsystems bei niederen Drehzahlen besser analysieren zu können, wurden weitere Versuche durchgeführt. Von besonderem Interesse war die Frage, welche oder ob beide der physikalischen Größen, Scherung und Fliehkraft, einen Mindestwert erreichen müssen, damit eine sichere Abdichtung erfolgen kann. Die Scherung trägt maßgeblich zum Öffnen des Dichtspaltes bei. Aus diesem Grund wurden Sandversuche bei 10 min^{-1} mit besonderen Startbedingungen durchgeführt. Vor dem eigentlichen Versuchsstart wurde der Dichtspalt bei 3000 min^{-1} geöffnet, dann erfolgte der Versuch nach bekanntem Ablauf. Die beiden nachfolgenden Diagramme (Bild 257 und Bild 258) zeigen auch bei diesen Versuchen ein weites Ein- bzw. Durchdringen von Partikeln. Hieraus wird also deutlich, dass Fliehkräfte zumindest in bestimmten Intervallen mit einer gewissen Mindestgröße für die dauerhafte Funktion unbedingt notwendig sind.

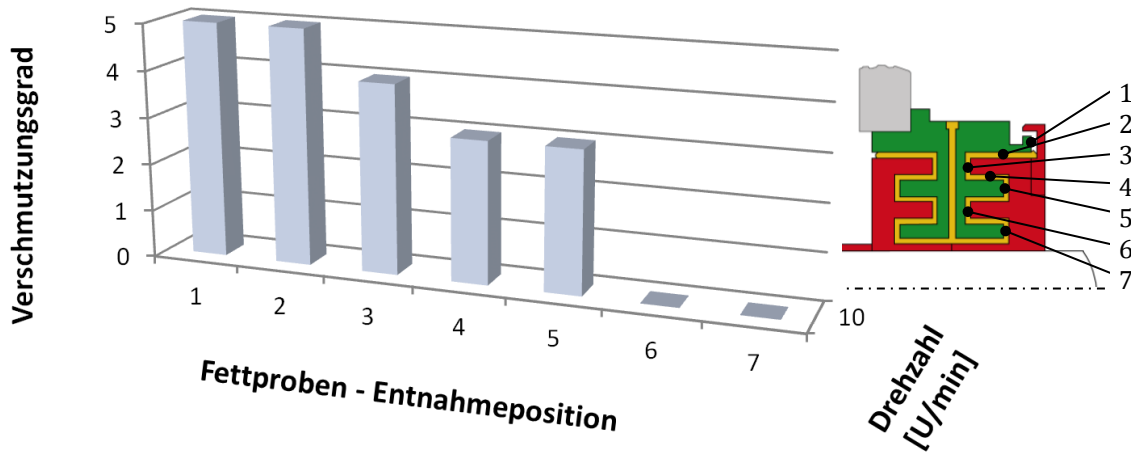


Bild 257: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Sand-Spalt offen

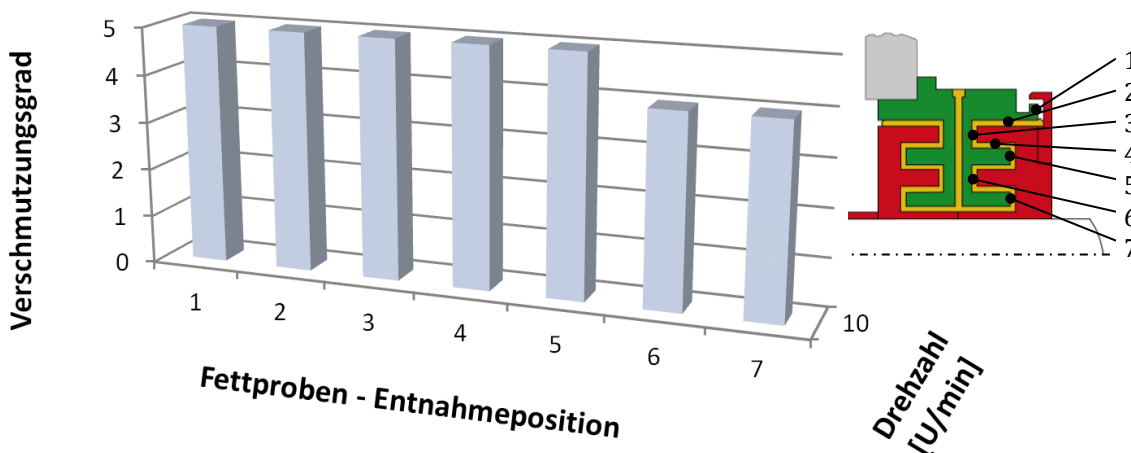


Bild 258: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 03-Fett C-Sand-Spalt offen

Diese Mindestanforderungen eines Dichtsystems an Scherung und Fliehkräfte für den sicheren Betrieb werden durch die Ergebnisse des nächsten Versuchs nochmals bestätigt. Hier wurde ein Drehzahlstufenversuch mit einer Gesamtlaufzeit von 12 h durchlaufen. Die Drehzahl wurde hier zwischen 10 und 2000 min^{-1} in Stufen von 500 min^{-1} alle 5 s verändert. Das im folgenden Diagramm (Bild 215) aufgeführte Ergebnis, zeigt nur minimalen Partikeleintrag in das Dichtsystem. Eingedrungene Partikel werden hier wirkungsvoll wieder aus dem Spalt gefördert.

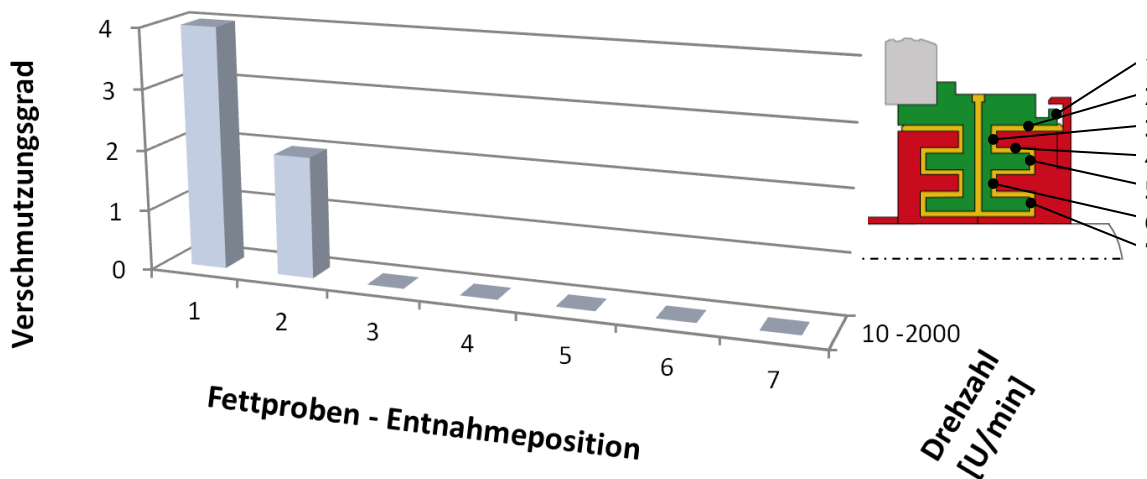


Bild 259: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-12 h

Die Bilder im Anschluss (Bild 260 bis Bild 262) zeigen die Spaltzustände nach 12 h Versuchsdauer. Es konnte ein nur sehr geringer Partikeleintrag festgestellt werden.

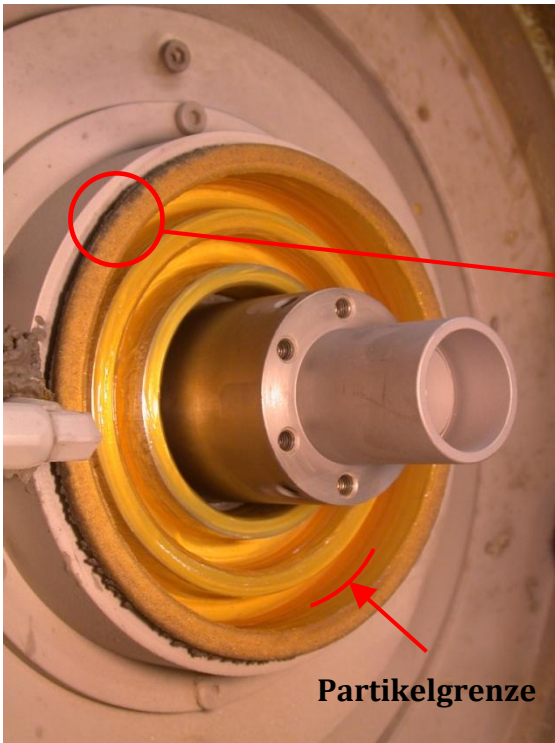


Bild 260: Dichtspalt Stator 10 - 2000 min⁻¹



Bild 261: Dichtspalt Stator 10 - 2000 min⁻¹

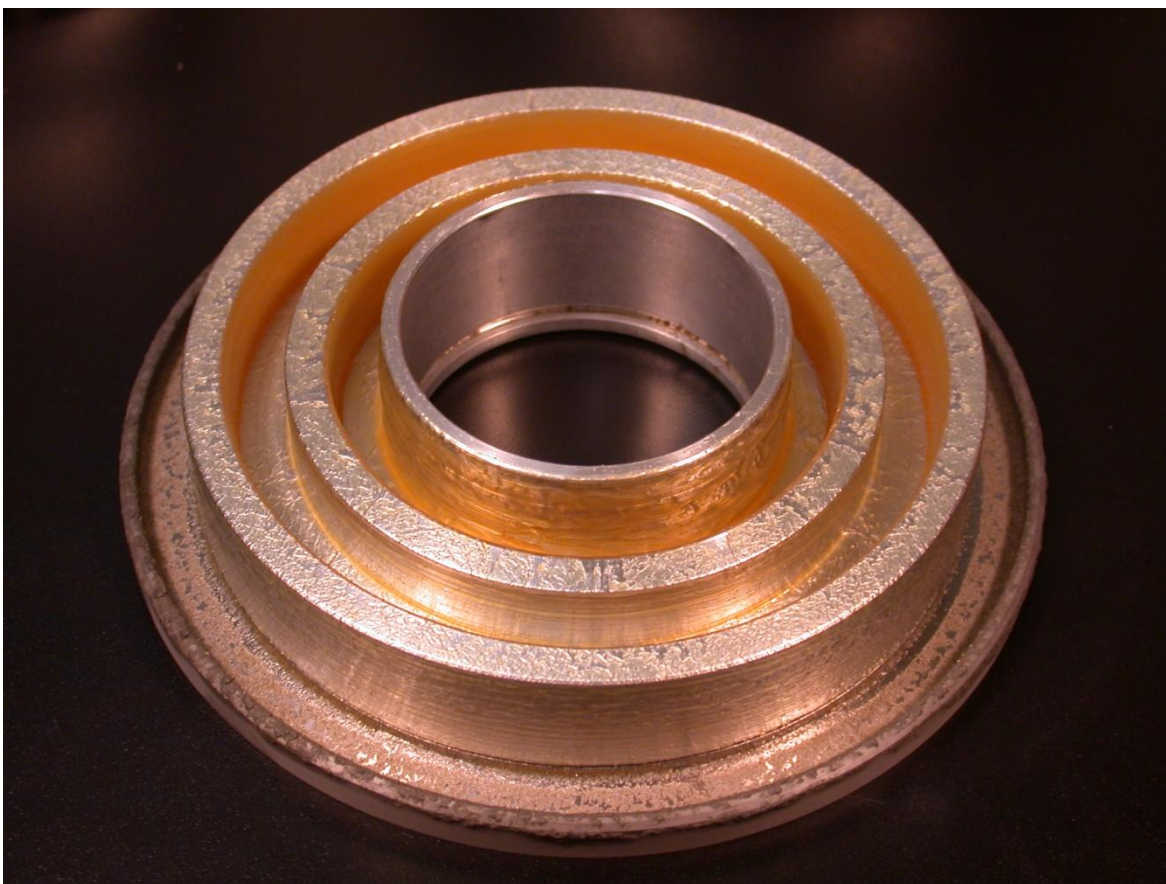


Bild 262: Dichtspalt Rotor 10 - 2000 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt

In zwei weiteren Versuchen wurde das Verhalten bei leicht erhöhtem Druck am vorderen Spalteingang bei Sandbeaufschlagung untersucht. Diese geringe Druckdifferenz hatte bei den Sandpartikeln keinen nennenswerten Einfluss auf die Eindringtiefe (Bild 263).

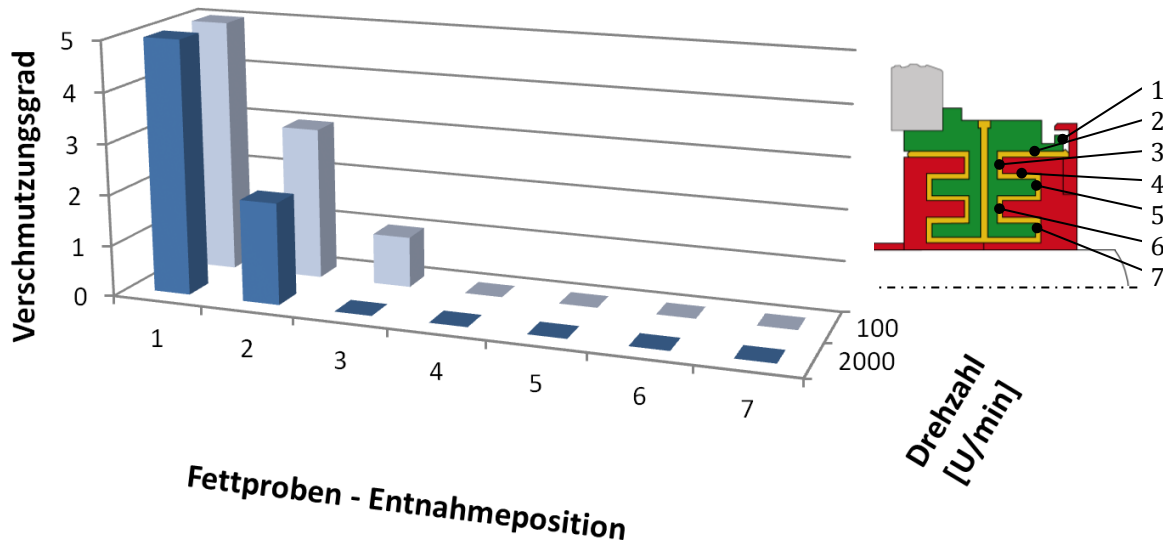


Bild 263: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Sand-5 mbar

Die folgenden Bilder zeigen die zugehörigen Dichtsystemteile nach dem Versuch (Bild 264 bis Bild 266).

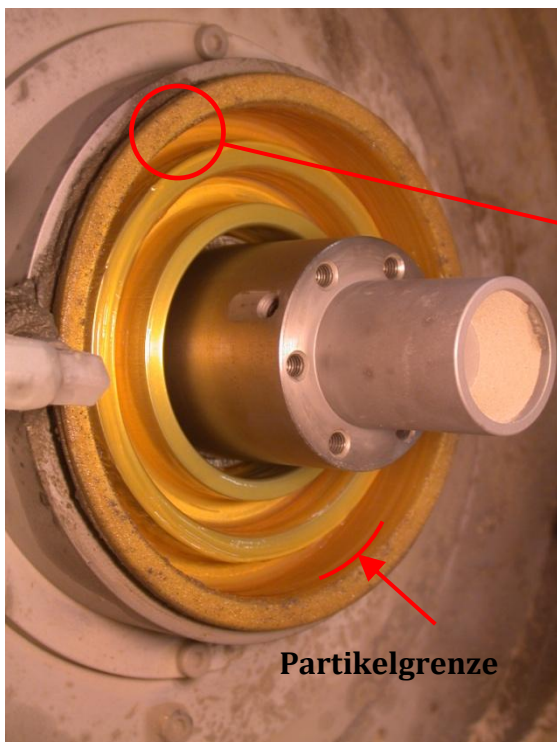


Bild 264: Dichtspalt Stator 2000 min⁻¹, 5 mbar



Bild 265: Dichtspalt Stator 2000 min⁻¹, 5 mbar

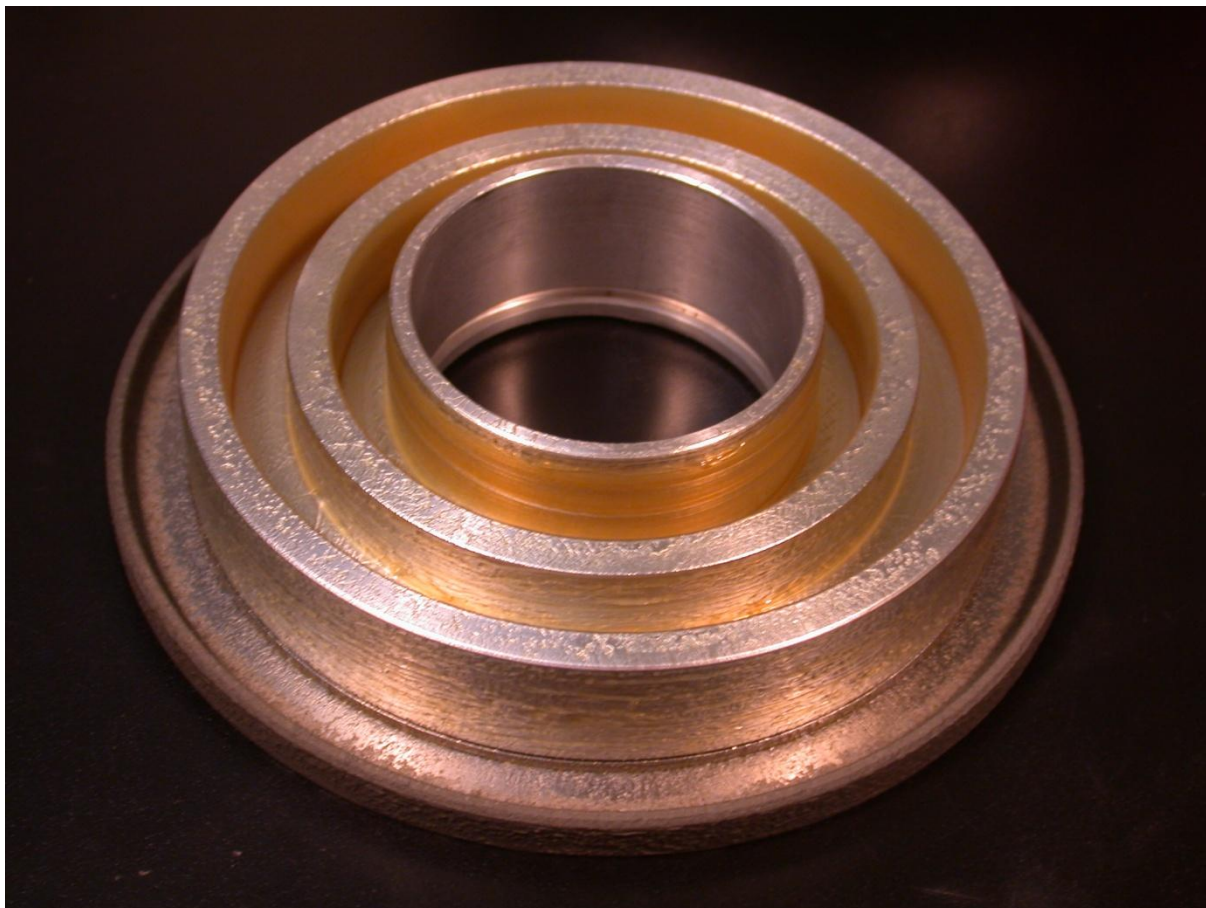


Bild 266: Dichtspalt Rotor 2000 min⁻¹, 5 mbar, Spalteingang abgedeckt

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse der Axialspalt-Dichtsysteme bei Sand:

Für die sichere Abdichtung mit fettgefüllten Axialspalt-Dichtsystemen werden eine Mindestscherung und eine Mindestfliehkraft benötigt. Die Scherung öffnet den Fettspalt. Die Fliehkraft hindert Sand am Eindringen und fördert in Spaltbereich 1 eingedrungenen Schmutz zurück. Die größeren Sandpartikel führen bei niederen Drehzahlen stärker zu einer Fett-Schmutzvermischung und erschweren das Freifördern des Dichtspaltes mehr als es bei kleineren Partikelgrößen der Fall ist. Partikel mit Korngrößen nahe der Spalthöhe kommen in Wandkontakt und rollen dort ab. Die beiden Fettoberflächen des geöffneten Dichtspaltes sind durch die großen Partikel „mechanisch“ verbunden. Es wirkt wieder Scherung, die die Mischvorgänge im Spalt begünstigt. Für eine sichere Funktion und zur Reduktion unerwünschter Mischvorgänge ist ein abgedeckter Spalteingang erforderlich

7.4.3 Flüssigkeitsbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen

In einem weiteren Versuchszyklus (Versuchsbeschreibung Kapitel 6.4.3) wurde das Dichtsystem „Axial AUS 01“ in Verbindung mit Fett A mit Flüssigkeit bespritzt. Die Flüssigkeit sollte einen engen Realitätsbezug verkörpern und das Fett nicht verdünnen. Aus diesem Grund wurde Wasser als Versuchsfluid ausgewählt.

In der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Bespritzungskammer wurde mittels einer Hohlkegeldüse Wasser am vorderen Spalteingang zerstäubt. Die Wassermenge betrug 0,2 l/min.

Das Wasser drang nur in sehr geringen Mengen in den Dichtspalt ein, wie aus dem folgenden Diagramm (Bild 267) abzulesen ist.

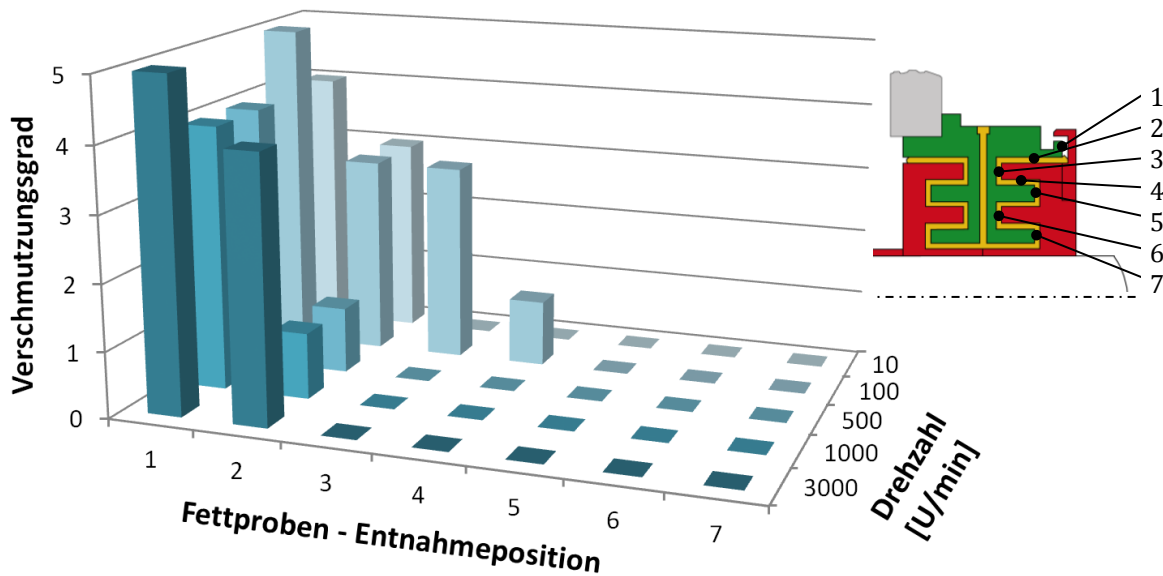


Bild 267: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Wasser

Andere fettlösende Fluide sind eher schwer dauerhaft abzudichten, da bei einer Fettverdünnung sich der Dichtspalt wieder schließen kann und es dann zur Durchmischung von sauberem und verunreinigtem Fett kommt. Dies gilt es, wie aus den vorigen Ergebnissen ersichtlich, unbedingt zu verhindern.

7.4.4 Schlammbeaufschlagung bei Axialspalt-Dichtsystemen

Beim gleichzeitigen Auftreten einer festen und einer flüssigen Phase entstehen Schlämme. Bei den Versuchen (Beschreibung Kapitel 6.4.4) der vorliegenden Ergebnisse wurde Wasser und feiner Sand gemeinsam in der Schmutzbeaufschlagungskammer auf den vorderen Spalteingang des Dichtsystems AUS 01 und Fett A aufgebracht. Die Sandmenge betrug 1 g/s und die Wassermenge 0,2 l/min. Die beim Ausbau zu Tage gekommenen Ergebnisse waren überraschend positiv. Bei allen untersuchten Drehzahlen ist nur sehr wenig Schlamm eingedrungen (Bild 268).

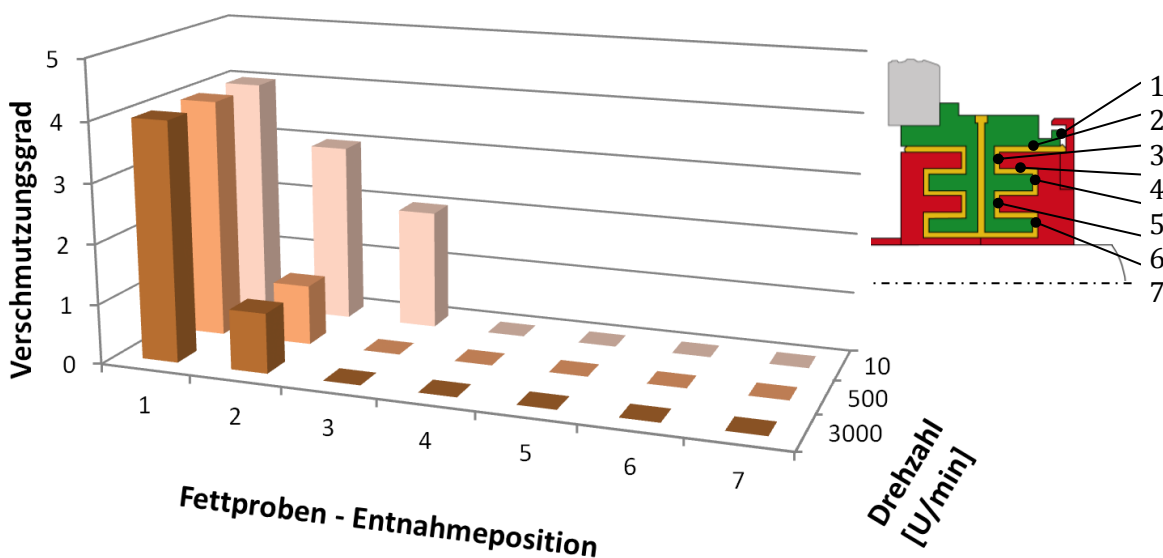


Bild 268: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem Axial AUS 01-Fett A-Schlamm

Die Bilder im Anschluss (Bild 269 bis Bild 274) vermitteln einen Eindruck von den Versuchsbedingungen und den Zuständen bei Versuchsende (nach 7200 s) im Dichtspalt bei 10 und 3000 min⁻¹.



Bild 269: Rotor 3000 min⁻¹



Bild 270: Dichtspalt Stator 3000 min⁻¹

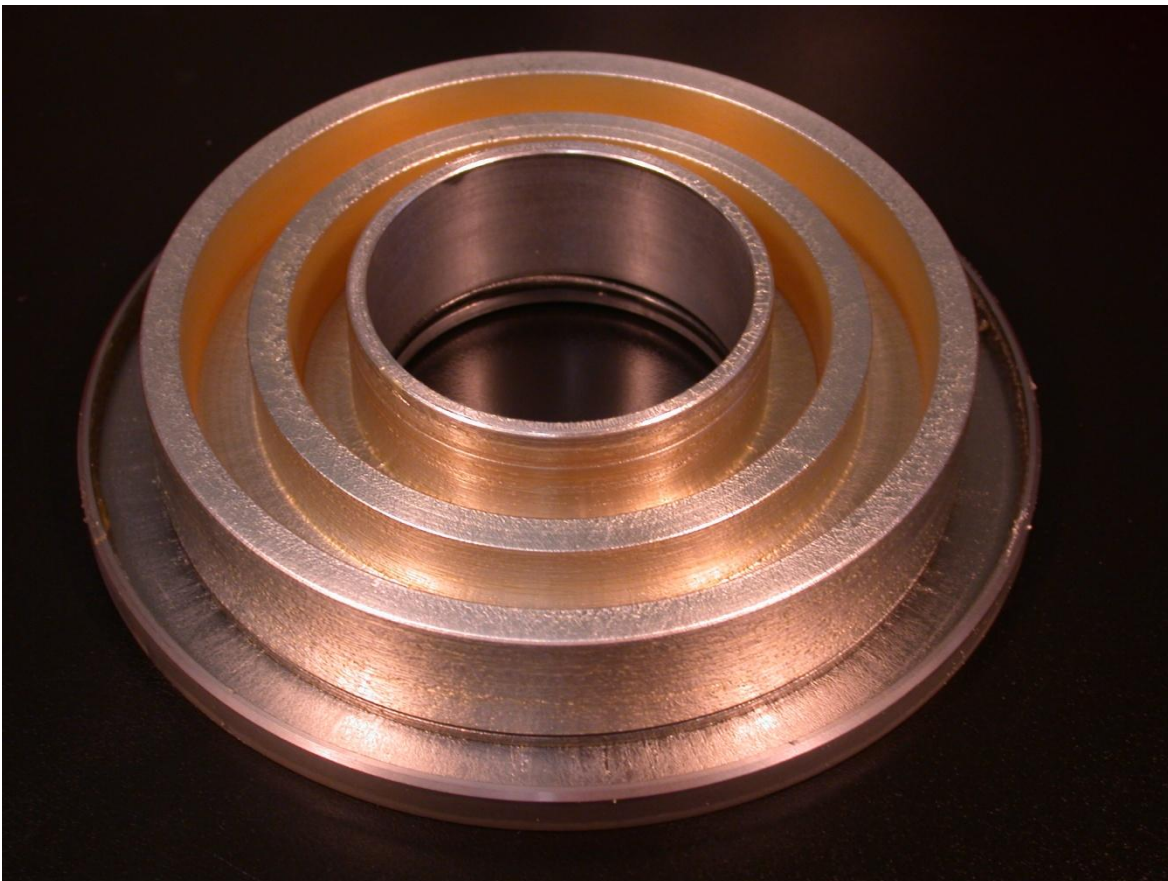


Bild 271: Dichtspalt Rotor 3000 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt



Bild 272: Rotor 10 min⁻¹



Bild 273: Dichtspalt Stator 10 min⁻¹



Bild 274: Dichtspalt Rotor 10 min⁻¹, Spalteingang abgedeckt

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse der Axialspalt-Dichtsysteme bei Schlamm:

Bei der Abdichtung von Schlämmen ist darauf zu achten, dass das Fluid der flüssigen Phase die physikalischen Eigenschaften des Fetts nicht negativ verändert. Es dürfen keine Lösungs- oder Fettverdünnungsvorgänge im Spalt stattfinden, da sonst die Fließgrenze verloren gehen kann. Wird dies beachtet, kann sehr gut gegen Schlämme abgedichtet werden. Die Abperleffekte fettiger Oberflächen bei wässrigen Fluiden haben hier eine positive Wirkung. Eine Überflutung des Dichtspaltes muss aber in jedem Fall verhindert werden.

7.4.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse bei Schmutzbeaufschlagung

Im Rahmen der Versuche bei Schmutzbeaufschlagung konnten viele Erkenntnisse gewonnen werden, wie mit Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen (FBFWD) gegen Verschmutzung abgedichtet werden kann. Die wichtigsten Erkenntnisse sollen hier nachfolgend aufgeführt und dann erklärt werden:

- Nur bei geöffnetem Fettspalt ist eine Abdichtung gegen Schmutz möglich.
- Die Dichtspaltgeometrie muss eine ausfördernde Charakteristik aufweisen.
- Das verwendete Fett muss eine Fließgrenze besitzen.
- Der Spalteingang hat für die Dichtfunktion einen sehr großen Einfluss.
- FBFWD sind für die Druckabdichtung ungeeignet.

Nur bei geöffnetem Fettspalt ist eine Abdichtung gegen Schmutz möglich:

Nur wenn es gelingt gezielt einen fettgefüllten geöffneten Dichtspalt herbeizuführen, kann sicher gegen Schmutz abgedichtet werden. Diese Erkenntnis stellt eine ganz zentrale Neuerung im Bereich der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen dar und wird bislang in der Literatur nicht beschrieben. Für den Vorgang der gezielten Spaltöffnung werden neben einer geeigneten Dichtspaltgeometrie eine Mindestscherung und eine Mindestfliehkraft benötigt. Im Betrieb in den Spalt eindringende Partikel werden entweder sofort von den klebrigen Fettoberflächen gebunden oder durch den Fliehkrafteinfluss bei Wellenrotation an die radial jeweils äußeren Spaltwände gedrängt. Können sich die Fettspalte nicht öffnen, werden vom Fett aufgenommene Partikel durch Mischvorgänge im gesamten Dichtsystem verteilt.

Die Dichtspaltgeometrie muss eine ausfördernde Charakteristik aufweisen:

Nur bei einer ausfördernden Spaltcharakteristik kann ein Dichtspalt gezielt geöffnet werden. Eine solche Fördergrundtendenz wird durch einen von der sauberen zur Schmutz beaufschlagten Seite ansteigenden Durchmesser im Dichtspalt erreicht. Nur bei so gestalteten Dichtsystemen ist es möglich, eingedrungene Partikel überhaupt wieder aus dem Dichtspalt zu fördern.

Das verwendete Fett muss eine Fließgrenze besitzen:

Für die sichere Abdichtung werden geöffnete Dichtspalte benötigt, um Mischvorgänge im Dichtspalt zu verhindern. Dies gelingt nur mit Fetten, die bei allen Betriebstemperaturen eine Fließgrenze besitzen.

Der Spalteingang hat für die Dichtfunktion einen sehr großen Einfluss:

Im Rahmen der Versuche hat sich gezeigt, dass die optimale Gestaltung des Dichtspalteingangs für die Gesamtfunktion „Abdichten gegen Schmutz“ von sehr großer Bedeutung ist. Bei den FBFWD mit relativ großen Spalthöhen haben sich sog. axial abgedeckten Radialspalte als die wirkungsvollste Spalteingangsgeometrie erwiesen. Vor allem große Partikel, die ein Freifördern des Spaltes massiv behindern, werden so am Eindringen in das Dichtsystem gehindert. Diese Spalteingangsgeometrie

wurde bei Fangkammer-Dichtsystemen zur Abdichtung gegen anspritzende Flüssigkeiten und Sperrluft-Dichtsystemen (3) mit sehr kleinen Spalthöhen zur Abdichtung gegen feine Stäube (7) auch für die optimalste befunden.

FBFWD sind für die Druckabdichtung ungeeignet:

Wird Fett in Dichtspalten der Scherung ausgesetzt, so fällt seine Viskosität stark ab. Wird jetzt zusätzlich auf einen bis dahin geschlossenen Dichtspalt einseitig ein Überdruck von wenigen mbar angelegt, ist dieser ausreichend groß, um Teile des Fetts aus dem Spalt auszuschieben und diesen zu öffnen. Nur bei gewissen Maßnahmen kann unter Ausnutzung der Fliehkraft gegen einen geringen Überdruck abgedichtet werden.

7.5 Untersuchung kombinierter Dichtsysteme

Die Versuchsergebnisse entstanden im Rahmen einer Diplomarbeit (22), die vom Autor der vorliegenden Arbeit betreut wurde.

7.5.1 Fett-Förderversuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Fett-Förderversuche vorgestellt. Bei diesen Versuchen war von besonderem Interesse, ob Fett von der Seite des berührungsfreien Dichtsystemteils unter der Dichtlippe hindurch auf die „saubere“ Seite in den Lagerraum gelangen kann? Die saubere Seite wird als Lagerraum bezeichnet, weil sich hier in realen Systemen die Wälzlager befinden, die vor Verschmutzung von außen geschützt werden müssen. Für den Übertritt von Fett in den Lagerraum gibt es zwei mögliche kritische Betriebsphasen:

- Während des Normalbetriebs bei Nenndrehzahl.
- Bei Nachschmiervorgängen, wenn Fett direkt in den Raum vor dem berührenden Dichtelement auf der Seite des Fettspalts eingebracht wird.

Beide Zustände wurden bei den Fett-Förderversuchen gemeinsam untersucht. Die Versuchsbeschreibung ist in Kapitel 6.5.2 zu finden.

Für die Beurteilung des Fett-Förderverhaltens wurde das Dichtsystem AUS mit eingebauten berührenden Dichtelementen (RWDR und V-Ring) horizontal getrennt und die Fettverteilung untersucht. In Bild 275 und Bild 276 ist jeweils die Blickrichtung bei der Ergebnisdokumentation dargestellt. Untersucht wurden alle 4 möglichen Kombinationen aus den Fetten A und C und den beiden Dichtsystemvarianten AUS 02 mit RWDR und V-Ring bei den Drehzahlen 10, 100, 500, 1000 und 3000 min⁻¹.

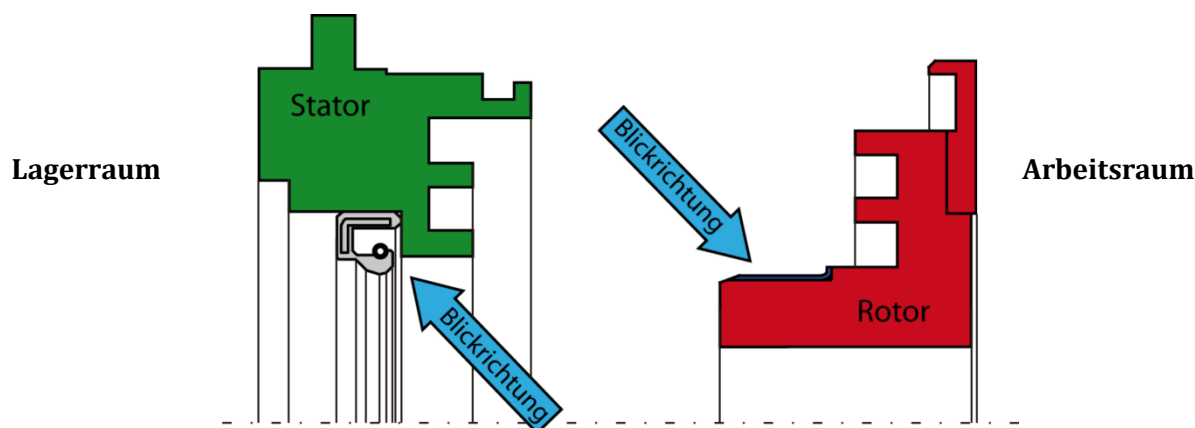


Bild 275: Rückwärtsförderung AUS 02 mit RWDR, Blickwinkel bei Ergebnisdokumentation (22)

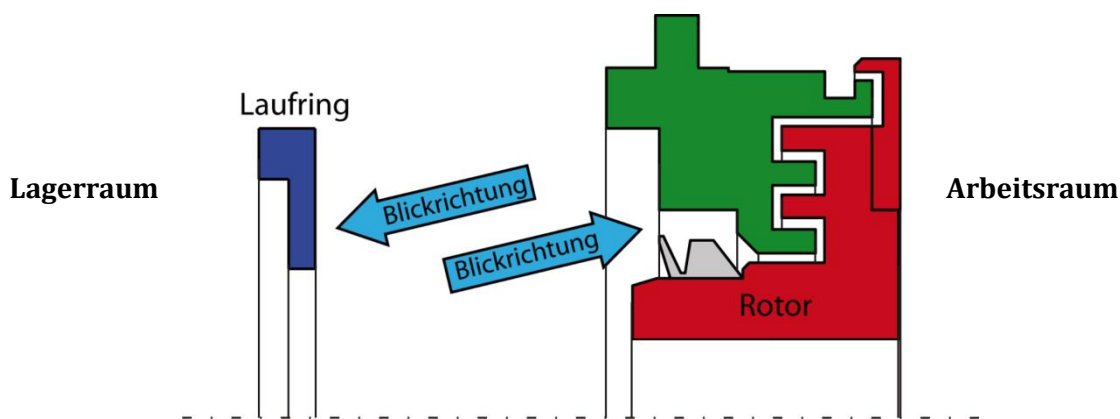


Bild 276: Rückwärtsförderung AUS 02 mit VR, Blickwinkel bei Ergebnisdokumentation (22)

In den folgenden Abbildungen (Bild 277 bis Bild 280) ist jeweils stellvertretend bei 500 min^{-1} und den Fetten A bzw. C eine Dichtsystemvariante horizontal zerlegt dargestellt. Zur Dokumentation wurden Bilder für die Auswertung des gezeigten Verhaltens erstellt.



Bild 277: Stator 500 min^{-1} , RWDR, Fett A (22)



Bild 278: Rotor 500 min^{-1} , RWDR, Fett A (22)



Bild 279: Laufring 500 min^{-1} , V-Ring, Fett C (22)



Bild 280: Rotor 500 min^{-1} , V - Ring, Fett C (22)

Auf den Ergebnisbildern ist deutlich die Aufteilung von blau eingefärbtem Fett und ungefärbtem Fett zu erkennen. Die Farbgränze befindet sich direkt an der Berührungspur der Dichtkante bzw. an deren Position im Betrieb auf der Gegenaufläcche. Dies bedeutet, dass bei beiden Dichtsystemen mit eingebautem RWDR bzw. V-Ring keine messbare Fett-Förderung von der Arbeitsraum- zur Lagerseite weder beim Befüllvorgang noch im Betrieb stattgefunden hat

Kurzzusammenfassung der Fett-Förderversuche:

Tabelle 22: Zusammenfassung Fett-förderversuche (22)

Dichtsystem	Fettsorte	
	Fett A	Fett C
AU_RWDR	+	+
AU_VR	++	++

++ sehr gut	+ gut	0 befriedigend	- mangelhaft
-------------	-------	----------------	--------------

Die Ergebnisse der Fett-Förderversuche konnten bei beiden Dichtsystemen mit gut bzw. sehr gut bewertet werden. Bei keinem der beiden Dichtsysteme hat während des Befüllvorgangs oder im Prüfbetrieb ein Fettübertritt aus dem Spalt des berührungsfreien Wellendichtsystems in den Lagerraum jenseits des berührenden Dichtelementes stattgefunden. Beide Dichtsysteme bieten den gleichen Schutz gegen unerwünschte Fett-Förderung. Der V-Ring verursachte jedoch ein geringeres Reibmoment und damit weniger Abwärme. Daher wurde der V-Ring hier besser bewertet.

7.5.2 Verschmutzungsversuche bei Kombinierten Dichtsystemen

Verschmutzungsversuche mit „ausfördernder“ Dichtspaltgeometrie wurden bereits in Kapitel 7.4 vorgestellt. Von besonderem Interesse war bei den vorliegenden Versuchen die Frage, ob die dort gesammelten Erkenntnisse sich direkt auf kombinierte Dichtsysteme übertragen lassen? Aus diesem Grund wurde hier das Verhalten von kombinierten Dichtsystemen bei Schmutzbeaufschlagung untersucht. Als Verschmutzungsmedien wurden Messingpulver und Quarzsand gewählt. Es wurde nach den in Kapitel 6.4 beschriebenen Methoden untersucht. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 6.5.1 erläutert. Eine Beschreibung der Dichtsysteme ist in Kapitel 5.1.3 zu finden.

Auf den folgenden Abbildungen (Bild 281 und Bild 282) sind jeweils die Entnahmestellen der Fettproben für die in Kapitel 6.4.1.2 vorgestellte Partikelklassifikation zu sehen.

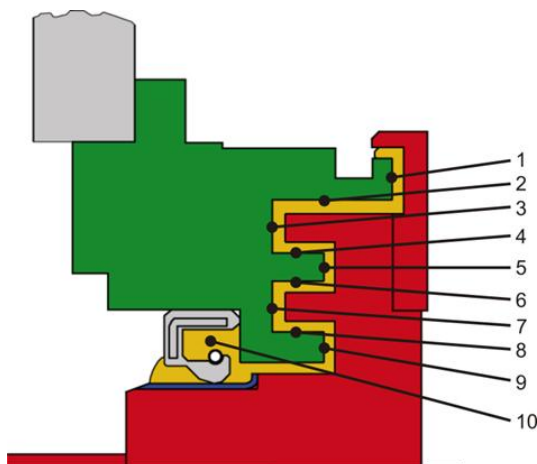


Bild 281: Partikelentnahmestellen für Dichtsystem AUS_RWDR (22)

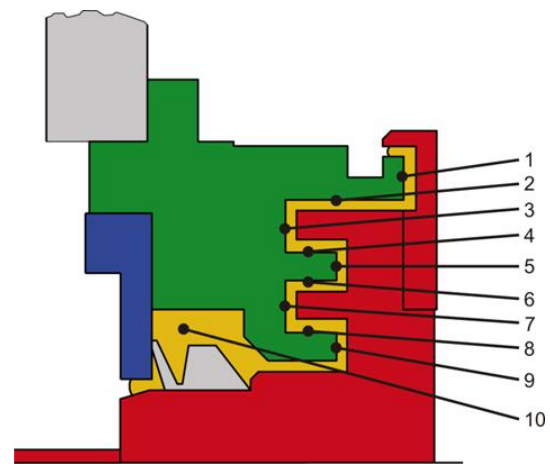


Bild 282: Partikelentnahmestellen für Dichtsystem AUS_VR (22)

Untersucht wurden bei Messingstaub- und Sandbeaufschlagung und beiden Fetten A und C jeweils die Dichtsysteme mit RWDR und V-Ring als berührenden Dichtelementen.

Da die hier gewonnenen Erkenntnisse mit den Ergebnissen aus Kapitel 7.4 sehr gut übereinstimmen, sollen an dieser Stelle exemplarisch nur wenige Ergebnisse ausführlich aufgelistet werden. Alle anderen Ergebnisse werden am Ende des Kapitels zusammenfassend in Tabelle 24 aufgeführt.

Bild 283 zeigt die Partikelverteilung der in Bild 282 beschriebenen Entnahmestellen bei Dichtsystem AUS mit V-Ring und Fett A nach der Beaufschlagung mit Messingstaub bei den aufgeführten Drehzahlen. Die Partikel sind in diesem Fall nur bis in den ersten Axialspaltbereich (Messstelle 2) vorgedrungen.

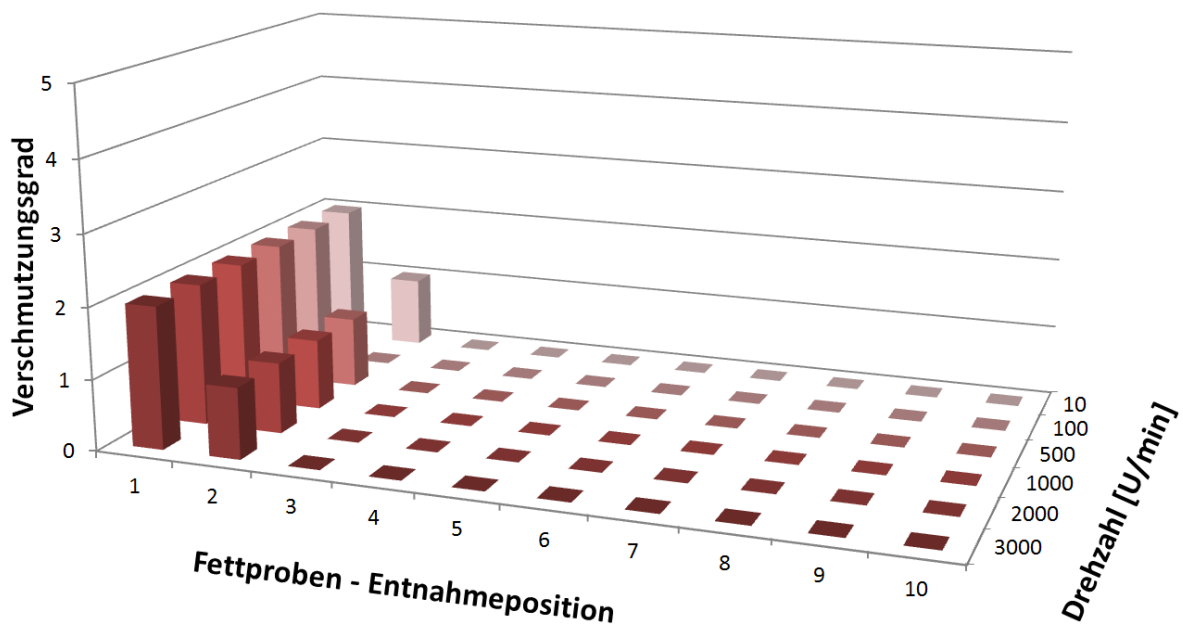


Bild 283: Ergebnis Verschmutzungsversuch Dichtsystem AUS_VR_Fett A-Messingstaub (22)

Da die Spaltzustände eines Dichtsystems, d.h. ob sie geöffnet oder geschlossen sind, einen direkten Einfluss auf die Dichtwirkung haben, wurde ihr Zustand jeweils bei Versuchsende erfasst und in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 23: Spaltzustände Dichtsystem AUS (AU) VR_Fett A-Messing (22)

Spaltzustand	Drehzahl [U/min]					
	10	100	500	1000	2000	3000
AU_VR_Fett A - Messing	II	II	II	II	II	II

II Spalt geöffnet	X Spalt geschlossen
-------------------	---------------------

Beim Dichtsystem AUS mit V-Ring (AU_VR) mit Versuchsfett A war der Spalt bei allen Drehzahlen geöffnet. Dies hat die Dichtwirkung des Dichtsystems positiv beeinflusst.

Kurzzusammenfassung der Verschmutzungsversuche:

Alle Ergebnisse der Verschmutzungsversuche sind in Tabelle 24 zusammengefasst und entsprechend bewertet worden. Die Bewertung ist im Anschluss an die Tabelle beschrieben.

Tabelle 24: Zusammenfassung Verschmutzungsversuche (22)

	Drehzahl [U/min]					
	10	100	500	1000	2000	3000
Spaltzustand						
AU_RWDR_Fett A - Messing	II	II	II	II	II	II
AU_RWDR_Fett C - Messing	X	X	II	II	II	II
AU_VR_Fett A - Messing	II	II	II	II	II	II
AU_VR_Fett C - Messing	X	X	II	II	II	II
AU_VR_Fett A - Sand	X	II		II		II
AU_VR_Fett A_axial - Sand	X	X		II		
Verschmutzungsgrad						
AU_RWDR_Fett A - Messing	++	++	+	++	++	++
AU_RWDR_Fett C - Messing	+	++	++	++	++	++
AU_VR_Fett A - Messing	++	++	++	++	++	++
AU_VR_Fett C - Messing	-	++	+	++	+	+
AU_VR_Fett A - Sand	0	+		++		+
AU_VR_Fett A_axial - Sand	-	-		+		

++ sehr gut	+ gut	0 befriedigend	- mangelhaft
II Spalt geöffnet		X Spalt geschlossen	

Werden die Spaltzustände mit dem Verschmutzungsgrad eines Dichtsystems verglichen, so kann festgestellt werden, dass bei geschlossenen Spalten mit starker Verschmutzung weit innen im Dichtspalt zu rechnen ist. Für eine zuverlässige Abschirmung des berührenden Dichtelementes sollten daher geringe Drehzahlen vermieden werden oder nur kurzzeitig vorhanden sein.

Bewertung:

- ++ sehr gut – Verschmutzung nachweisbar bis Messstelle drei
- + gut – Verschmutzung nachweisbar bis Messstelle sechs
- 0 befriedigend – Verschmutzung nachweisbar bis Messstelle acht
- mangelhaft – Verschmutzung nachweisbar bis Messstelle zehn
- II Spalt geöffnet – Im Dichtsystem hat sich ein Luftspalt gebildet
- X Spalt geschlossen – Im Dichtsystem hat sich kein Luftspalt gebildet

7.6 Versuchsergebnisse der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen mit Fettabfluss (FBFWDA)

Die Versuche der Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen mit Fettabfluss (FBFWDA) wurden in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Versuchsphase wurde der Fettaustritt aus dem Dichtsystem optimiert. In der daran anschließenden zweiten Versuchsphase erfolgte die Überprüfung des Dichtverhaltens der neuen Dichtspaltgeometrie bei Sandbeaufschlagung. Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse beider Versuchsphasen vorgestellt.

7.6.1 Fettaustrittsuntersuchung FBFWDA

Bei den Fettaustrittsuntersuchungen wurde der gezielte Fettabfluss aus dem Dichtsystem untersucht. Folgende Fragen beeinflussten hier maßgeblich den Versuchsablauf:

Wie muss die Fettaustrittsöffnung gestaltet sein, um einen optimalen Fettabfluss sicherzustellen?

Wie muss der dem Dichtspalteingang nachgeschaltete Spaltabschnitt gestaltet sein, um ein Austreten von Fett am Dichtspalteingang wirkungsvoll zu verhindern?

Als Basis diente hier das „einfördernde“ Dichtsystem EIN 01, das um eine Fettaustrittsöffnung erweitert wurde und fortan unter der Bezeichnung ECO 01 läuft. Ausgehend von diesem Dichtsystem

wurde nach der optimalen Geometrie gesucht und die Dichtsystemvarianten ECO 02 bis ECO 05 entwickelt. Der genaue Versuchsablauf ist in Kapitel 6.6.1 beschrieben. Die Dichtsysteme werden in Kapitel 5.1.4 vorgestellt. Für die Bewertung des Fettabflussverhaltens wurden folgende Kriterien bei unterschiedlichen Drehzahlen der Dichtsysteme ECO 01 bis ECO 05 in Kombination mit den Fetten „A“ und „C“ untersucht und bewertet:

- Fettabfluss
- Dichtspaltzustand nach dem Versuch (Restmoment)
- Fettkragen am Dichtspalteingang

Alle Versuchsergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 25 aufgeführt. Die Bewertung ist im Anschluss an die Tabelle beschrieben.

Tabelle 25: Fettabflussverhalten der Dichtungen ECO 01 bis ECO 05 bei Fett A und Fett C

	Untersuchungsdrehzahlen [min ⁻¹]					
	10	100	500	1000	2000	3000
Fettabfluss						
ECO 01 - Fett A	--	--	--	--	--	--
ECO 01 - Fett C	--	--	o	+	+	+
ECO 02 - Fett C	-	-	o	+	+	+
ECO 03 - Fett A	--	--	+	++	++	++
ECO 03 - Fett C	-	o	++	++	++	++
ECO 04 - Fett A	--	-	+	++	++	++
ECO 05 - Fett A	++	o	++	++	++	++
ECO 05 - Fett C	-	++	++	++	++	++

Bewertung:

- ++ sehr gut - guter Fettabfluss, kein Fettkragen am Eingangsspalt, kein Restmoment
- + gut - guter Fettabfluss, kleiner Fettkragen am Eingangsspalt, kleines Restmoment
- o befriedigend - mäßiger Fettabfluss, mittlerer Fettkragen, erhebliches Restmoment
- mangelhaft - mäßiger Fettabfluss, erheblicher Fettkragen, Restmoment
- ungenügend - minimaler Fettabfluss, großer Fettkragen, Restmoment

Als Beispiel für einen Versuch mit „gutem“ Ergebnis ist in Bild 284 der Spalteingang bei Versuchsende von Dichtsystem ECO 04 bei 500 min⁻¹ abgebildet.

Werden die Ergebnisse betrachtet, so fällt auf, dass vor allem bei niederen Drehzahlen der gezielte Fettabfluss nur schwer beherrschbar ist. Hier wird das Fett nur wenig geschert, die scheinbare dynamische Viskosität wird folglich nur wenig herabgesetzt und die Wirkung der Fliehkräfte auf das Fett ist bei diesem Betriebszustand noch sehr klein. Die besten Ergebnisse werden hier bei Dichtsystem ECO 05 erzielt. Bei diesem Dichtsystem wurde die Fettabflussöffnung sehr groß gestaltet und direkt in den Fetthauptstrom positioniert. Das Austreten von Fett am Dichtspalteingang konnte durch eine gestufte Spaltform vor dem Dichtspalteingang weitgehend vermieden werden. Die bei langen Radialspalten auftretende Zirkulationsströmung (Kapitel 7.2.3) mit dem Effekt einer Separierung von radial nach innen und radial nach außen gerichteten Strömungen und dem daraus resultierenden Ausfordern von Fett wird durch die gestufte Spaltform so beeinflusst, dass eine Gesamtfördertendenz nach radial außen und damit ins Dichtsystem hinein entsteht. Durch die gestufte Spaltform treffen beide Strömungen mehrfach aufeinander und die radial nach innen zum Spalteingang gerichtete Strömung am Stator wird abgebremst.



Bild 284: Fettabflussuntersuchung Dichtsystem ECO 04 - Fett A bei 500 min⁻¹ - Ergebnis : gut

7.6.2 Schmutzbeaufschlagung an FBFWDA

Die Versuche mit Schmutzbeaufschlagung wurden ausschließlich am Dichtsystem ECO 05 bei Sandbeaufschlagung mit den Fetten „A“ und „C“ durchgeführt. Für die Einzelversuche bei Fett A ist die Fettverschmutzung in Bild 285 nach Drehzahlen geordnet dargestellt.

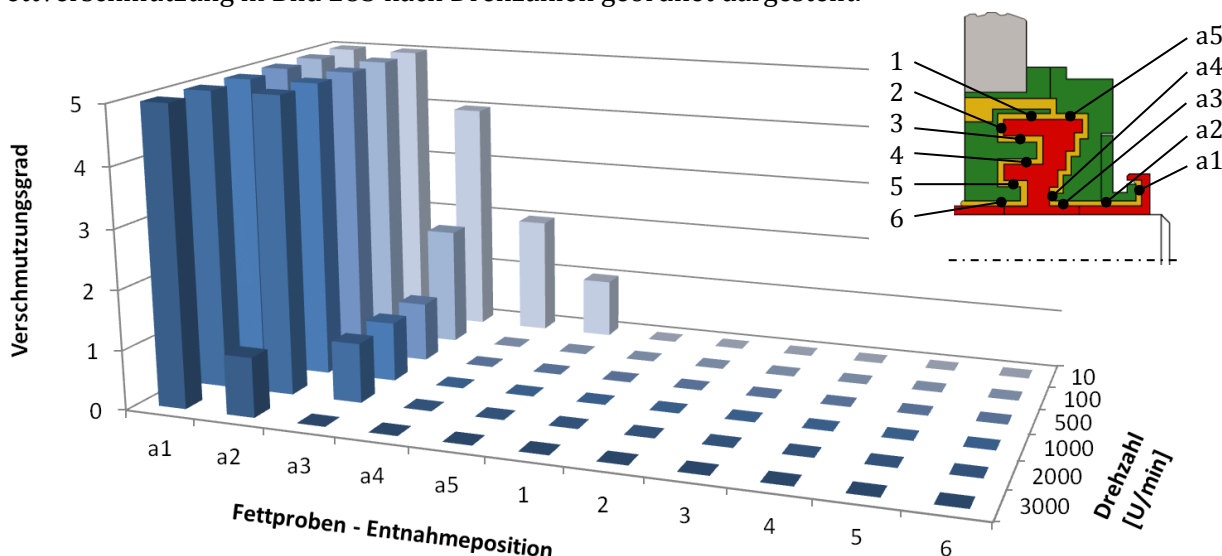


Bild 285: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem ECO 05-Fett A-Sand

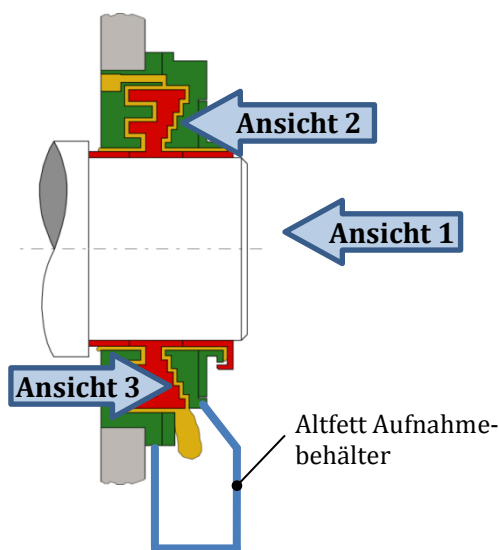


Bild 286: Aufnahmepositionen

Die Fettprobenentnahmepositionen a1 bis a5 befinden sich im Dichtspalteingang bzw. im Bereich des Stufenpalttes zur Fettrückhaltung. Dieser Bereich ist nicht für die Abdichtung gegen Schmutz zuständig und kann daher auch komplett von Partikeln durchwandert werden. Der Spaltbereich, in dem sich die Partikelentnahmestellen 1 bis 6 befinden, ist der eigentliche Abdichtbereich. Partikel, die bis Position 6 vordringen, haben die Dichtung überwunden. Wie in Bild 285 zu sehen ist, sind bei diesem Versuch Partikel nur bis zur Position a5 vorgedrungen. Nachfolgend sind mehrere Bilder vom Dichtspalteingang und bei zerlegtem Dichtsystem nach Versuchsende bei den Drehzahlen 10 min⁻¹ und 3000 min⁻¹ abgebildet. Bild 286 zeigt die Aufnahmepositionen der folgenden Bilder. In Bild 287 bis Bild 289 sind die Spaltzustände nach dem Versuch bei 10 min⁻¹ dargestellt.

Der komplette Dichtspalt hatte sich geöffnet und es hatte sich kein Fettkragen am Dichtspalteingang ausgebildet. Im Altfett Aufnahmebehälter ist ein guter Fettabfluss erkennbar. Die Partikel konnten vollständig zurückgehalten werden. Der Versuchsablauf ist in Kapitel 6.6.2 beschrieben.

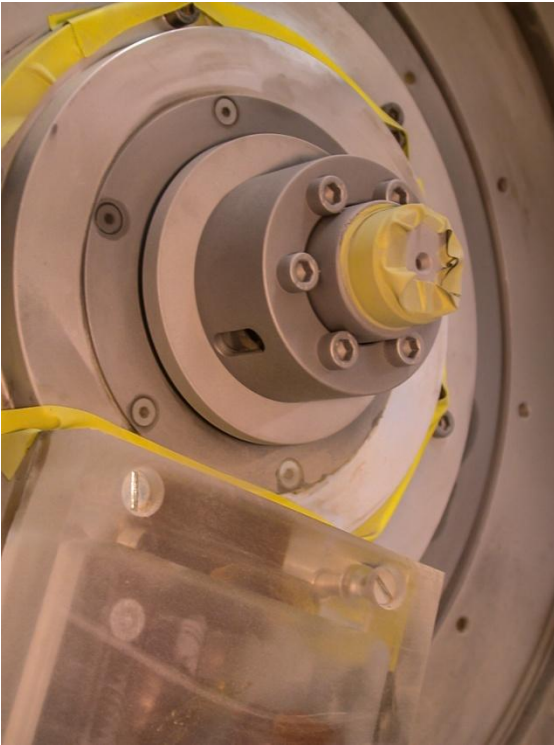


Bild 287: ECO 05 Ansicht 1; 10 min⁻¹-Fett A-Sand



Bild 288: ECO 05 Ansicht 2; 10 min⁻¹-Fett A-Sand

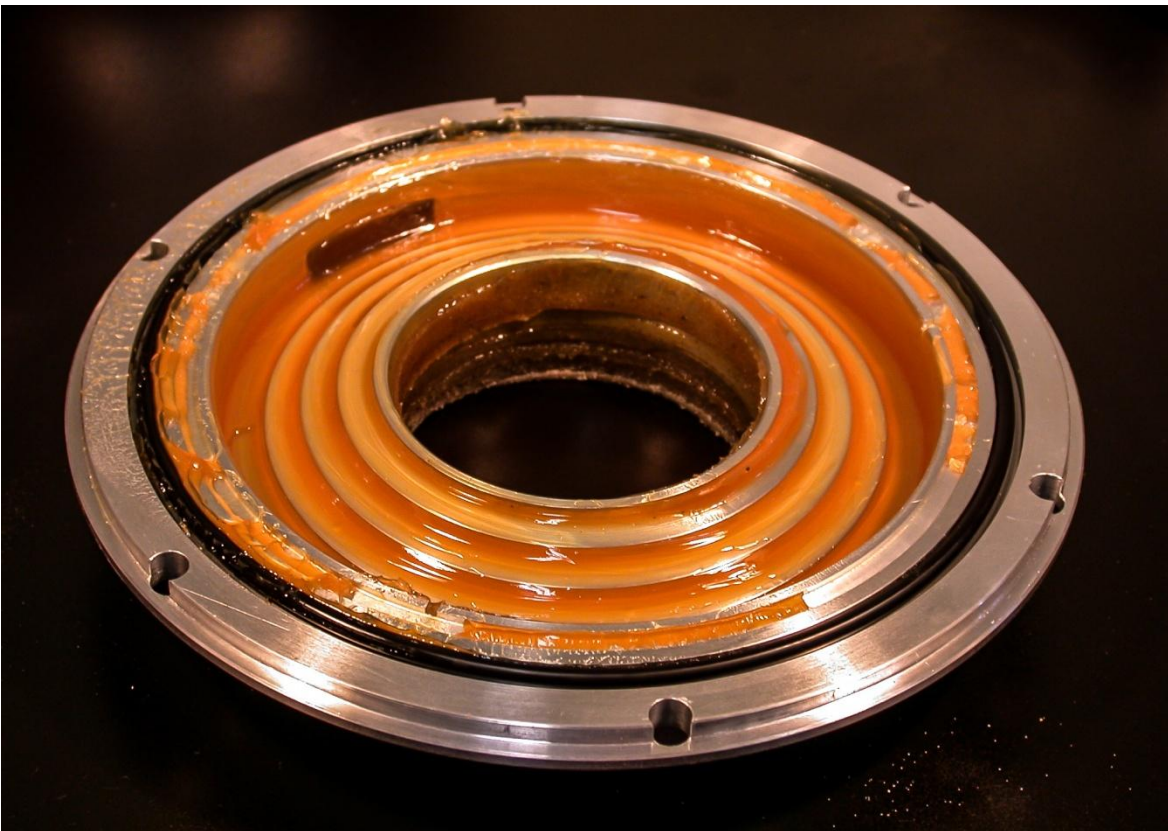


Bild 289: ECO 05 Ansicht 3; 10 min⁻¹-Fett A-Sand

In Bild 290 bis Bild 292 ist der Spaltzustand bei 3000 min^{-1} abgebildet. Der Dichtspalt hat sich bei gutem Fettabfluss geöffnet. Es entstand auch hier kein Fettkragen am Dichtspalteingang. Die Fettauflage am Rotor ist wesentlich geringer als beim Versuch mit 10 min^{-1} .

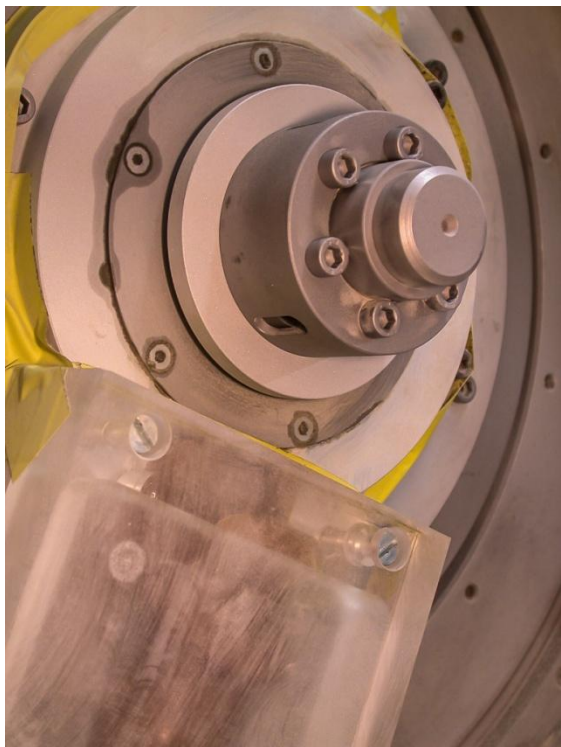


Bild 290: Ansicht 1; 3000 min^{-1} -Fett A-Sand



Bild 291: Ansicht 2; 3000 min^{-1} -Fett A-Sand

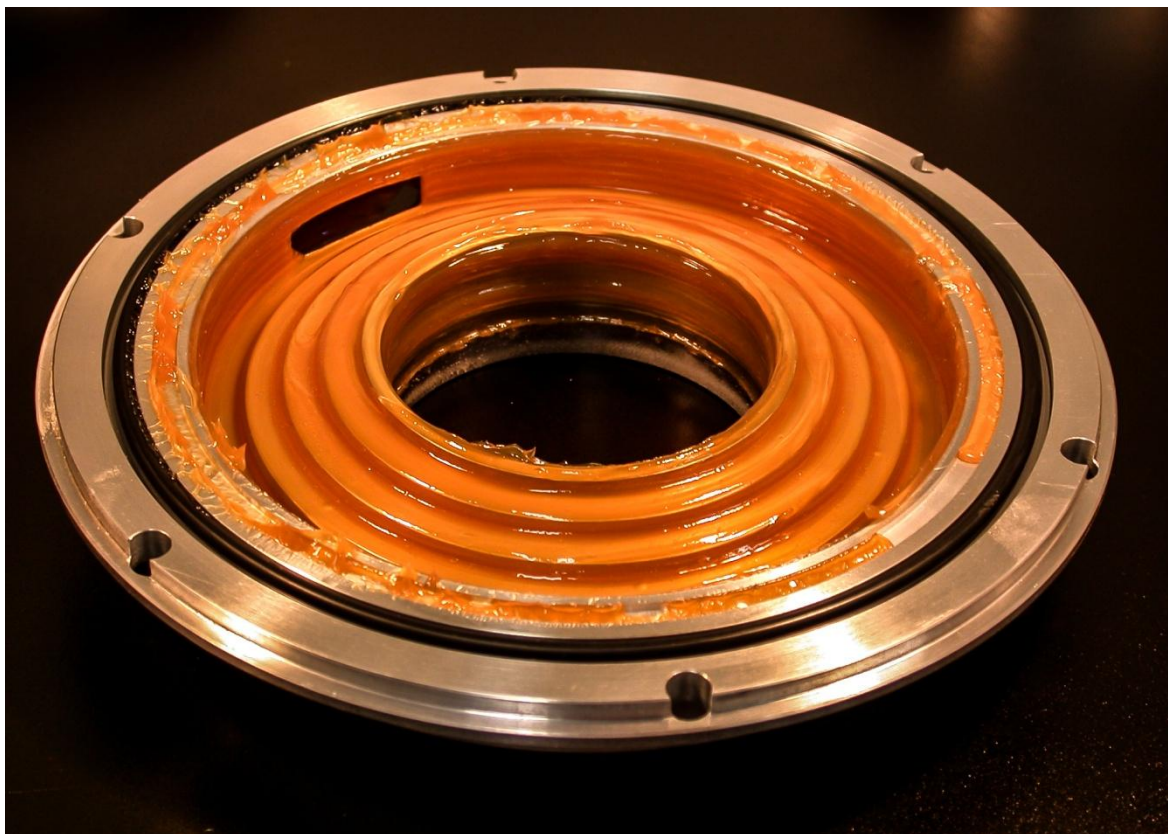


Bild 292: ECO 05 Ansicht 1; 3000 min^{-1} -Fett A-Sand

Die Ergebnisse der Schmutzbeaufschlagungsversuche bei Fett C sind nach Drehzahlen getrennt in Bild 293 dargestellt. Das Ergebnis ist hier zweigeteilt. Bei den Versuchen der Drehzahlen, deren Dichtspalt sich nicht geöffnet hatte, kam es zur Vermischung von partikeldurchsetztem und sauberem Fett im gesamten Dichtsystem. Hier wurde das Dichtsystem bei niederen Drehzahlen überwunden. Bei allen anderen Drehzahlen war die Funktion voll gegeben.

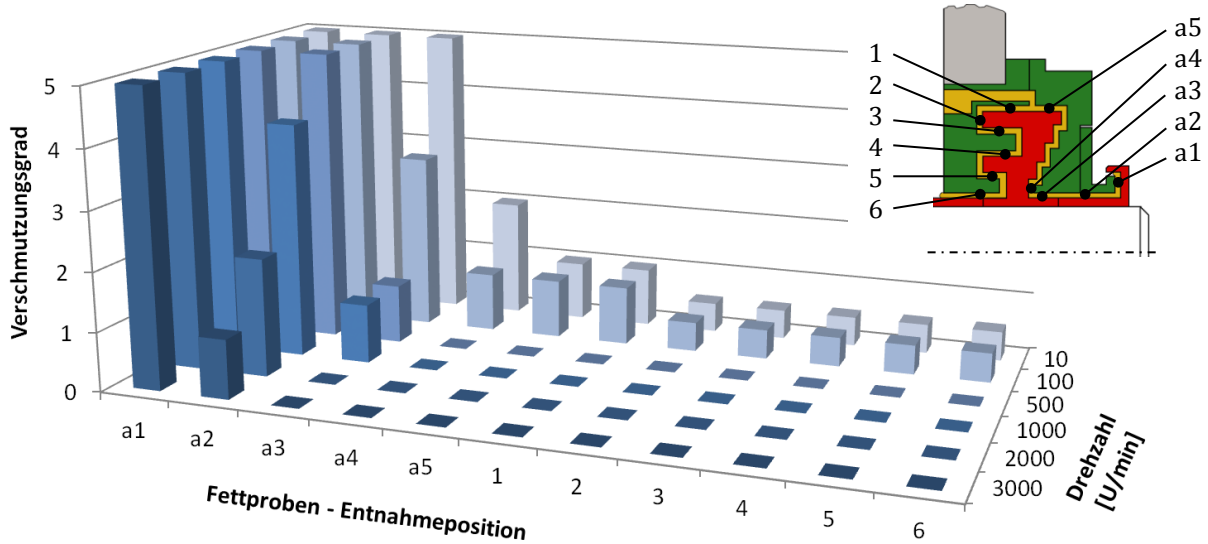


Bild 293: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem ECO 05-Fett C-Sand

In Bild 294 bis Bild 296 ist das Dichtsystem nach Versuchsende bei 10 min⁻¹ abgebildet. Die Anichtspositionen sind in Bild 286 ersichtlich. Am Dichtspalteingang hatte sich ein großer Fettkragen gebildet und in Bild 295 und Bild 296 ist an der mit „Demontagefahnen“ versehenen Fettoberflächen erkennbar, dass sich der Dichtspalt nicht geöffnet hatte.



Bild 294: Ansicht 1; 10 min⁻¹-Fett C-Sand



Bild 295: Ansicht 2; 10 min⁻¹-Fett C-Sand

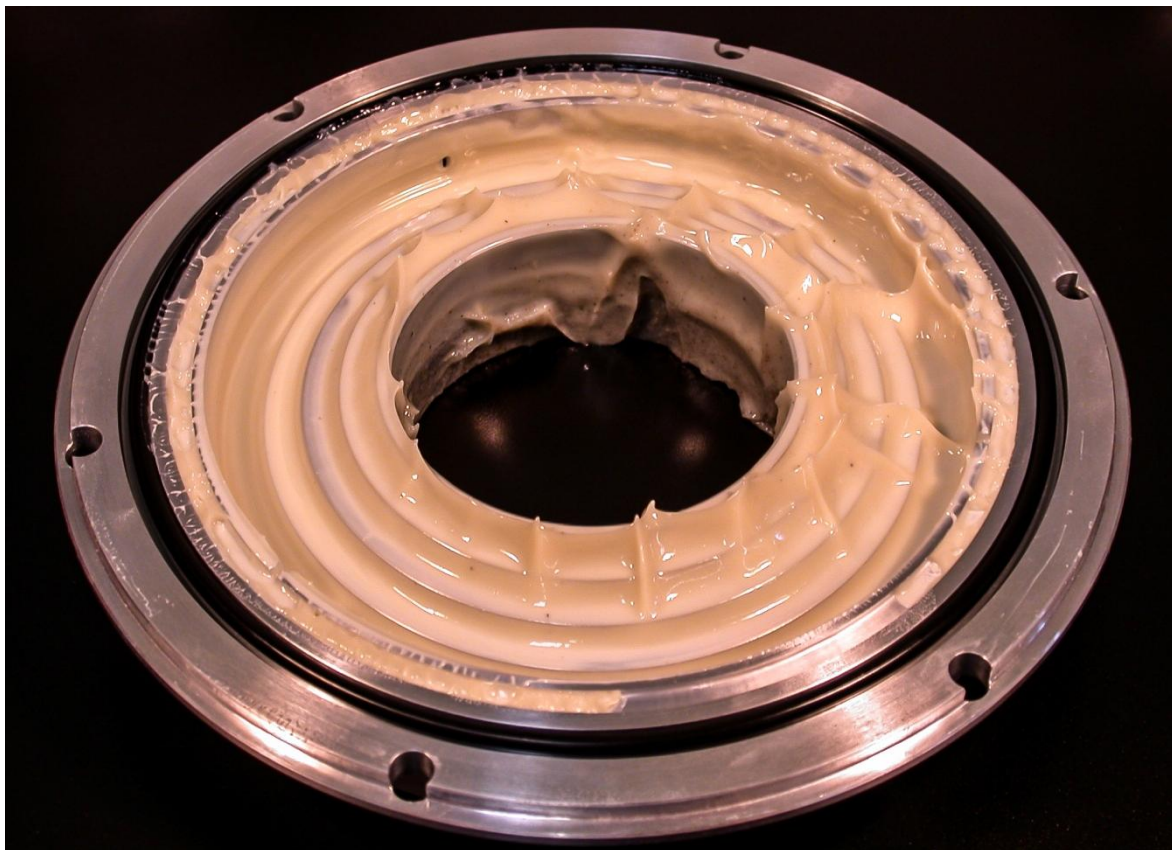


Bild 296: ECO 05 Ansicht 3; 10 min⁻¹-Fett C-Sand

Bei 3000 min⁻¹ zeigen die Aufnahmen (Bild 297 bis Bild 299) nach Versuchsende ein ganz anderes Bild. Es hatte sich kein Fettkragen ausgebildet. Der Fettabfluss war gut und der Dichtspalt hatte sich geöffnet, so dass es nicht zur Partikeldurchmischung gekommen ist.



Bild 297: Ansicht 1; 3000 min⁻¹-Fett C-Sand



Bild 298: Ansicht 2; 3000 min⁻¹-Fett C-Sand



Bild 299: ECO 05 Ansicht 3; 3000 min⁻¹-Fett C-Sand

Da die Schutzwirkung des abgedeckten Spalteingangs bei den Drehzahleinzelnversuchen bei allen Versuchen, bei denen sich der Dichtspalt geöffnet hatte, so gut war, dass im Rahmen der Versuchsdauer von 1 Stunde nahezu keine Partikel bis zum Hauptdichtbereich (Entnahmepositionen 1 bis 6) des Dichtsystems vordrangen, wurden die Versuchsbedingungen erheblich verschärft. Es sollte mit einem abschließenden Versuch überprüft werden, ob der Hauptdichtbereich zuverlässig in der Lage ist, gegen Partikel zu schützen. Aus diesem Grund wurde der abgedeckte Spalteingang durch einen axialen Spalteingang ersetzt. Die Versuchszeit wurde auf 12 Stunden verlängert. Die Drehzahl wurde ständig zwischen 10 und 2010 min⁻¹ variiert. Der Versuchsablauf ist in Kapitel 6.6.2.2 beschrieben. In Bild 300 ist die Fettverschmutzung der einzelnen Probenentnahmestellen dargestellt.

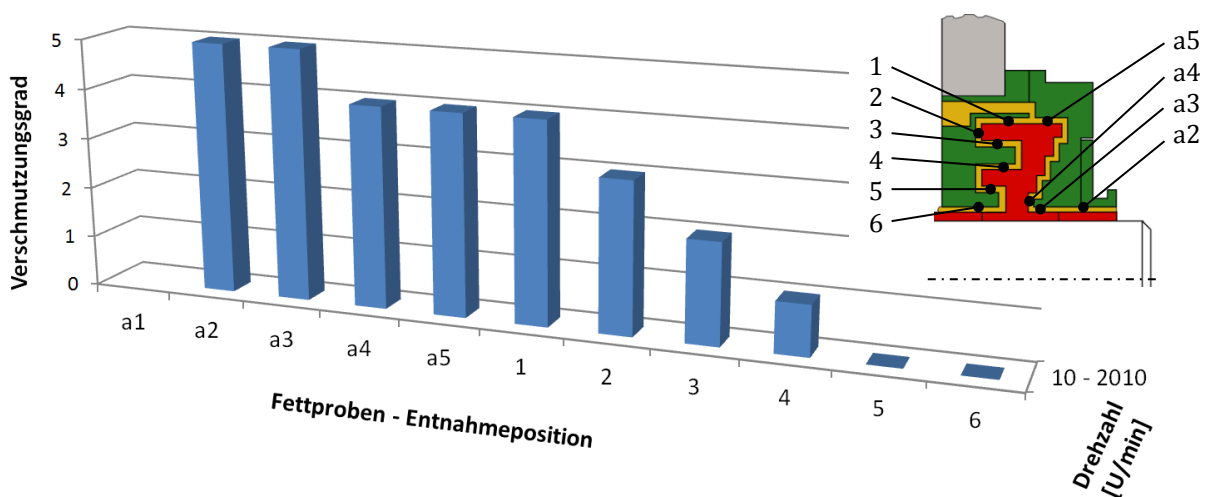


Bild 300: Fettverschmutzung im Dichtspalt - Dichtsystem ECO 05 ax-12h-Fett A-Sand

Bei diesem Versuch ist erwartungsgemäß erheblich mehr Sand in das Dichtsystem eingedrungen und der Hauptdichtbereich der Probenentnahmestellen 1 bis 6 konnte seine Fähigkeit zur Partikelrückhaltung erfolgreich unter Beweis stellen. In Bild 301 bis Bild 303 ist der Zustand des Dichtsystems nach Versuchsende zu sehen. Durch das Eindringen von großen Mengen an Sand in den lan-

gen axialen Eingangsspalt hat sich ein großer Fettkragen ausgebildet. Dies darf aber nicht hinwegtuschen über die weit größere Menge an Fett, die durch die Abflussöffnung zur vollständigen Öffnung des Dichtspaltes (Bild 302) in den Altfett Aufnahmebehälter entwichen war.



Bild 301: Ansicht 1; 10 - 2010 min⁻¹-Fett C-Sand



Bild 302: Ansicht 1; 10 - 2010 min⁻¹-Fett C-Sand



Bild 303: ECO 05 ax - Ansicht 3; 10 - 2010 min⁻¹-Fett C-Sand

Das Fett in Bild 303 ist am Außendurchmesser erheblich mit Partikeln verunreinigt. Dies wird allerdings erst richtig unter dem Mikroskop sichtbar.

7.6.3 Kurzzusammenfassung der Versuchsergebnisse an Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsystemen mit Fettabfluss

Die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass es mit geeigneten Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen mit Fettabfluss möglich ist, den Fettaustritt in die Umgebung weitgehend zu reduzieren, Altfett für die Entsorgung fachgerecht aufzufangen und dennoch eine sehr gute Abdichtung gegen Schmutz von außen zu erreichen. Lediglich bei niederen Drehzahlen, bei denen fliehkraftbedingte äußere Kräfte für eine aktive Fettförderung innerhalb des Dichtsystems zu klein sind, stoßen Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen mit Fettabfluss an ihre Grenzen und es kommt zu Fettaustritt in die Umgebung bzw. zum unerwünschten Partikeleintrag jenseits des Dichtsystems.

8 Konstruktion, Betrieb und Wartung von FBFWD(A)

In den folgenden Kapiteln sind die im Rahmen der Forschungsarbeiten gewonnen Erkenntnisse über die Funktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen bei horizontaler Wellenausrichtung zur Schmutzabdichtung in Empfehlungen anwendergerecht aufbereitet. Im Kapitel 8.1 wird knapp und anschaulich deren Funktionsweise beschrieben. Mit diesen Basisinformationen für das Funktionsverständnis kann eine Einschätzung der zu erwartenden Dichtfunktion beliebiger Dichtspaltgeometrien Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen erfolgen.

8.1 Grundlagen zur Funktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen

Wellendurchtrittsstellen in Gehäusen müssen in vielen Anwendungen in stark verschmutzter Umgebung abgedichtet werden. Berührende Dichtungen sind für diesen Einsatzzweck aufgrund des zerstörerisch wirkenden Schmutzes allgemein nicht geeignet. Abhilfe schaffen Berührungsfreie Wellendichtungen (BFWD) in Form von Fangkammer-Dichtsystemen (2), Sperrluft-Dichtsystemen (7) und Fettgefüllten Dichtspalten.

Bei Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen (FBFWD) soll Fett den Schmutz am Durchdringen der Spalte hindern oder zumindest stark behindern. Damit FBFWD ihrer Funktion gerecht werden können, sind aber einige konstruktive und den Betrieb betreffende Anforderungen zu erfüllen. Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen mit Fettabfluss (FBFWD A) verhindern durch gezieltes Auffangen von Altfett weitgehend den Austritt von Fett in die Umgebung und ermöglichen so dieses fachgerecht zu entsorgen.

Die Spalte von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen werden zu Beginn der Betriebsphase und in regelmäßigen Serviceintervallen bei langsamer Wellendrehzahl mit frischem Fett von der sauberen Seite her vollständig gefüllt. Während der Startphase, also sobald der Rotor des Dichtsystems sich schneller zu drehen beginnt, wird das Fett im Dichtspalt geschert. Diese Scherung verringert die dynamische Viskosität des Fetts. Da es sich bei Schmierfetten um strukturviskose Fluide mit Fließgrenze handelt, wächst die Fließfähigkeit der Fette mit steigender Scherung.

Diese Eigenschaft und die mit steigender Wellendrehzahl auf das Fett einwirkenden Fliehkräfte, führen bei optimal gestalteter Dichtspaltgeometrie zu einem Öffnen des Dichtspaltes. Der Spalt wird in diesem Prozess auf seine Aufgabe, dem zuverlässigen Abdichten, vorbereitet – er wird konditioniert. Dies klingt zunächst widersprüchlich, aber nur bei definiert geöffnetem Dichtspalt ist eine Abdichtung gegen Verschmutzung möglich. Dieser für die sichere Abdichtung gegen Schmutz essenzielle Vorgang wurde bislang in der Literatur nicht beschrieben und stellt somit eine zentrale Erkenntnis der vorliegenden Arbeit dar. Lassen im anderen Fall die Betriebsbedingungen oder die Spaltgeometrie ein Öffnen des Dichtspaltes nicht zu, so kommt es sehr schnell durch Wirbelströmungen zur Vermischung von sauberem und verunreinigtem Fett der Verschmutzungsseite. Die Dichtwirkung des Systems geht komplett verloren, indem der Schmutz aktiv zur sauberen Seite hin gefördert wird.

In fettgefüllten Axialspalten stellt sich bei Wellendrehung eine Fettströmung in Umfangsrichtung ein. In Radialspalten entsteht durch die dort wirkenden Fliehkräfte zusätzlich eine Zirkulationsströmung (Bild 304).

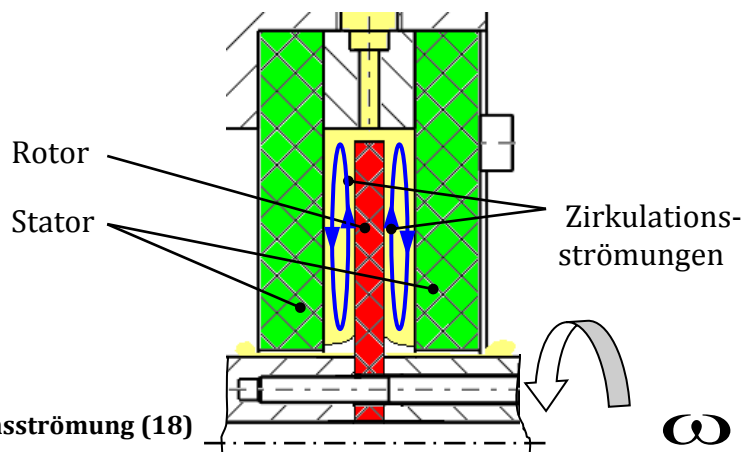


Bild 304: Zirkulationsströmung (18)

Das Fett wird hier am Rotor unter Fliehkräfteinfluss radial nach außen beschleunigt. Entlang der Statorwand wird Fett nach radial innen gedrängt. Haben Dichtspalte von innen nach außen (zur Schmutzseite hin) immer größer werdende Spaltdurchmesser, so können die Dichtspalte gezielt geöffnet werden. Beim gewünschten Öffnen des Dichtspaltes wird dabei nicht die komplette Fettfüllung aus dem Spalt gefördert, sondern gerade so viel, dass sich Rotor und Stator des Dichtsystems jeweils mit zugehöriger Fettauflage nicht mehr berühren. So entsteht ein Engspalt mit klebrigen Oberflächen.

Die Vermischung von unterschiedlich verunreinigtem Fett innerhalb des Dichtsystems kann somit nicht stattfinden, da der Luftspalt beide Fettschichten voneinander trennt und damit auch keine die Viskosität herabsetzende Scherwirkung mehr vorhanden ist. Nach dem erstmaligen Wirken von Scherung und Fliehkräften bei Nenndrehzahl verbleiben die Fettauflagen an Ort und Stelle. Ein günstig gestalteter, konditionierter Dichtspalt zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Es herrscht im Spalt keine Fluidreibung (nur Luftreibung / während der Konditionierung kurzzeitig Fluidreibung durch Fett).
- Kein Wärmeeintrag, da keine Fluidreibung.
- Verlustleistung nahezu null.
- Es existieren keine Mischvorgänge, da keine Scherung im Fett vorhanden.
- Enger Spalt mit klebrigen (fettbeschichteten) Spaltwänden.
- Partikel, die die Spaltwand berühren, bleiben kleben (möglichst nahe am Eingangsbereich gewünscht).
- Fliehkraft und Luftströmung drängen Partikel gegen Spaltwände.

Werden die nachfolgend beschriebenen konstruktiven Anforderungen für die unterschiedlichen Funktionsbereiche beachtet, so kann sich zum einen der Dichtspalt optimal konditionieren und zum anderen seiner Abdichtfunktion bei sehr starkem Schmutzanfall gerecht werden.

Bei Fettgefüllten Berührungsfeien Wellendichtungen werden zwei Funktionsbereiche unterschieden: Der schmutzseitig angeordnete Spalteingang und das sich daran anschließende Hauptlabyrinth. Bei Fettgefüllten Berührungsfeien Wellendichtungen mit Fettabfluss ist ein dritter Funktionsbereich der sog. Fettrückhaltebereich mit Fettabflussöffnung zwischengeschaltet.

Der „Spalteingang“ soll das Hauptlabyrinth bestmöglich vor auftreffendem Schmutz schützen. Hier macht man sich durch eine geeignete Geometrie und unter Ausnutzung der Wirkung von Fliehkräften mehrere der von den Fangkammerdichtsystemen bekannten Wirkprinzipien, wie Abschirmen, Abweisen, Abschleudern und Rückfördern, zu nutze.

Das „Hauptlabyrinth“ muss nun die Feinabscheidung des Schmutzes übernehmen, der den Spalteingang überwunden hat, und diesen wieder in den Spalteingangsbereich zurückführen.

Der „Fettrückhaltebereich mit Fettabflussöffnung“ mit seinem Stufenspalt soll bei Dichtsystemen mit Fettabflussöffnung ein Austreten von Fett aus dem arbeitsraumseitigen Spalteingang durch Rückfördern von Fett zur Abflussöffnung hin verhindern.

Mit der Zeit wird auch bei bestmöglicher Schmutzabschirmung der Sättigungsgrad des Fetts erreicht. Das Fett am Spalteingang und im äußeren Bereich des Hauptlabyrinths kann jetzt keinen weiteren Schmutz mehr binden und muss ersetzt werden. Durch eine Nachschmierereinrichtung wird altes Fett durch neues ersetzt. Nachgeschmiert wird entweder durch Fett, das aus dem Lagerraum, also von der sauberen Seite her (wo sich häufig fettgeschmierte Lager befinden) kommt, oder durch separat in das Gehäuse eingebrachte Nachschmierkanäle.

Die genaue Funktion dieser Teilbereiche wird bei den entsprechenden Konstruktionsvorschlägen beschrieben.

8.2 Konstruktion von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen

8.2.1 Standardbauformen

Eine Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtung ist aus den Teilbereichen Spalteingang und Hauptlabyrinth aufgebaut. Ggf. wird noch ein Fettrückhaltebereich mit Fettabfluss dazwischengeschaltet. Alle Bereiche wiederum setzen sich aus der Kombination von mehreren Standardspaltformen zusammen. Eine Auswahl möglicher Standardspaltkombinationen ist nachfolgend für jeden Teilbereich zusammengestellt. Viele dieser Spaltkombinationen wurden im Versuch untersucht und deren Eignung zum Einsatz in FBFWD(A) ermittelt.

8.2.1.1 Konstruktion des Spalteingangs

Die optimale Gestaltung des Spalteingangs ist von großer Bedeutung für die Funktion des Gesamtsystems. Jeglicher Schmutz, der am Eindringen in das Dichtsystem durch einen funktionierenden Spalteingang gehindert wird, muss nicht wieder mühsam aus dem Dichtsystem hinausbefördert werden. Werden FBFWD(A) nachgeschmiert, so bildet sich vor dem Spalteingang des Dichtsystems häufig ein „wohlgeformter“ Fettkragen (Bild 305-H), der in vielen Fällen schon eine gute bis sehr gute Schmutzabschirmung für das Dichtsystem übernehmen kann.

Dies darf aber nicht zur Vernachlässigung der Konstruktion eines optimal gestalteten Spalteingangs führen - frei nach dem Motto: „Das Fett wird es schon richten“. Versuche bei nicht optimal gestalteten Spalteingängen haben gezeigt, dass sich der genannte Fettkragen keinesfalls immer gleich ausbildet und es somit zu einer sehr großen Streuung der eingedrungenen Schmutzmenge kommt. Spalteingänge, die ein großes Fett-Staubgemenge für deren Funktion bedürfen, sind somit nicht empfehlenswert. Darüber hinaus sollte unnötiger Fetteintrag in die Umgebung vermieden werden. Bei FBFWD(A) wird die Ausbildung eines Fettkragens durch aktive Fettrückführung aus Umweltschutzgründen und zur Vermeidung von technischen Störungen durch abgeschleuderte Fettklumpen bestmöglich reduziert.

Viel betriebssicherer sind hier Spalteingänge mit definiert gestalteter Geometrie, die am Ende des Nachschmiervorgangs sogar äußerlich von allem ausgetretenen Fett gereinigt werden können und sich darüber hinaus durch eine dauerhaft gleichbleibende ausgezeichnete Funktion hervortun.

Gängige Spalteingangsgeometrien

Nachfolgend sind gängige Spalteingangsgeometrien in Bild 305 ausgeführt. Durch ein Punktesystem wird deren Eignung für die Schmutzabschirmung am Spalteingang vergleichend bewertet. Je mehr dunkle Punkte ein Geometrievorschlagn hat, desto besser ist er geeignet.

Ein rein axialer Spalteingang, wie er in Bild A ausgeführt ist, hat keinerlei ausfördernde Wirkung. Dazu kann Schmutz aus nahezu allen Winkellagen direkt auf den axial offenen Spalteingang auftreffen und wenn dieser geöffnet ist, auch tief eindringen. Eingedrungener Schmutz wird allein durch das Fett am Durchdringen gehindert. Diese Spaltform ist insbesondere auf einen „wohlgeformten“ Fettkragen vor dem Spalteingang angewiesen.

Eingedrungene Partikel mit Korngrößen, die im Bereich der Spalthöhe liegen, können einerseits nicht vom Fett aufgenommen werden und andererseits besteht durch fehlende radiale Spaltabschnitte keine Möglichkeit diese wieder aus dem Spalt zu fördern. Bei dieser Partikelgröße kommt es durch den ständigen Kontakt mit dem Fett an der Spaltwand zum schnellen Durchmischen des Fetts im Spalt und damit zum Durchdringen von Partikeln. Diese Spalteingangsform ist ungünstig.

Wird vor dem Spalteingang eine Schleuderscheibe angebracht, ist die Abdichtwirkung erheblich besser (Bild B). In den Spalt eingedrungene Partikel werden größtenteils von der im radialen Spalteingang bei Wellendrehung wirkenden Fliehkraft erfasst und aus dem Spalt ausgefördert. Durch die axiale Nähe zur Gehäusewand bildet sich um den Spalteingang herum häufig ein dicker Fettkragen aus, der die Abschleuderwirkung der Schleuderscheibe behindern kann. Das System ist bedingt geeignet.

Bei Spaltformen mit kurzen axialen und dann radialen Abschnitten vom kleinen zum größeren Durchmesser (Bild C, Betrachtungsrichtung axial von außen nach innen) wird sämtlicher Schmutz,

der den Axialspaltabschnitt überwunden hat, bei Wellendrehung durch die wirkenden Fliehkräfte direkt ins Dichtsystem hineingefördert. Diese Spalteingangsgeometrie ist daher völlig ungeeignet. Wird die Spaltrichtung des Radialspaltes dagegen umgedreht, d. h. nach kurzem Axialspaltabschnitt folgt jetzt ein Radialspalt vom größeren zum kleineren Durchmesser (Bild D), dann kann eingedrungener Schmutz ausgefördert werden. Jedoch wird oft durch einen großen Fett-Schmutzkragen außen am Spalteingang ein optimaler Schmutzabtransport verhindert. Dazu werden anfliegende Partikel fast aller Winkellagen nicht vor dem Eindringen in den Spalteingang abgebremst. Das System ist daher nur bedingt geeignet.

In Bild E wurde der Spalteingang nach vorne verlagert. Dieser hat einen radialen Eingangsspalt. Axial zwischen Gehäusewand und Spalteingang wurde eine Fangrinne eingebracht, die je nach Verschmutzungsmedium den Spalteingang vor an der Wandung herabrieselndem oder herablaufendem Schmutz durch direkte Ableitung schützen kann. Der radial freiliegende Spalteingang kann eingedrungenen Schmutz und überschüssiges Fett direkt abschleudern. In den radialen Eingangsspalt können nur radial anfliegende Partikel direkt eindringen. Auch Partikel mit Korngrößen nahe der Spalthöhe werden durch die wirkenden Fliehkräfte direkt wieder aus dem Spalt befördert.

In Bild F ist ein sogenannter abgedeckter Spalteingang (3) gezeichnet. Alle Vorteile der Spaltform in Bild E bleiben erhalten, zusätzlich wird durch den axial zur Gehäusewand ausgeführten Spalteingang erreicht, dass jeglicher Schmutz vor dem Erreichen des Spalteingangs mindestens einmal umgelenkt werden muss. Dadurch werden die Schmutzpartikel sehr stark abgebremst und können kaum mehr in den Spalt eindringen. Der den Spalteingang überwindende Schmutzanteil kann hier im Vergleich zu Bild E nochmals ganz erheblich gemindert werden. Diese Spalteingangsgeometrie ist anzustreben.

Für eine optimale Funktion ist aber nicht nur die Spalteingangsgeometrie als solche von großer Bedeutung sondern erst zusammen mit einer auf die Funktion abgestimmten Umfeldgeometrie werden beste Ergebnisse erzielt. In Bild G wurde der Eingangsspalt aus Bild E im Gehäuse zurückversetzt. Jetzt kann ausgeförderter Schmutz nicht mehr optimal den Spalteingang verlassen, die großen Vorteile der gewählten Spalteingangsgeometrie können ihr Potential nicht nutzen.

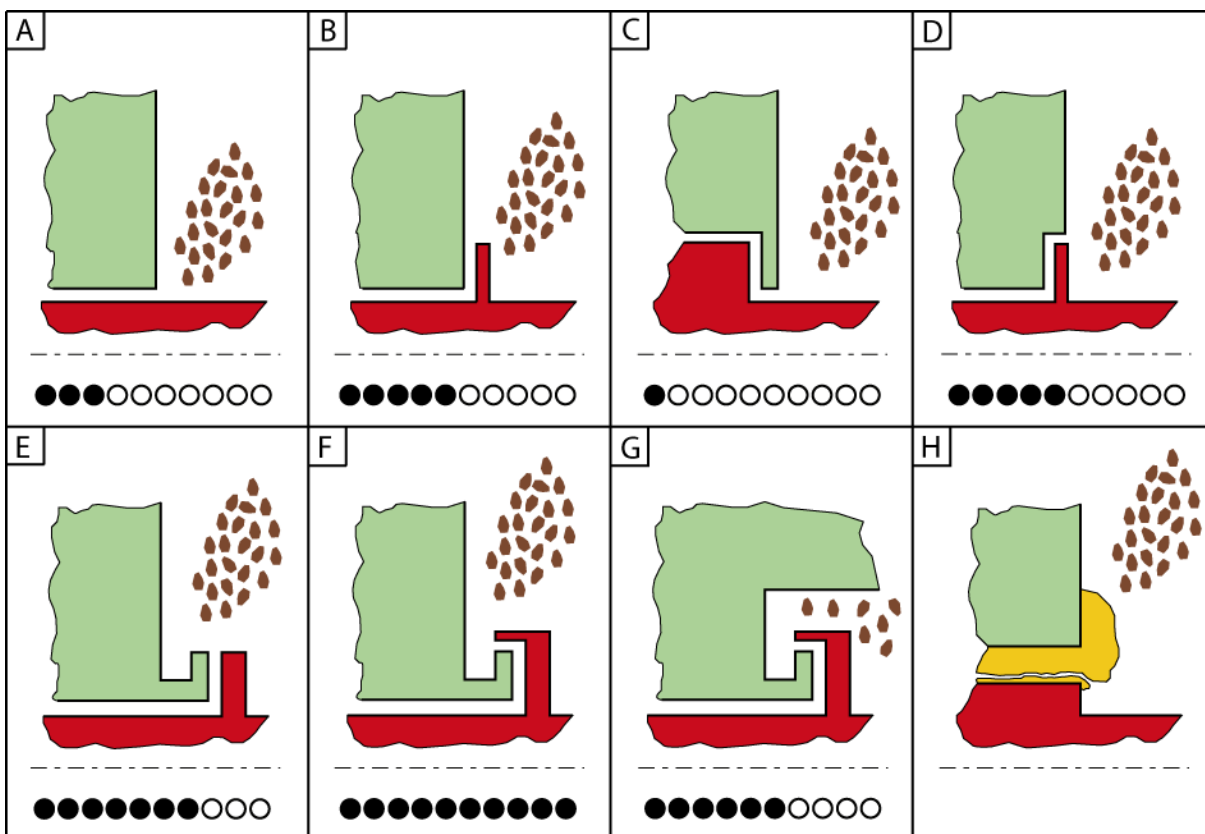


Bild 305: Spalteingangsgeometrien (je mehr dunkle Punkte umso günstiger)

Konstruktive Ausführung eines idealen Spalteingangs

Bei fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen wird für die sichere Funktion, wie eingangs beschrieben, ein geöffneter Dichtspalt benötigt. Aus diesem Grund darf die Dichtspalthöhe h nicht zu klein gewählt werden. Mit abnehmender Spalthöhe sinkt sowohl das Bestreben von Fett einen Spalt zu öffnen als auch das Schmutzaufnahmevermögen des Fetts im Dichtspalt. Als minimale Dichtspalthöhe aller Spaltabschnitte werden hier daher 0,75 mm genannt. Als maximale Spalthöhe können an dieser Stelle 2 mm empfohlen werden.

Größere Spalthöhen wurden im Rahmen der Forschungsarbeit nicht untersucht. Es hat sich dennoch bei den Versuchen gezeigt, dass bei Vergrößerung der Spalthöhen die Fettschichtdicke auf den Labyrinthwänden einfach mitgewachsen (Bild 305 H) ist. Bei überschlägigen Spalthöhenberechnungen veränderte sich die sich einstellende Luftspalthöhe zwischen den Fettschichten bei Variation der Spalthöhe zwischen 0,75 und 2 mm nur sehr wenig. Aus diesem Grund wird vermutet, dass auch größere Spalthöhen funktionieren.

Größere Spalthöhen werden einerseits oft aus Fertigungsgründen gewünscht, sind andererseits oft aus funktionalen Gründen notwendig. Hieraus resultieren Spalthöhenänderungen im Betrieb. Langsame Spalthöhenänderungen (z. B. durch thermische Dehnung) werden dabei als relativ unkritisch angesehen. Schnelle Spalthöhenänderungen (z. B. durch Taumelbewegungen) können nur schwer eingeschätzt werden. Der schnellen Bewegung wird das Fett nicht folgen können. Es kommt zu lokalen Quetschströmungen im Spalt. Das Fett wird ausgefördert und es muss mit Spalthöhen im Bereich über der Laufabweichung gerechnet werden. Durch den dann weit geöffneten Spalt und Laufungenauigkeiten kann es zu Pumpvorgängen im Dichtspalt kommen.

Untersucht wurden Dichtsysteme im Forschungsprojekt mit mittleren Durchmessern von 100 mm. Die Übertragung der Geometrieempfehlungen auf andere Durchmesser sollte vermutlich problemlos gelingen. Es müssen jedoch die in Kapitel 8.3.1 beschriebenen Empfehlungen für Mindestscherung und Drehzahl in jedem Fall eingehalten werden.

Auf Bild 306 und Tabelle 32 sind sämtliche Geometrieabmessungen für beide Spalthöhen aufgeführt. Alle Zwischengrößen können entsprechend interpoliert werden.

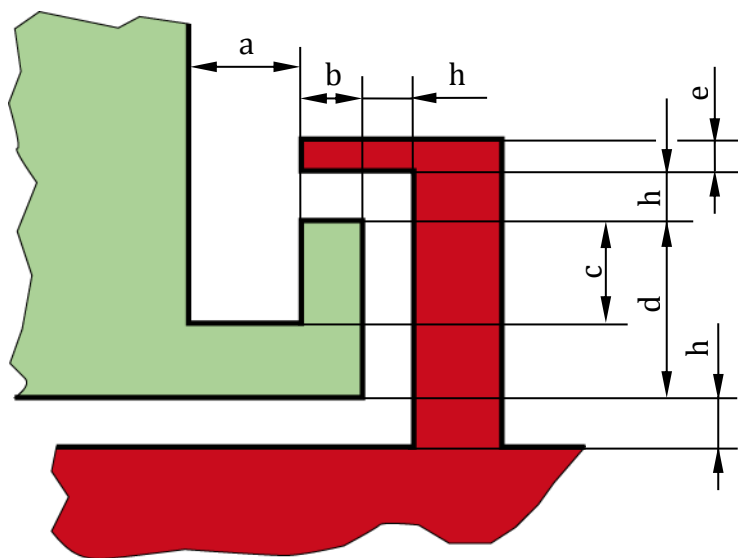


Tabelle 26: Abmessungen des Spalteingangs

Bild 306: Dimensionierung des Spalteingangs

Größe	bei h min. 0,75 mm	bei h max. 2 mm
a	4	5
b	3	3
c	3	3
d	6	6
e	2	2

8.2.1.2 Konstruktion des Hauptlabyrinths (Bild 307)

Das Hauptlabyrinth einer FBFWD(A) ist für die Feinabscheidung von Partikeln und Flüssigkeitsströpfchen zuständig. Hierfür wird ein geöffneter enger „strömungsberuhigter“ Dichtspalt benötigt. Damit ist ein axialer Spaltabschnitt gemeint, in dem nur eine Luftströmung bei Wellenrotation in Umfangsrichtung vorhanden ist und keine Zirkulationsströmung wie in Bild 304.

Das erstmalige Freifördern beim Konditionieren des Dichtspaltes und das Rückfördern von Partikel-Fettgemengen während des laufenden Betriebes erfolgt durch radiale Spaltabschnitte insbesondere nahe des Spalteingangs oder des Fetrückhaltebereichs mit Fettabflussöffnung bei FBFWDA. Dies allein reicht aber nicht aus, wie sich bei den Untersuchungen an den Innenrotor-Dichtsystemen gezeigt hat. Erstens ist die Spaltlänge bei reinen Radialspalten zu kurz und zweitens ist vermutlich die sich in diesen Spaltbereichen einstellende Luftströmung für eine Partikelabscheidung viel zu unruhig. Benötigt werden also zusätzlich längere Axialspalte ohne radiale Zirkulationsströmung für die Partikelabscheidung.

In diesen Spaltabschnitten stellt sich vermutlich eine mitrotierende Luftströmung ein. Die von der Luft getragenen Partikel erfahren Fliehkräfte und werden zur äußeren fettbedeckten Spaltwandung gedrückt, an der sie haften bleiben. Mit der Zeit wächst der Dichtspalt durch die Partikel zu. Durch kurzzeitiges Berühren der beiden Fett-Stauboberflächen von rotierendem und stillstehendem Labyrinthteil kommt es zur Erneuerung der Fettoberflächen im Labyrinthspalt, so dass diese wieder haftfähig werden und neue Partikel aufnehmen können (Kap 7.4.1.2).

Überschüssiges Fett-Staubgemisch bewegt sich nach und nach zum Spalteingang und wird nach außen abgeführt oder verlässt bei FBFWDA das Dichtsystem durch die Fettabflussöffnung. Durch geringe Fettzugaben im hinteren Ende des Hauptlabyrinths kann ein Fettaustausch im vorderen verunreinigten Teil des Hauptlabyrinths erfolgen. Der fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtung kann dadurch zu einem nahezu „ewigen“ Leben verholfen werden.

Gängige Hauptlabyrinthgeometrien

Im Folgenden sind in Bild 307 einige charakteristische Spaltverläufe für das Hauptlabyrinth aufgeführt und entsprechend bewertet. Je mehr dunkle Punkte in der Bewertung vorhanden sind, desto besser ist die Spaltgeometrie geeignet.

Auf der rechten, abgebrochenen Seite eines jeden Bildes schließt sich der Spalteingang bzw. Fetrückhaltebereich mit Fettabflussbohrung bei FBFWDA an. In Bild A wurde als Spaltgeometrie ein einfacher ansteigender Parallelspace gewählt. Hier wurden quasi beide zuvor angesprochenen Funktionsbereiche vereint. Diese Spaltform hat bei ausreichender Länge eine nur mäßige Wirkung. Bei axialer Wellenverlagerung ändert sich die Spalthöhe, eine definierte Einstellung der Spalthöhe ist nur schwer möglich. Dieser Spaltverlauf benötigt zu viel Bauraum für die verfügbare Spaltlänge. Für die Spaltform in Bild B gelten dieselben Fakten, wenngleich hier die Spaltlänge etwas günstiger ausfällt.

Die Verwendung von Radialspaltlabyrinthen wie in Bild C ist ungünstig. Bei niedrigviskosen Fetten bleiben die Fettspalte oft verschlossen und es findet keine Spaltkonditionierung statt, weil sich in den Kammern durch die wirkenden Fliehkräfte Fett-Zirkulationsströmungen ausbilden. Dadurch kommt es zur Fettdurchmischung und eingedrungener Schmutz wird im Fett durch das Labyrinth auch in die falsche Richtung transportiert. Bei anhaltender Fett-Zirkulationsströmung entsteht durch die erhebliche Fluidreibung Wärme, die im Extremfall dazu führt, dass das Fett die für die Abdichtung notwendige Fließgrenze verliert. Zudem ist diese Spaltgeometrie nur schwer montierbar (radiale oder axiale Teilung notwendig). Diese Spaltform ist ungünstig.

Mit der Spaltgeometrie in Bild D wurde versucht, durch Ausnutzung der auf das Fett einwirkenden Fliehkräfte, den Dichtspalt geschlossen zu halten, um beispielsweise gegen Druckdifferenzen abdichten zu können. Der Dichtspalt bleibt bei dieser Spaltform oberhalb einer Mindestfliehkraft auch dauerhaft geschlossen. Allerdings entsteht so ein sehr hohes Verlustmoment, das mit starkem Temperaturanstieg im Fett einhergeht.

Die benötigte Mindestfliehkraft, um den Dichtspalt geschlossen zu halten, liegt in der selben Größenordnung wie sie zum Öffnen der Dichtspalte benötigt wird (Kap. 8.3.1). Dichtspalte mit größerer Ausdehnung und niedrigviskosere Fette sind für diesen Einsatzfall besser geeignet. Bei der Abdichtung gegen Schmutz werden hier allerdings eingedrungene Partikel vom Fett weitergetragen.

Diese Spaltform sollte daher für Schmutz nicht eingesetzt werden. Allerdings ist sie die Einzige, die halbwegs luftdicht ist.

Mit der Spaltform aus Bild E kann nur ins System hineingefördert werden. Für die Schmutzabdichtung ist diese Spaltform völlig ungeeignet.

In Bild F ist die umgekehrte Anordnung dargestellt. Sie ist die Idealgeometrie für die Schmutzabdichtung. Diese Spaltform besitzt eine bestmögliche Anordnung von langen Axial- und kurzen Radialspaltbereichen. Partikel, die den Spalteingang überwunden haben, werden in den langen Axialspaltbereichen im Fett gebunden und dann gegebenenfalls wieder, wie oben beschrieben, zumindest teilweise aus dem Spalt abgeführt. Diese Spaltform zeichnet sich zudem durch gute Bau-raumausnutzung und einfache axiale Montierbarkeit aus.

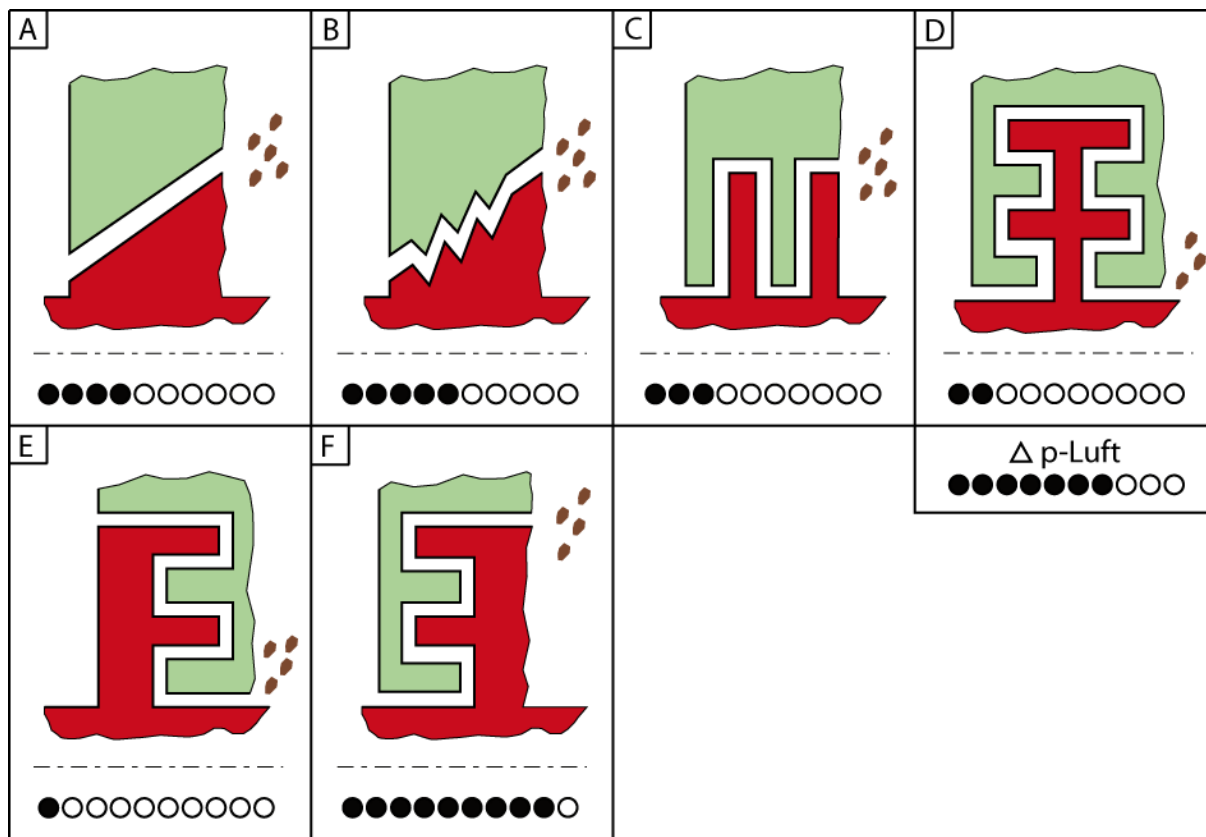


Bild 307: Hauptlabirynthgeometrien (je mehr dunkle Punkte umso günstiger)

Konstruktive Ausführung eines idealen Hauptlabirynths

Bei fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen wird für die sichere Funktion ein geöffneter Dichtspalt benötigt. Aus diesem Grund darf die Dichtspalthöhe h nicht zu klein gewählt werden. Mit abnehmender Spalthöhe sinkt sowohl das Bestreben von Fett einen Spalt zu öffnen als auch das Schmutzaufnahmevermögen des Fetts im Dichtspalt. Als minimale Dichtspalthöhe aller Spaltabschnitte werden hier daher 0,75 mm genannt. Als maximale Spalthöhe können an dieser Stelle 2 mm empfohlen werden.

Größere Spalthöhen wurden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht. Es hat sich jedoch bei den Versuchen gezeigt, dass bei Vergrößerung der Spalthöhen die Fettschichtdicke auf den Labirynthwänden einfach mitgewachsen ist. Bei überschlägigen Spalthöhenberechnungen veränderte sich die sich einstellende Luftspalthöhe zwischen den Fettschichten bei Variation der Spalthöhe zwischen 0,75 und 2 mm nur sehr wenig. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass auch größere Spalthöhen funktionieren bis die Fettschicht irgendwann instabil wird.

Größere Spalthöhen werden einerseits oft aus Fertigungsgründen gewünscht, oder sind andererseits oft aus funktionalen Gründen notwendig. Hieraus resultieren Spalthöhenänderungen im Betrieb. Langsame Spalthöhenänderungen (z. B. durch thermische Dehnung) werden dabei als relativ unkritisch angesehen. Schnelle Spalthöhenänderungen (z. B. durch Taumelbewegungen) können

nur schwer eingeschätzt werden. Der schnellen Bewegung wird das Fett nicht folgen können. Es kommt zu lokalen Quetschströmungen im Spalt. Das Fett wird ausgefördert und es muss mit Spalthöhen im Bereich über der Laufabweichung gerechnet werden. Durch den dann weit geöffneten Spalt und Laufungenauigkeiten kann es zu Pumpvorgängen im Dichtspalt kommen.

Untersucht wurden Dichtsysteme mit mittleren Durchmessern von 100 mm. Die Übertragung der Geometrieempfehlungen auf andere Durchmesser sollte problemlos gelingen. Es müssen jedoch die in Kapitel 8.3.1 beschriebenen Empfehlungen für Mindestscherung und Drehzahl in jedem Fall eingehalten werden.

Für die bereits bei der Konstruktion des Spalteingangs empfohlenen Spalthöhen sind nachfolgend alle maßgeblichen Abmessungen in Bild 308 und in Tabelle 27 aufgeführt.

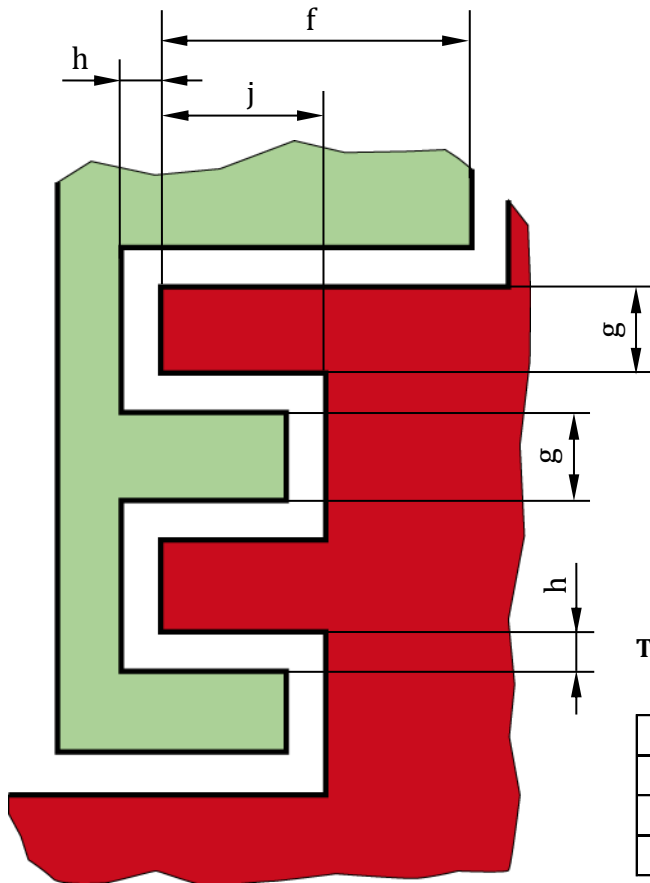


Tabelle 27: Abmessungen des Hauptlabirints

Größe	bei h min. 0,75 mm	bei h max. 2 mm
f	11	22
g	2	6
j	4,25	12

Bild 308: Dimensionierung des Hauptlabirints

8.2.1.3 Konstruktion des Fettrückhaltebereiches mit Fettabflussöffnung (nur bei FBFWDA)

Der Fettrückhaltebereich soll Fett am Ausfließen aus dem Dichtspalteingang hindern und Altfett oder für die sichere Dichtfunktion überschüssiges Fett gezielt zur Fettabflussöffnung fördern, damit es im Altfett Auffangbehälter aufgefangen und fachgerecht entsorgt werden kann. In der Literatur ist hierüber nichts zu finden.

Mögliche Fettrückhaltegeometrien

Aus den Versuchen haben sich mehrere Spaltgeometrien mit einer klaren Fettfördertendenz herauskristallisiert. Drei untersuchte Spaltgeometrien sind in Bild 309 abgebildet. Auf der linken Seite schließt sich jeweils das Hauptlabirint an. Rechts neben dem Fettrückhaltebereich befindet sich idealerweise der abgedeckte Dichtspalteingang. Bild A zeigt einen Rückhaltebereich mit mehreren gestuften Axialspalten. Diese Anordnung funktioniert im Prinzip, beherbergt durch die langen

Axialspaltbereiche sehr viel Fett und kann auch sehr viel Schmutz aufnehmen. Dies ist nachteilig und kann zu einem langwierigen Spaltkonditionierungsvorgang nach einem Nachschmiervorgang führen. Außerdem wird für diese Spaltform sehr viel Bauraum benötigt. Bild B zeigt einen reinen Radialspalt. Dies ist die kleinste bekannte förderaktive Spaltform, jedoch ist die Funktion nicht optimal. Die statorseitige Strömung wird häufig nicht vom rotorseitigen Teil der Zirkulationsströmung im Dichtspalt erfasst, obwohl der Spalt direkt in Fliehkräfte richtung weist. In Kapitel 7.2.3 wird dieser Sachverhalt genau erklärt.

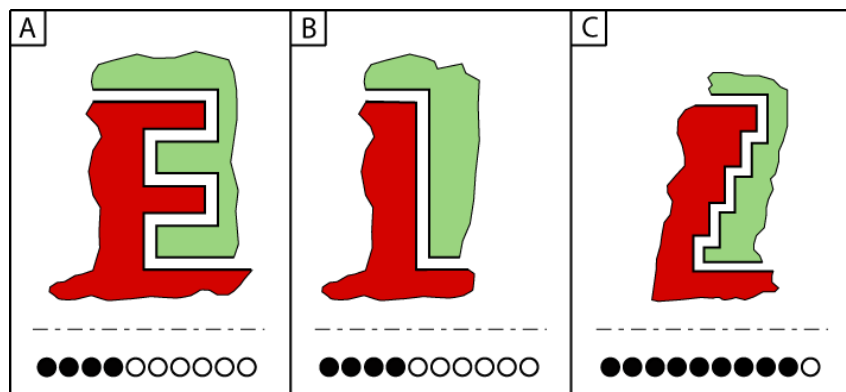
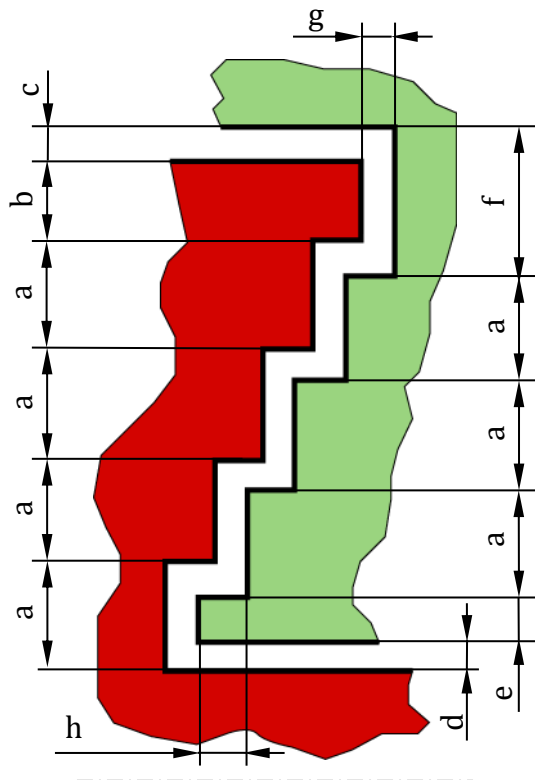


Bild 309: mögliche Fettrückhaltegeometrien (je mehr dunkle Punkte umso günstiger)

Die Spaltgeometrie in Bild C ist die Kombination beider zuvor vorgestellten Spaltgeometrien. Der förderaktive Spalt ist relativ kurz und kann damit wenig Fett und Schmutz beherbergen. Die gestufte Geometrie sorgt dafür, dass Rotor- und Statorströmung mehrfach aufeinandertreffen und eine Fördertendenz radial nach außen in damit ins Dichtsystem hinein zur Fettabflussöffnung entsteht.

Konstruktive Ausführung des Fettrückhaltebereiches und der Fettabflussöffnung



Die konstruktive Ausführung wurde an einem Dichtsystem mit 130 mm Außendurchmesser und einer Dichtspalthöhe von 2 mm im Hauptlabyrinth erprobt. Aus diesem Grund lehnen sich auch die Dichtspalthöhen des Fettrückhaltebereiches an diese Grundspalthöhe an. Die genauen Abmessungen sind Bild 310 und Tabelle 28 zu entnehmen. Es ist davon auszugehen, dass auch andere Dichtspalthöhen funktionieren. Insbesondere bei einer Vergrößerung der Spalthöhe muss die axiale Stufenhöhe h angepasst werden. Nur so ist sichergestellt, dass die stator- und rotorseitigen Wandströmungen auch aufeinandertreffen.

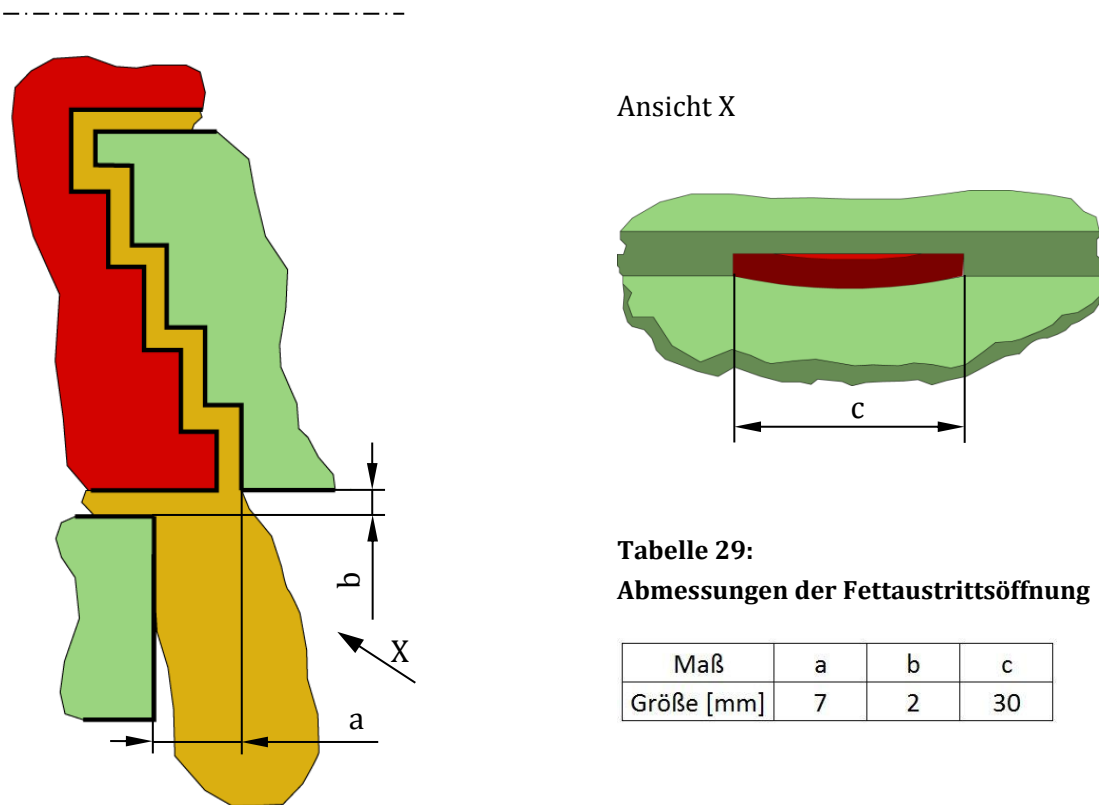
Tabelle 28: Abmessungen des Fettrückhaltebereiches

Maß	a	b	c	d	e	f	g	h
Größe [mm]	6,5	5	2	2	3	9	2	3

Bild 310: Dimensionierung des Fettrückhaltebereiches

Die Fettabflussöffnung muss unten an der Dichtung angeordnet sein. Optimal ist die Stelle wo das Fett die größte Scherung erfährt. Dies ist in der Regel im Bereich des größten Durchmessers am

Übergang von Hauptlabyrinth zum Fettrückhaltebereich. Das Fett kann so bei geringster Viskosität der Schwerkraft folgend das Dichtsystem verlassen und in den Altfett Auffangbehälter fließen. Die Fetteinleitung zur Nachschmierung erfolgt entweder am Umfang axial (z. B. vom Lager) oder gegenüber der Fettabflussöffnung am Außendurchmesser. Damit das Fett auch in den Altfett Auffangbehälter an der äußeren Dichtungswand abgleiten kann - hier ist die Scherung im Fett minimal und nur die Schwerkraft wirkt, muss die Öffnung groß genug und die „Fetrutsche“ möglichst steil gestaltet werden. Die in Bild 311 und Tabelle 29 aufgeführten Maße für die Fettabflussöffnung sollten nicht wesentlich unterschritten werden.



Ansicht X

Tabelle 29:
Abmessungen der Fettaustrittsöffnung

Maß	a	b	c
Größe [mm]	7	2	30

Bild 311: Dimensionierung der Fettaustrittsöffnung

Weitere Konstruktionsbeispiele:

Die Gesamtansicht von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen mit Fettabfluss (FBFWDA) sind in Bild 312 und Bild 313 dargestellt. In Bild 313 wurde eine FBFWDA für eine erhöhte Schutzwirkung mit einem berührenden Dichtelement z. B. mit einem V-Ring kombiniert. Auf die Kombination von FBFWD mit Berührenden Dichtelementen wird in Kapitel 8.2.2 ausführlich eingegangen.

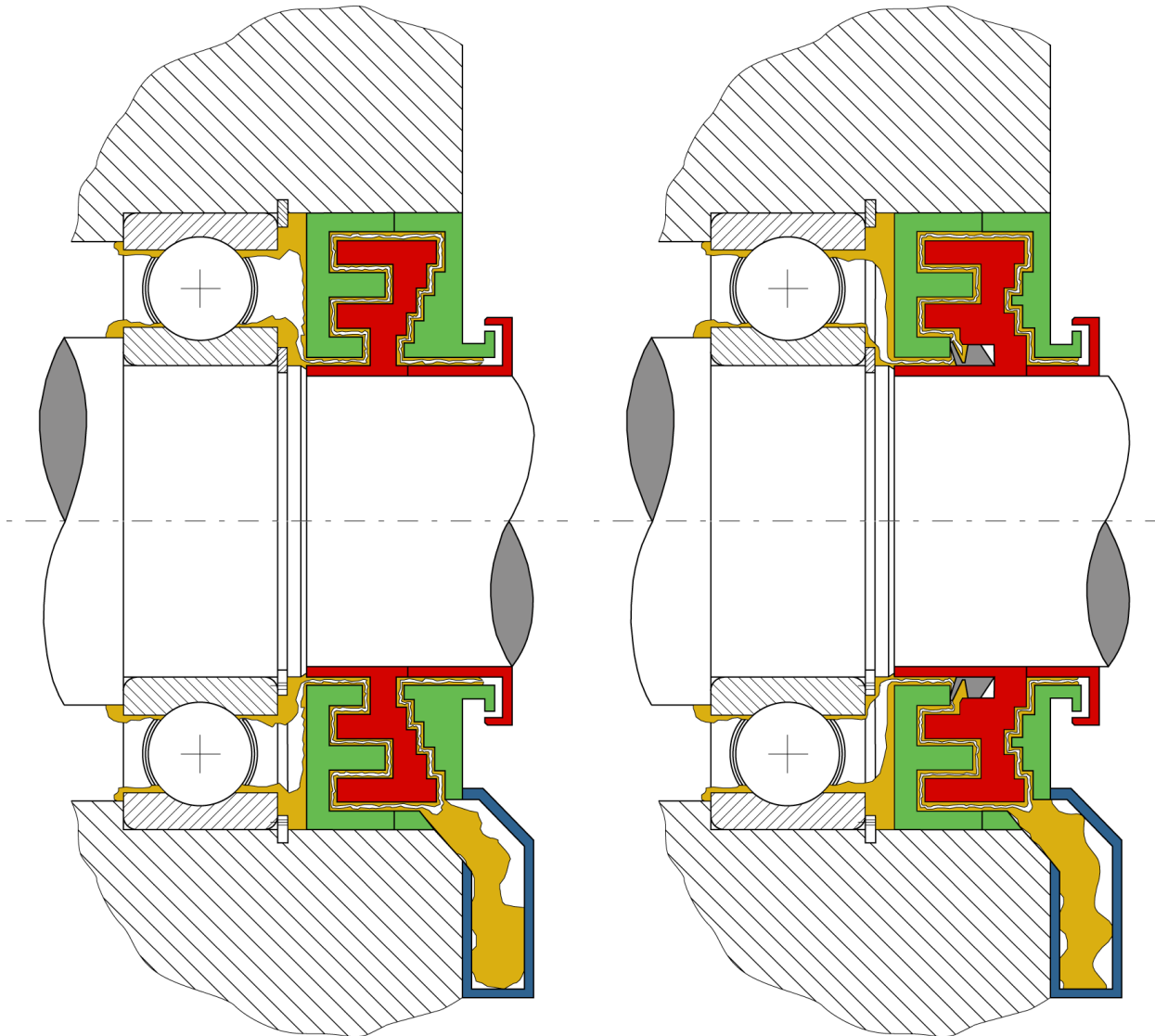


Bild 312: Beispiel 1 - FBFWDA

Bild 313: Beispiel 2 - FBFWDA mit V-Ring

8.2.2 Dichtelemente für erschwerten Einsatz

In manchen Einsatzfällen stellen Luft-Druckunterschiede zwischen Umgebung und dem Innenteil von Maschinen die Entwickler bei der Dichtungsauslegung immer wieder neu vor große Herausforderungen. Ganz besonders dann, wenn berührungsfreie Wellendichtungen eingesetzt werden sollen.

Solche dauerhaft anliegenden Druckunterschiede werden häufig durch an der Maschine angebrachte Ventilatoren für die Kühlung, durch Winddruck bei freistehenden Großmaschinen oder durch den Fahrtwind bei Fahrzeugen verursacht. Bei berührungsfreien Wellendichtungen ist ein großer Luftzug durch die Dichtung meist unerwünscht, weil so Partikel und kleinste Tröpfchen mitgetragen werden können. In manchen Fällen kann konstruktiv die Sache gelöst werden, indem beispielsweise die Förderrichtung von Ventilatoren umgedreht oder Luftbypässe aus anderen Bereichen mit höherem Druck geschaffen werden können. Auch eine günstige Anordnung von Bauteilen mit luftförderwirksamen Durchmessern kann die unerwünschte Luftströmung – bei der Schmutzabdichtung von außen nach innen – positiv beeinflussen.

Manchmal hilft aber nur der Einsatz von sogenannten kombinierten Dichtungen. Diese haben ein berührendes Element, das den Luftzug durch das System oder auch den Fettrückfluss beim Nachschmiervorgang verhindert und ein vorgeschaltetes Fettgefülltes Berührungsfreies Wellendichtsystem. Die vorgeschaltete FBFWD hält abrasiv wirkende Partikel von der berührenden Dichtung fern. Auf Bild 314 und Bild 315 ist jeweils ein kombiniertes Dichtsystem dargestellt.

Als berührende Elemente wurden hier ein V-Ring und ein Radialwellenring eingesetzt. Beide Dichtelemente sind so eingebaut, dass sie „durchgeschmiert“ werden können. Die jeweilige Dichtlippe weicht beim Nachschmieren eines Lagers (links der Dichtung angeordnet) zurück und gibt den Weg für das Fett in die FBFWD frei. Optional kann hier auch durch zusätzliche Kanäle Fett in den Raum direkt vor der berührenden Dichtung eingebracht werden (Bild 314 und Bild 315).

Bei niederen Drücken (bis wenige mbar Umgebungsüberdruck) hat der V-Ring ein etwas kleineres Reibmoment als der Radialwellendichtring. Zudem nimmt die Kontaktpressung bei hohen Wellendrehzahlen ab, was die Reibung weiter reduziert. Erst bei Drücken von über 100 mbar ist der RWDR beim Reibmoment günstiger als der V-Ring.

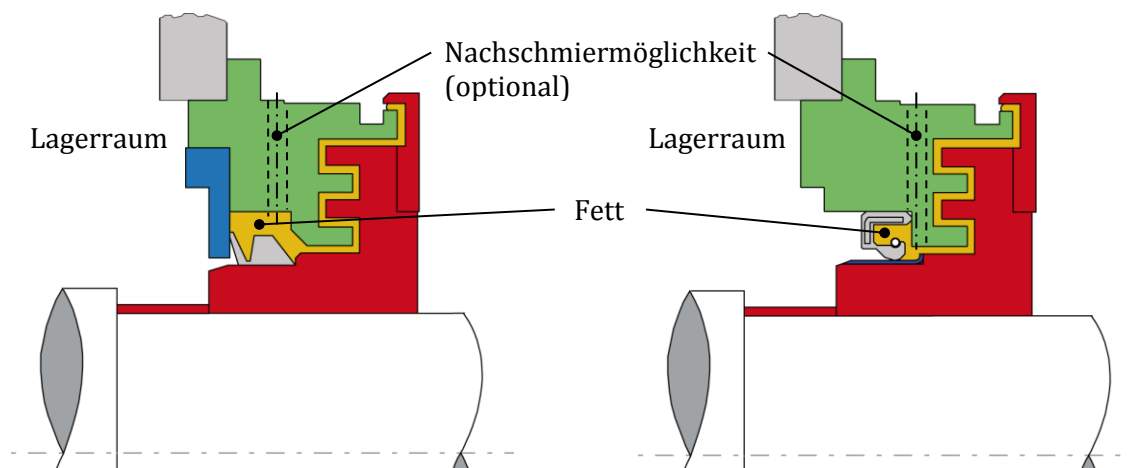


Bild 314: Komb. Dichtsystem mit V-Ring (22)

Bild 315: Komb. Dichtsystem mit RWDR (22)

V-Ring und RWDR sind nur Beispiele. Jedes andere berührende Element wäre möglich. Hier könnte auch ein RWDR mit reduzierter Radialkraft (z. B. ohne Feder) und damit geringerer Reibung eingesetzt werden, da er ja nicht flüssigkeitsdicht sein muss.

Auch selbsteinschleifende Elemente sind möglich, die nach und nach durch Verschleiß einen Engspalt bilden und nahezu reibungsfrei laufen.

8.2.3 Dichtkonzepte für die Abdichtung zweier unterschiedlicher Fluide

In machen Anwendungen müssen zwei unterschiedliche Fluide gegeneinander abgedichtet werden. Handelt es sich hierbei um Flüssigkeiten bei gängigen Umfangsgeschwindigkeiten, so werden von der Dichtungsindustrie eine Vielzahl berührender Dichtelemente angeboten.

Liegt dagegen einseitig abrasiver Schmutz an, sind auf dieser Seite berührende Dichtelemente aufgrund des sehr hohen zu erwartenden Dichtungsverschleißes ungeeignet. In diesem Fall kann für die Abdichtung gegen Schmutz eine zuvor beschriebene kombinierte Dichtung eingesetzt werden.

Die fettgefüllte berührungsfreie Wellendichtung mit günstigem Spalteingang übernimmt in diesem Fall die Abdichtung gegen den Schmutz. Das berührende Dichtelement bildet dabei die hintere Grenze der FBFWD und sorgt dafür, dass kein unerwünschtes Fett weiter nach innen ins System eindringen kann. In diesem Fall erfolgt die Nachschmierung der FBFWD nicht vom Lager unter der Dichtlippe des berührenden Dichtelements hindurch, sondern das Frischfett wird direkt durch einen Kanal in den Raum vor das berührende Dichtelement eingebracht wie in Bild 316 dargestellt.

Liegt auf der anderen Seite des Dichtsystems eine Flüssigkeit an, und herrschen zwischen Welle und Gehäuse mäßige Relativgeschwindigkeiten, so kann auf dieser Seite mit einem Radialwellendichtring abgedichtet werden (Bild 316 Ausschnitt A). Der Raum zwischen beiden berührenden Dichtelementen ist aber in diesem Fall unbedingt zu belüften.

Sind die Relativgeschwindigkeiten für berührende Dichtelemente zu groß, so müssen durchweg berührungsfreie Dichtelemente eingesetzt werden. Ein solches Dichtkonzept ist in Bild 316 dargestellt. Von rechts soll hier gegen abrasiven Schmutz abgedichtet werden. Auf der linken Seite steht das für die Lagerschmierung benötigte Öl an. Durch ein zweistufiges Fangkammerdichtsystem wird gegen das Öl abgedichtet.

Die Auslegung dieses Dichtsystems kann mit Hilfe des am Institut für Maschinenelemente erhältlichen Konstruktionskataloges für die „Berührungsfreie Spindelabdichtung im Werkzeugmaschinenbau“ (3) erfolgen. Nach außen zur Seite mit Schmutzbeaufschlagung kommt ein kombiniertes Dichtsystem zum Einsatz. Als berührendes Element im kombinierten Dichtsystem wird hier beispielhaft ein V-Ring eingesetzt. Der V-Ring wird benötigt, um einen Übertritt von Fett beim Nachschmiervorgang vom fettgefüllten BFWD zum Fangkammerdichtsystem zu vermeiden. Durch die in der Dichtlippe des V-Rings wirkenden Fliehkräfte nimmt dessen Kontaktspannung mit steigender Wellendrehzahl ab. Bei sehr hohen Drehzahlen hebt seine Dichtlippe ganz ab und er läuft ebenfalls berührungsfrei. Um ein Wandern des V-Rings auf der Welle zu verhindern muss dieser bei sehr hohen Drehzahlen gegebenenfalls gekammert eingebaut werden.

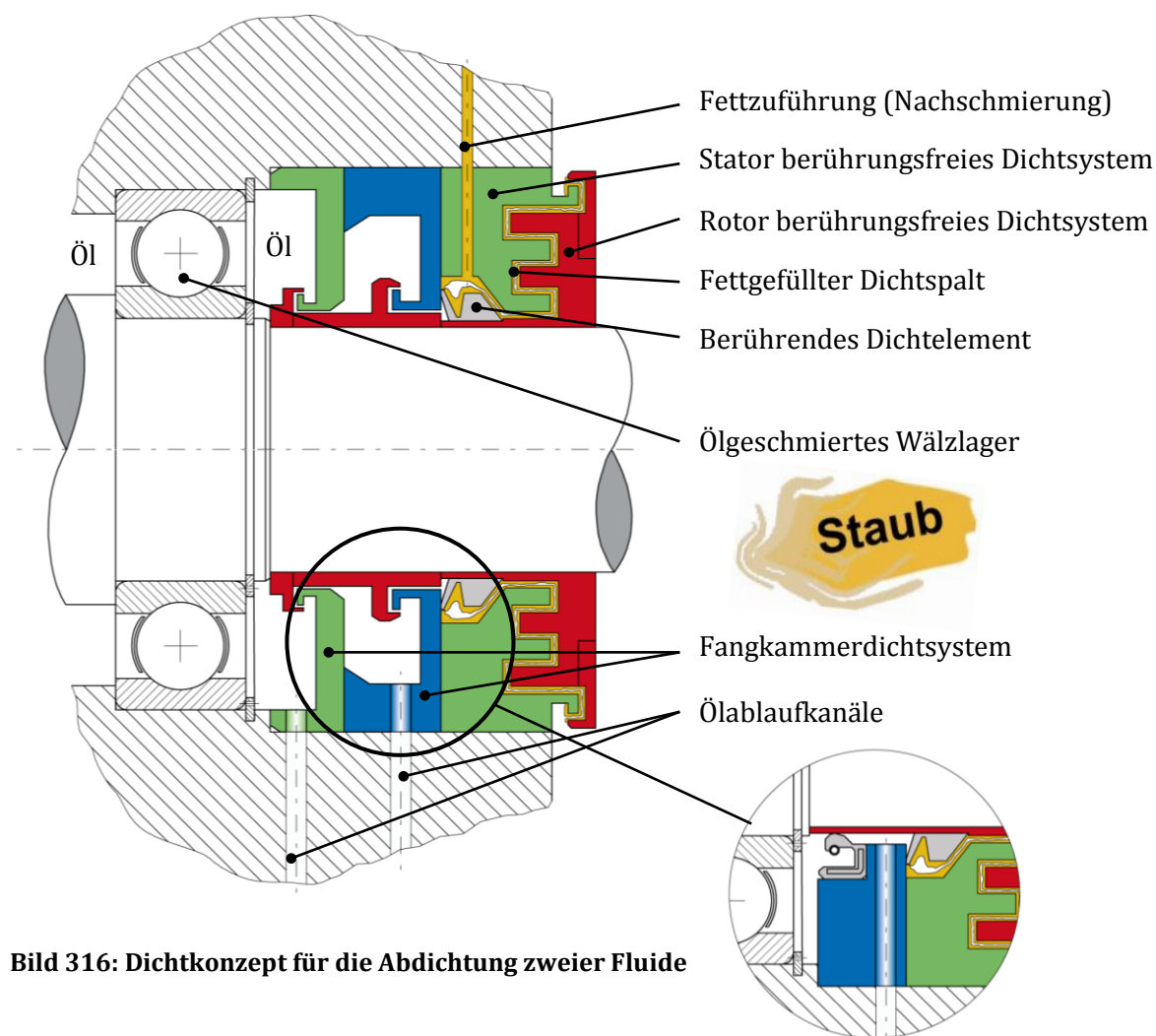


Bild 316: Dichtkonzept für die Abdichtung zweier Fluide

Bild 316 Ausschnitt A

8.2.4 Oberflächengüte der Dichtungsbauteile

Oberflächengüte der außenliegenden Teile:

Bei Oberflächen im Dichtungsumfeld (Fangrinne, Gehäuse und Schleuderscheibe) genügt einfache Drehbearbeitung.

Oberflächengüte der Dichtspaltbildenden Teile:

Aus dichtungstechnischer Sicht genügt es die Oberflächen mit kleinem Vorschub fein zu drehen.

Oberflächen der Gegenaufläachen berührender Dichtelemente bei kombinierten Dichtungen:

Hier sind die Angaben der jeweiligen Dichtungshersteller (21) zu beachten. Als Richtwerte wurden bei den Herstellern folgende Anforderungen an die Gegenaufläachen gefunden.

RWDR: Die Gegenaufläache sollte gehärtet und drallfrei im Einstich geschliffen sein. Die Oberflächengüte wird von den Herstellern im Bereich von Ra 0,2 ... 0,8 μm empfohlen.

V-Ring: Die Gegenaufläache kann weich und durch Feindreihen hergestellt sein. Bei stark abrasiven Partikeln wird eine harte Oberfläche empfohlen. Die Oberflächengüte sollte laut den Herstellern im Bereich von Ra 0,4 ... 2,5 μm (je nach Gleitgeschwindigkeit) liegen.

8.3 Der sichere Betrieb von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen

Im Versuch hat sich gezeigt, dass sich Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtsysteme durch eine gleichbleibend sehr gute Dichtwirkung auszeichnen, wenn einige erforderliche Betriebsparameter eingehalten werden. Diese sind nachfolgend beschrieben.

8.3.1 Drehzahlspektrum von FBFWD

Bei Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen ist ein fettgefüllter aber dennoch geöffneter Dichtspalt für die sichere Funktion erforderlich. Um einen Dichtspalt bei der Inbetriebnahme oder im Anschluss eines Nachschmiervorganges konditionieren zu können und um diese Spaltzustände im Betrieb bei Schmutzbeaufschlagung beizubehalten, ist eine Mindestgleitgeschwindigkeit und eine Mindestfliehkraft erforderlich. Sie wurde aus den Versuchsergebnissen abgeleitet.

Diese Mindestparameter können kurzzeitig (einige wenige Sekunden) unterschritten werden, dann muss aber für den Partikelrücktransport der Betrieb für gewisse Zeit deutlich über den Mindestparametern erfolgen. Bei diesen Mindestanforderungen handelt es sich um Anhaltswerte, die von weiteren Betriebsparametern wie Fett, Temperatur, Verschmutzung und Spalthöhe abhängen und im Einzelfall zu überprüfen sind. Die Fliehkraft wurde zur Vergleichbarkeit auf die Masse $m = 1 \text{ kg}$ normiert. In Tabelle 30 sind für beide Spalthöhen die entsprechenden Mindestanforderungen für den gemittelten Dichtungsdurchmesser des berührungsfreien Wellendichtsystems angegeben.

Die mittlere Gleitgeschwindigkeit v berechnet sich nach folgender Formel:

$$v = \frac{\pi \cdot d_m \cdot n}{60} \text{ [m/s]} \quad \text{mit} \quad d_m = \frac{1}{2} (d_i + d_a) \text{ [m]}$$

d_i [m]: Innendurchmesser Hauptlabyrinth
 d_a [m]: Außendurchmesser Hauptlabyrinth
 n [min^{-1}]: Drehzahl

Die Fliehkraft F_F berechnet sich nach folgender Formel:

$$F_F = \frac{2 \cdot m \cdot v^2}{d_m} \text{ [N]}$$

Tabelle 30: Abmessungen des Hauptlabyrinths

Größe	bei h min. 0,75 mm	bei h max. 2 mm	Einheit
Mindestgleitgeschwindigkeit	1,8	1,5	m/s
Mindestfliehkraft	60	45	kg m/s ²

Eine Gleitgeschwindigkeitsobergrenze ist derzeit nicht bekannt. Untersucht wurde bis zu einer mittleren Gleitgeschwindigkeit von 15 m/s.

8.3.2 Abdichtbare Medien

Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen sind für die Abdichtung gegen sämtliche Medien geeignet, die das für die Dichtung eingesetzte Fett in seinen physikalischen Eigenschaften nicht negativ verändern. Als negative physikalische Veränderungen sind beispielsweise Lösungs- oder Verdünnungsvorgänge zu nennen. Das Fett wird in diesem Fall aus dem Spalt ausgewaschen oder verliert seine Fließgrenze und ein optimal konditionierter Dichtspalt ist somit nicht mehr vorhanden. Die Konsistenz dieser Medien kann dabei körnig, pulvrig oder schlammig sein. Auch gegen eine leichte Bespritzung oder Flüssigkeitsbestäubung kann mit Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsystemen abgedichtet werden. Allerdings muss in jedem Fall eine Dichtspaltüberflutung vermieden werden. Für die Abdichtung gegen die Anspritzung mit scharfen Flüssigkeitsstrahlen und größere Flüssigkeitsmengen sind FBFWD ungeeignet. In diesem Fall können Fangkammerdichtsysteme eingesetzt werden.

8.3.3 Abdichtbare Druckdifferenz

Die Abdichtung bei Druckdifferenzen (Luft-/ Gasdruck) ist allein mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen nicht möglich (Ausnahme Bild 307-D). Soll gegen geringe Druckdifferenzen (bis 0,5 bar) abgedichtet werden, können kombinierte Dichtsysteme (Kap. 5.1.3) zum Einsatz kommen.

8.3.4 Für die Abdichtung geeignete Fette

Für die Abdichtung sind prinzipiell alle gängigen Wälzlagerfette, die eine Fließgrenze bei allen Betriebszuständen aufweisen, geeignet. Die geforderte Fließgrenze ist eine wesentliche Voraussetzung für optimale Dichtspaltzustände. Generell sind höherviskose Fette (z. B. NLGI 2) besser geeignet, da hier der Dichtspalt leichter geöffnet werden kann. Bei extrem steifen Fetten oder bei sehr niederen Betriebstemperaturen ist zu prüfen, ob das Haftvermögen der Fettoberfläche für eine Partikelabscheidung ausreicht.

8.4 Wartung von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen

Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen müssen in gewissen Intervallen mit neuem Fett versorgt werden. Dadurch werden die Dichtspaltzustände erneuert. Abgesehen von diesen Pflegemaßnahmen halten FBFWD nahezu ewig. Die Nachschmierintervalle sind von den Betriebsparametern, wie Gleitgeschwindigkeit, Fliehkraft, Verschmutzungsmedium und -menge abhängig und können daher nicht pauschal angegeben werden. Sie sind durch Versuche zu ermitteln! In vielen Fällen sind aber das Schmierintervall und die Schmiermenge für nachgeschaltete Wälzlager ausreichend, um die Dichtspaltzustände günstig zu halten.

Empfehlungen für den Nachschmiervorgang abgeleitet aus den Dichtungsversuchen:

Während des Nachschmiervorgangs sollte sich die Welle langsam drehen. Hier sind Gleitgeschwindigkeiten im mittleren Dichtspaltdurchmesser von 0,05 m/s gut geeignet. Das Frischfett sollte mit einem kontinuierlichen Volumenstrom nicht diskontinuierlich in das Dichtsystem eingebracht werden. Hierdurch werden eine gleichmäßige Befüllung des Dichtspaltes und eine gute Verdrängung des Altfetts erreicht. Die richtige Nachschmiermenge ist dann erreicht, sobald sich am Dichtspalteingang ein Fettkragen aus wenig verunreinigtem Fett gebildet hat.

Bei der Nachschmierung mit Zentralschmieranlagen während des Betriebs wird dieser Zustand am Spalteingang durch die erheblich geringere Menge trotz kürzerer Schmierintervalle in der Regel nicht erreicht (diskontinuierliche Schmierung). Hier ist darauf zu achten, dass die Konsistenz des austretenden Fettes noch fettähnliche Zustände aufweist (von Hand verstreichbar und anhaftend).

Beim Nachschmieren durch einen explizit ausgeführten Nachschmiervorgang mit größeren Fettzugaben muss bei kombinierten Dichtungen darauf geachtet werden, dass das berührende Dichtelement nicht durch hohe Fettdrücke Schaden nimmt. Daraus folgt: Fett nicht schnell sondern langsam Nachfüllen.

Nach dem eigentlichen Nachschmiervorgang sollte dann das System bei Betriebsparametern, die deutlich über den Mindestanforderungen liegen, für die Spaltkonditionierung betrieben werden.

Das Altfett und überschüssiges Fett ist dann bereits ausgetreten und kann ordnungsgemäß entsorgt werden.

Bei der Erstbefüllung von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsystemen ist darauf zu achten, dass sich auf den Oberflächen der Neuteile keine Korrosionsschutz- und Fertigungsmittelrückstände befinden, die das Haftvermögen des eingesetzten Fettes im Dichtspalt derart herabsetzen, dass sich der Spalt nach Inbetriebnahme nicht konditionieren kann, sondern weitgehend leergefördert wird.

8.5 Zusammenfassung der Konstruktionshinweise

In Bild 317 sind die wichtigsten Konstruktionsanforderungen zusammengefasst. Hier ist im oberen Teil eine rein Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtung ausgeführt, die durch das Lager nachgeschmiert wird.

Der untere Teil zeigt ein kombiniertes Dichtsystem. Dieses kann ebenfalls durch das Lager nachgeschmiert werden. Die V-Ring-Lippe hebt dabei solange ab. Alternativ kann durch einen Nachschmierkanal nachgeschmiert werden. Dabei wird die V-Ring-Lippe stark angepresst und verhindert, dass Dichtfett ins Lager gelangt. Damit können zwei unterschiedliche Fette für Lager (nicht nachschmieren) und Dichtung mit jeweils angepassten Eigenschaften verwendet werden. Zusätzlich kann optional bei beiden Dichtsystemen noch ein Fettrückhaltebereich mit Altfettsammelbox integriert werden. Beispiele: Bild 312 und Bild 313.

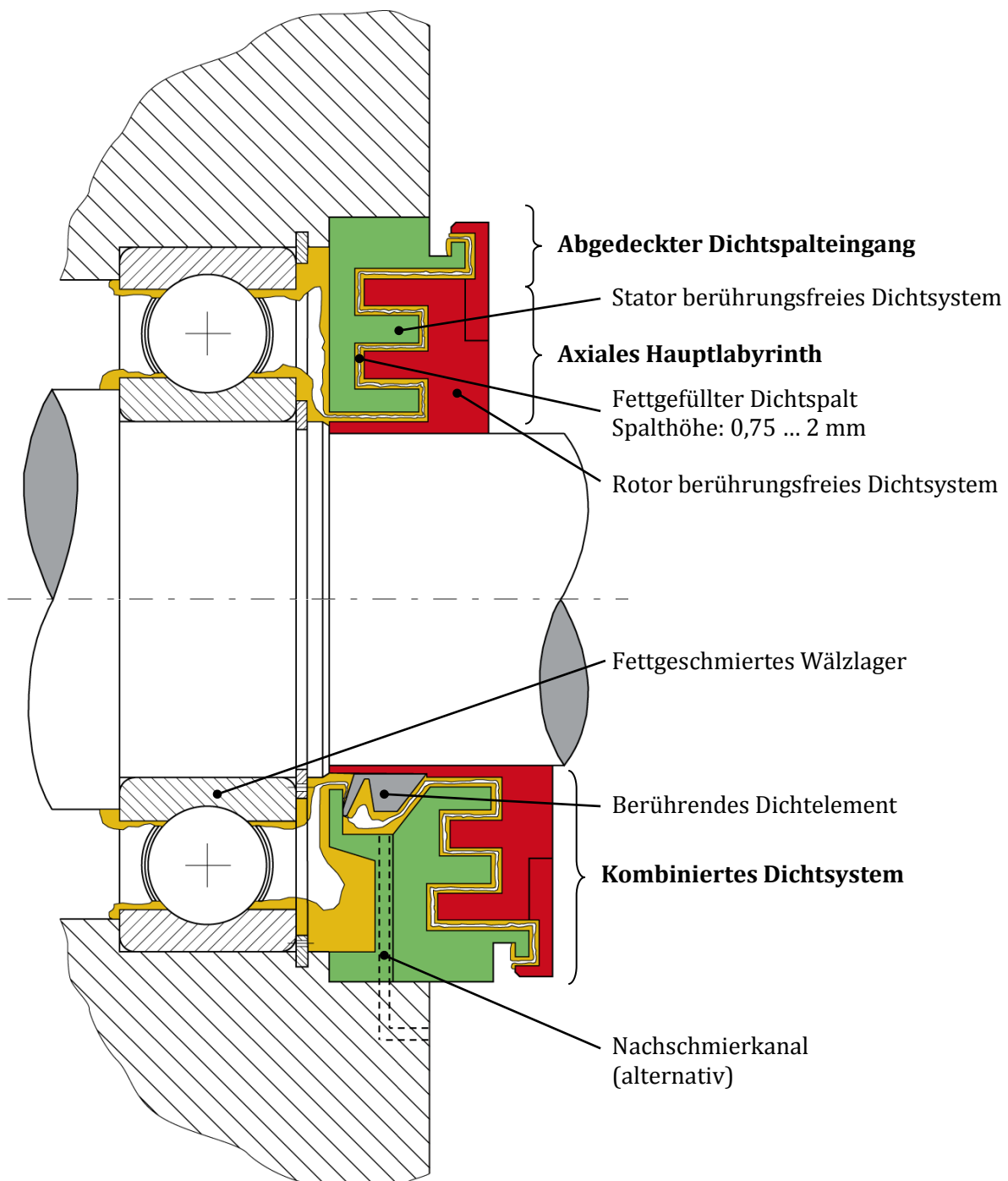


Bild 317: Die „ideale“ Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtung

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die für die Abdichtung gegen Schmutzbeaufschlagung relevanten Vorgänge in den Spalten von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen untersucht.

Ausgehend vom Stand der Technik wurden Standard-Dichtspaltgeometrien ausgewählt und mehrere Dichtsystembaukästen entworfen, die die systematische Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Fette in diesen Standard-Dichtspaltgeometrien ermöglichten. Es wurden Radialspalt-Dichtsysteme untersucht, bei denen die radiale Spaltlänge, die axiale Spalthöhe und die Lamellenanzahl variiert wurden. Gemessen wurde neben der Versuchsdrehzahl vor allem das sich über der Versuchszeit einstellende Reibmoment des Fetts in den Dichtspalten. Das Reibmoment diente als Indikator für den Spaltzustand: Ist dieser vollständig geschlossen oder öffnet sich dieser während der Versuchszeit? Je nach Fett und Dichtspalthöhe konnte ein sehr differenziertes Verhalten festgestellt werden. Grob kann gesagt werden, dass niederviskose Fette, viele nacheinander geschaltete Lamellen und eine kleine axiale Dichtspalthöhe die Fettverweildauer im Dichtspalt vergrößern. Bei den Untersuchungen an Axialspalt-Dichtsystemen wurden die Dichtspalthöhe, die axiale Spaltlänge und die Dichtspaltausrichtung, also die Durchmesseränderung des Dichtspaltes z. B. von „innen“ nach „außen“ zum größeren Durchmesser, variiert. Die Tendenz, dass sich bei höherviskosen Fetten der Dichtspalt schneller öffnet, konnte auch hier festgestellt werden. Aber viel bemerkenswerter war die Tatsache, dass durch die Dichtspaltausrichtung erstmals eine klare Fördertendenz erkennbar war und damit auch Dichtspaltzustände - offen oder geschlossen - grob eingestellt werden konnten. Diese Erkenntnis war für den weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten sehr wichtig.

Der Sachverhalt, dass sich bei Radialspalt-Dichtsystemen, die ähnlich wie Zentrifugalwellendichtsysteme aufgebaut sind, der Dichtspalt öffnete und ein erheblicher Anteil des eingebrachten Fetts das Dichtsystem am Innendurchmesser gegen die Fliehkraftwirkung verlassen hatte, machte weitere Untersuchungen zum Strömungsverhalten von Fetten in Radialspalten notwendig. An durchsichtigen Radialspalt-Dichtsystemen aus Plexiglas wurde an unterschiedlichen Fetten durch das Einspritzen von gefärbtem Fett die Strömung im Spalt beobachtet, gefilmt und im Nachgang strömungstechnisch analysiert. Entscheidend für das an den Tag gelegte Verhalten ist die von der Scherung des Fetts abhängige scheinbare dynamische Viskosität. Kommt es zu Schwachstellen im Fett, dies können z. B. kleine Luftblasen sein, welche an Phasengrenzen am Spalteingang immer vorhanden sind, so wird das Fett lokal stärker gesichert. Die Viskosität sinkt in diesem Bereich stark ab und es wird Luft anstatt Fett, das zurückgefördert werden sollte, ins Dichtsystem eingesaugt. Die Luft verdrängt dann weiteres Fett aus dem Dichtspalt. Bei niederviskosem Fett wird diese Ausfördertendenz geringer. Ein ähnlicher Effekt wird auch durch die Zugabe von Staubpartikeln erreicht.

Parallel zu den beschriebenen Versuchen wurden am institutseigenen Rheometer Grundlagenuntersuchungen zum Viskositätsverhalten der verwendeten Fette bei unterschiedlicher Scherung, Temperatur und bei der Zugabe von Staubpartikeln durchgeführt.

Mit der Klärung des grundsätzlichen Verhaltens von Fett in Standarddichtspalten begann jetzt der eigentliche Teil der Arbeit: Die Suche nach dem Dichtmechanismus bei Schmutzbeaufschlagung. Hierfür wurden ausgewählte Radialspalt- und Axialspalt-Dichtsysteme gefüllt mit unterschiedlichen Fetten einer einseitigen Staubbeaufschlagung ausgesetzt. Schnell zeigte sich, dass Fett-Dichtsystemkombinationen, deren Spalt sich nicht rasch nach Versuchsbeginn öffnete, für die Abdichtung gegen feine Stäube ungeeignet waren. Das Fett hatte Staub aufgenommen und verschmutztes Fett hatte sich im gesamten Dichtsystem verteilt. Bei Dichtsystemen, deren Spalt sich öffnete, bildete sich im Dichtsystem ein enger Luftspalt mit klebrigen Oberflächen aus, der keine Partikel durch das Dichtsystem durchdringen ließ. Axialspalt-Dichtsysteme mit Fördervorzugsrichtung zur Schmutzbeaufschlagungsseite hin sind hier Radialspalt-Dichtsystemen klar überlegen, weil nach einer Sättigung der Fettoberflächen mit Partikeln eine geregelte Regeneration des Dichtspaltes durch die Zugabe von Frischfett ohne unkontrollierte Mischvorgänge möglich ist.

In weiteren Schritten wurde an ausgewählten Radialspalt- und Axialspalt-Dichtsystemen Luftdurchsatz und Druckhalteuntersuchungen bei einseitiger Druckbeaufschlagung von wenigen mbar

und unterschiedlichen Fetten durchgeführt. Fragestellungen, ob Fett durch den Druckunterschied aus dem Spalt gefördert wird, oder wie stark die Drosselwirkung im Gegensatz zum fettfreien Spalt ausfällt, bestimmten hier die Untersuchungen.

Mit dem prinzipiellen Auffinden des Dichtmechanismus waren die Forschungsarbeiten noch lange nicht beendet. Es mussten vielmehr die Grenzen der Dichtwirkung untersucht werden. Weitere Verschmutzungsarten, die die Dichtwirkung beeinträchtigen könnten wurden ausgewählt, die notwendige Apparatur zur Applizierung entwickelt und diese dann im Versuch auf das Dichtsystem bei unterschiedlichen Fetten und Betriebsparametern aufgebracht. Als weitere kritische Verschmutzungen wurden Sand, Wasser und Schlamm ausgewählt. Sand ist für die Funktion besonders kritisch, da sich die Partikelgröße der Dichtspalthöhe annähert und die Partikel im Spalt klemmen können und dadurch der geöffnete Fettspace so verloren gehen kann. Generell kann für alle Verschmutzungsarten gesagt werden, dass die Dichtfunktion erhalten bleibt, solange der Dichtspalt vollständig geöffnet ist und die Fettoberflächen noch nicht völlig mit Schmutz gesättigt sind. Damit dieser Zustand möglichst lange erhalten bleibt, sind folgende Bedingungen einzuhalten: Nach dem Startvorgang und nach jeder Nachschmierung muss sich der Dichtspalt möglichst schnell konditionieren (öffnen). Für diesen Vorgang und auch während des Betriebs muss das Fett des Dichtsystems einer Mindestfließkraft und Mindestscherung ausgesetzt sein. Durch einen sogenannten abgedeckten Spalteingang muss verhindert werden, dass unnötig Schmutz ins Dichtsystem eindringt. Das Fett muss in jedem Betriebszustand seine Fließgrenze behalten und darf auch nicht durch Flüssigkeiten von außen oder innen verdünnt werden. Werden diese Bedingungen beachtet, bieten Fettgefüllte Berührungsfreie Wellendichtungen einen sehr guten Schutz gegen Verschmutzung des abzudichtenden Raumes.

Für erschwerte Einsatzbedingungen z. B. mit einseitigem (Gas-) Überdruck wurden bei weiteren Versuchen Dichtsystemkombinationen aus einem berührenden Dichtelement wie V-Ring oder RWDR und einem Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsystem bezüglich der gegenseitigen Verträglichkeit beim Befüllvorgang, der Fettrückfördertendenz und bei der Schmutzbeaufschlagung untersucht.

Bei der Nachschmierung Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtsysteme entsteht am äußeren Spalteingang ein dicker Fett-Schmutzkragen, der entweder von Hand entfernt werden muss oder der als Fettleckage in der Umwelt zurückbleibt und ggf. für andere Maschinenteile in der näheren Umgebung, wie Riementriebe, gefährlich werden kann. Dieser Zustand war nicht mehr zeitgemäß und musste verbessert werden. Es wurde nach einer Möglichkeit gesucht, Altfett gezielt in einen Altfett-Sammelbehälter einzuleiten und den Fettkragen am abgedeckten Dichtspalteingang auf ein Minimum zu reduzieren. Aus den Strömungsuntersuchungen an Radialspalt-Dichtsystemen war bekannt, dass die Fettförderung an der Phasengrenze nicht den üblichen Gesetzmäßigkeiten newtonscher Fluide folgte. Schließlich konnte durch einen Stufenspalt ein Fettrückhaltebereich, der ein Austreten von Fett aus dem Spalteingang weitgehend verhindern kann, realisiert werden. Dieser Bereich ist unten mit einer Fettaustrittöffnung sowie einem Altfett-Sammelbehälter versehen und wird zwischen Hauptlabyrinth und Dichtspalteingang positioniert.

In einem letzten Teil der Arbeit wurden als Quintessenz der durchgeführten Forschungsarbeiten in einem eigenen Kapitel praxisgerechte Richtlinien zur Konstruktion, Betrieb und Wartung von Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtungen ausgearbeitet. Diese ermöglichen dem Konstrukteur auf einfache Weise neue Dichtsysteme zu entwerfen, vorhandene zu bewerten und die Grenzen des Systems abzuschätzen.

Die durchgeführten Untersuchungen beschränken sich auf Dichtsysteme bei horizontaler Wellenlage und bei Einzelanordnung, also ohne nachgeschaltetes Maschinenteil wie z. B. Wälzlager. Offen bleiben die Fragestellungen, wie Dichtsysteme bei vertikaler Welle gestaltet sein müssen und welche weiteren Anforderungen bei der Integration in ein Gesamtsystem, das ist ein System bestehend aus zwei Dichtsystemen und einem Lager, konstruktiv berücksichtigt werden müssen.

10 Literaturverzeichnis

- 1 **Kümmel, J.; Haas, W.:** Berührungsfreie Wellendichtungen (BFD) mit Fettfüllung zur Schmutzabdichtung, FKM 287 Abschlussbericht, Frankfurt, 2011.
- 2 **Fritz, E.; Haas, W.; Müller, H. K.:** Berührungsfreie Spindelabdichtung im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1991.
- 3 **Haas, W.:** Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter Berücksichtigung der Fanglabyrinth, Habilitationsschrift, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1997.
- 4 **Stanger, N.:** Berührungsfrei Abdichten bei kleinem Bauraum, Institutsbericht Nr. 55, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart.
- 5 **Würtner, M.:** Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2003.
- 6 **Stiegler, B.:** Berührungsfreie Dichtsysteme für die Anwendung im Fahrzeug- und Maschinenbau. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2005.
- 7 **Orso, J.:** Berührungsfreies Abdichten schnellaufender Spindeln gegen feine Stäube. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2007.
- 8 **Trutnovsky, K.:** Schutzdichtungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977.
- 9 **Eschmann, P., Hasbargen, L., Weigand, K.:** Die Wälzlagerpraxis. Verlag von R. Oldenbourg, München, 1953.
- 10 **Dahlke, H.:** Handbuch der Wälzlagertechnik. Deutsche Koyo Wälzlager Verkaufsgesellschaft mbH, Hamburg, 1987.
- 11 **Conti, G.:** Die Wälzlager. Carl Hanser Verlag, München, 1963.
- 12 **Patentanmeldung DE 1525805:** Mehrgängige Labyrinth-Dichtung. Linden, G. 1966.
- 13 **Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG:** Die Gestaltung von Wälzlagerungen. Firmenschrift, Schweinfurt, 2011.
- 14 **GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG:** Berührungslose Dichtungen. Firmenschrift, Nürnberg, 2012.
- 15 **Ziller GmbH & Co. KG:** Nilos-Ringe. Firmenschrift, Hilden, 2007.
- 16 **SKF GmbH:** Wälzlager. Firmenschrift, Schweinfurt, 2014.
- 17 **Fey Lamellenringe Vertriebs GmbH:** Fey - Lamellenringe, Firmenschrift, Pfaffstätten, 2007.
- 18 **Heim, F. L.:** Untersuchung des Strömungsverhaltens von Fett in engen Dichtspalten bei Berührungsfreien Wellendichtungen (BFD). Studienarbeit am Institut für , Universität Stuttgart, 2010.

- 19 **Kümmel, J.:** Untersuchung Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen bei Staubbeaufschlagung. Studienarbeit am Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2004.
- 20 **Freudenberg Sealing Technologies GmbH:** Simmering and Rotay Seals - Volume 11. Firmenschrift, Weinheim, 2015.
- 21 **Trelleborg Group:** Rotationsdichtungen. Firmenschrift, Stuttgart, 2011.
- 22 **Fritzsche, O.:** Untersuchung von kombinierten Dichtsystemen bestehend aus einem Fettgefüllten Berührungsfreien Wellendichtsystem (FBFWD) und einem berührenden Dichtelement. Diplomarbeit an der Universität Stuttgart, 2011.
- 23 **Kümmel, J.:** Untersuchung Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen. Diplomarbeit am Institut für Maschinenelemente, Unit Stuttgart, 2005.
- 24 **Bartz, W. J.:** Schmierfette. Expert Verlag, Renningen, 2000.
- 25 **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** Schmierstoffe - Schmierfette K - Einteilung und Anforderungen DIN 51 528. Berlin, 1990.
- 26 **Schmidt, T.:** Viskositäts- und Oberflächenspannungsverhalten von reinen und technischen Saccharoselösungen. Dissertation, Fachbereich 15 - Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Universität Berlin, 2000.
- 27 **Tscheuschner, H.-D.:** Lebensmitteltechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1986.
- 28 **Schramm, G.:** Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH, 1995.
- 29 **Klüber Lubrication München KG:** Schmierfett Klüberbio M 72-82. Firmenschrift 5.438 d, München, Ausgabe 11.00.
- 30 **SKF GmbH:** Schmierfett LGEP 2, Produktdatenblatt. Schweinfurt, Ausgabe 01.07.
- 31 **Klüber Lubrication München KG:** Schmierfett ISOFLEX TOPAS NCA 5051. Firmenschrift 5.95 d, München, Ausgabe 10.01.
- 32 **Klüber Lubrication München KG:** Schmierfett Klüberplex BEM 34-132. Produktinformation, München, Ausgabe 06.08.
- 33 **Klüber Lubrication München KG:** Schmierfett PETAMO GHY 133 N. Produktinformation, München, Ausgabe 10.08.
- 34 **Klüber Lubrication München KG:** Schmierfett ISOFLEX TOPAS NCA 51. Firmenschrift 5.178 d, München, Ausgabe 12.94.
- 35 **Cornelius, E.-A.:** Konstruktionsbücher - Gestaltung von Wälzlagerungen. Bd. 4, Springer-Verlag, Hamburg, 1953.
- 36 **Palmgren, A.:** Grundlagen der Wälzlagertechnik. Frankh'sche Verlagshandlung Stuttgart, Stuttgart, 1964.
- 37 **Müller H. K.; Haas, W.:** Dichtungstechnik. 6. Aufl. Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2009.
- 38 **Trelleborg Sealing Solutions GmbH:** Rotationsdichtungen. Stuttgart, 2007.

Lebenslauf

Name: Johannes Kümmel

Geburtsdatum, -ort: 19. Februar 1979, Schwäbisch Hall

Staatsangehörigkeit : deutsch

Familienstand: verheiratet

Eltern: Erwin Kümmel
Elfriede Kümmel, geb. Stephan

Schulbildung:

08/1985 - 07/1989 Grundschole am Langen Graben, Schwäbisch Hall

08/1989 - 06/1998 Erasmus Widmann Gymnasium, Schwäbisch Hall

Zivildienst:

07/1998 - 07/ 1999 Evang. Gesamtkirchengemeinde Schwäbisch Hall

Studium:

10/1999 - 03/2006 Studium an der Universität Stuttgart
Abschluss: Dipl.-Ing Maschinenbau, Diplomprüfung: 02.03.2006
Hauptfächer: Konstruktionslehre, Landtechnik

Beruf:

04/2006 - 03/2008 Beschäftigung als Spezialist Dichtungstechnik bei Fa. INA in der Schaeffler Gruppe in Herzogenaurach

04/2008 - 09/2011 Akademischer Mitarbeiter
am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart,
Bereich Dichtungstechnik

seit 09/2011 Beschäftigung als Lehrer im Angestelltenverhältnis / als Studienrat an der Gewerblichen Schule in Öhringen in den Bereichen Fahrzeugtechnik, Metallbau, CAD und Maschinenkonstruktion

Familie:

11/2014 Eheschließung mit Frau Carmen Kümmel (geb. Becklein)

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnelllaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zur Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnern mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leakage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenus	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur System-berechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen mit minimaler Volumenstropulsion
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und An-wendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräse-herstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozess
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlaufläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenläufigkeiten

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	Ch. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlauflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsgeräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Klaiher	Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additiven synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsminimierung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenlaufläche
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauervorhersage von Wellendichtungen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsverhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Nißler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebegeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Remppis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenlauflächen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung
170	J. Gözl	Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE-Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen