

Jochen Orso

**Berührungsfreies Abdichten
schnelllaufender Spindeln gegen
feine Stäube**

D 93
ISBN 3-936100-26-8

Institut für Maschinenelemente

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

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

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

Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. Jochen Orso

geboren in Reutlingen

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Uwe Heisel

Tag der Einreichung: 5. 6. 2007

Tag der mündlichen Prüfung: 15. 11. 2007

Institut für Maschinenelemente

2007

Meinem Vater gewidmet

*Wenn Du ein Schiff bauen willst
dann trommle nicht Männer zusammen,
um Holz zu beschaffen, Aufgaben zu vergeben
und die Arbeit einzuteilen,
sondern lehre die Männer die Sehnsucht
nach dem weiten endlosen Meer.*

Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Die Untersuchungen waren Teil eines Forschungsvorhabens der AiF, das der Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. - VDW bzw. die Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V. - FWF zur Lösung dieser Fragestellungen am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart initiiert hatte.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas, Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am Institut für Maschinenelemente, für sein Vertrauen in meine Person und in meine wissenschaftlichen Fähigkeiten sowie für die fachliche und menschliche Unterstützung während meiner Zeit am Institut.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Uwe Heisel, Ordinarius und Direktor des Institutes für Werkzeugmaschinen danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Ordinarius und Direktor des Instituts für Maschinenelemente, danke ich für seine Unterstützung.

Den Kollegen am Institut danke ich für das gute und freundschaftliche „IMA-Klima“ und dafür, dass sie mich mit Rat und Tat unterstützt haben. Ebenso danke ich allen wissenschaftlichen Hilfskräften und Studenten für Ihr Engagement und Ihren Beitrag zu dieser Arbeit, sowie in besonderem Maße den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Werkstatt und des Sekretariats.

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

Reutlingen, im November 2007

Jochen Orso

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	2
1.2	Ziel der Arbeit.....	8
2	Prüfeinrichtungen und Versuchsaufbau.....	9
2.1	Prüfstand für Rotationsdichtungen	9
2.2	Partikelbeaufschlagungseinheit	11
2.3	Versuchspartikel.....	13
2.4	Beaufschlagungseinheit für Minimalmengenschmierung (MMS)	15
2.5	Partikelzählgerät - LASAIR II.....	17
2.6	Endoskop	18
2.7	Prozessluft.....	18
2.8	PC-Steuerung der Versuchsparameter und Visualisierung	18
2.9	Partikelanalyse	19
2.9.1	Visuelle, qualitative Auswertung	20
2.9.2	Quantitative Auswertung mittels Partikelzähler	21
3	Versuchsdichtsystem - Dichtsystemkomponenten	23
3.1	Komponenten der Dichtsysteme.....	23
3.2	Wirkungsweise von Sperrluftdichtungen.....	25
3.3	Lagergefährdung durch Partikeleintrag	28
4	Experimenteller Teil	39
4.1	Partikel im Parallelspalt	39
4.1.1	Versuche bei Raumlage 1	40
4.1.2	Versuche bei Raumlage 2	44
4.1.3	Versuche bei Raumlage 3	45
4.2	Versuche mit transparenten, zylindrischen Dichtsystemen	47
4.2.1	Ergänzungen des Dichtsystembaukastens	47
4.2.2	Versuche mit offenem Dichtspalt	48
4.2.3	Versuche mit offenen Stirnflächenspalten	54
4.2.4	Versuche mit überdecktem Stirnflächenspalt	58
4.3	Versuche mit metallischen Dichtsystemen und visueller Auswertung	63
4.3.1	Versuchsdurchführung mit visueller Versuchsauswertung.....	63
4.3.2	Definition der Ablagerungsgrenze	63
4.3.3	Einfluss der Partikelgeschwindigkeit und der Drosselspalthöhe	66
4.3.4	Einfluss der Drosselspaltlänge	72
4.3.5	Einfluss der Drehzahl	76
4.4	Versuche mit metallischen Dichtsystemen und Partikelzähler	79
4.4.1	Versuchsaufbau und Auswertung	79
4.4.2	Versuchsergebnisse mit offenem Drosselspalt	80
4.4.3	Einfluss der Drosselspalthöhen	84
4.4.4	Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Eingangsbereichen.....	85
4.4.5	Versuche mit zusätzlicher Fangkammer.....	90
4.5	Untersuchungen mittels Endoskopie	99
4.6	Untersuchung von Kassettendichtsystemen	101
4.6.1	GMN Labyrinthdichtung - GMN Typ „L“	101
4.6.2	GMN Spaltdichtungen - GMN Typ „S“	102

4.6.3	NILOS LST-O	102
4.6.4	INPRO Seal Company	103
4.6.5	Weitere Hersteller berührungsfreier Dichtsysteme	104
4.6.6	Untersuchte Dichtelemente und durchgeführte Untersuchungen.....	107
5	Theoretische Überlegungen zur Sperrluft in Dichtsystemen	119
5.1	Aerodynamische- und Körperkräfte	119
5.1.1	Widerstandskraft	120
5.1.2	Magnus-Kraft	123
5.1.3	Saffman-Kraft	125
5.1.4	Gravitationskraft	126
5.1.5	Bewegungsgleichung	126
5.1.6	Beispielrechnung	127
5.1.7	Geradlinig verzögerte Bewegung.....	130
5.2	Gleichungen für die Partikelrotation	132
5.3	Partikel-Wand-Kollisionen	134
5.4	Zusammenfassung der Gas-Partikel-Strömungen	138
5.5	Ausblasen von Partikeln	139
5.5.1	Haftkräfte horizontal und tangential	139
5.5.2	Theorie der van der Waals Kraft	140
5.5.3	Grundlagen zur Kapillarkraft	140
5.5.4	Grundlagen der elektrostatischen Kraft.....	141
5.6	Bewertung und Anwendung der Überlegungen	147
6	Eigenkonstruierte berührungsfreie Kassettendichtsysteme.....	149
6.1	IMA Dichtung mit überdecktem Stirnflächenspalt.....	150
6.2	IMA Dichtung mit überdecktem Stirnflächenspalt und Fangkammer.....	153
7	Konstruktionsrichtlinien.....	157
7.1	Randbedingungen	157
7.2	Betriebsbedingungen	158
7.3	Konstruktion	159
7.3.1	Spalthöhe und Spaltlänge	159
7.3.2	Spaltanordnung.....	160
8	Zusammenfassung.....	163
9	Literatur.....	165

Formelzeichen und Abkürzungen

A	mm ²	durchströmte Dichtspaltfläche
a	mm	Abstand Partikel zu Oberfläche
a_{23}		Berechnungsfaktor
Ba		Bahrzahl
c_M		Widerstandsbeiwert (Magnus-Kraft)
c_W		Widerstandsbeiwert
c_ω		Rotationsbeiwert
D	mm	Durchmesser des Dicht- / Drosselspaltes
D_i	mm	Innendurchmesser
d_{max}	mm	Maximaler Partikeldurchmesser
d_P	mm	Partikeldurchmesser
d_{50}	mm	mittlerer Partikeldurchmesser
\vec{F}_W	N	Widerstandskraft
\vec{F}_M	N	Magnus-Kraft
\vec{F}_S	N	Saffman-Kraft
\vec{F}_G	N	Gravitationskraft
f_ω		Gleitreibungsbeiwert
e_ω		Stoßzahl
\dot{g}	m/s ²	Gravitationsbeschleunigung
h	mm	Höhe des Dicht- / Drosselspaltes
h_c		Verunreinigungsfaktor
h_S	mm	Höhe des Stirnflächenspaltes
$h_{\ddot{U}}$	mm	Höhe des Überdeckungsspalt
I_P		Partikelimpuls
L_{10}	h	Lebensdauerkenngroße
L_r	mm	Abstand zweier Rauheitsspitzen
l_A	mm	arbeitsraumseitige Drosselspaltlänge
l_{Br}	mm	Bremsweg
l_L	mm	lagerraumseitige Drosselspaltlänge

m_P	g	Partikelmasse
n	1/min	Drehzahl
n_P	1/m ³	Anzahldichte
p	hPa	Sperrluftdruck
Δp	hPa	Druckdifferenz
Re_P		Partikel Reynolds-Zahl
Re_S		Reynolds-Zahl der Scherströmung
Re_ω		Reynolds-Zahl der Rotation
Rz	µm	gemittelte Rautiefe
r		Partikelort
s		Sauberkeitsfaktor
T	Nm	Torsionsmoment
t	s	Zeit
U	mm	Umfang des Dichtspalts
V		Verunreinigungskenngröße
\dot{V}	l/min	Sperrluftvolumenstrom
\dot{V}_A	l/min	arbeitsraumseitiger Sperrluftvolumenstrom
\dot{V}_L	l/min	lagerraumseitiger Sperrluftvolumenstrom
v_A	m/s	arbeitsraumseitige Sperrluft-Strömungsgeschwindigkeit
v_C	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_F	m/s	Geschwindigkeit Flüssigkeit
v_{max}	m/s	Maximale Partikelgeschwindigkeit
\vec{v}_P	m/s	Partikelgeschwindigkeitsvektor
v_{rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit
v_0	m/s	Anfangsgeschwindigkeit
γ		Winkel
ξ		Faktor für Dichtungseingangsbereich
ξ		Faktor für Partikelform
η	Pa s	dynamische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_F	kg/m ³	Dichteflüssigkeit
ρ_P	kg/m ³	Dichtepartikel
σ_M		Faktor für Magnuskraft

ν_F	m ² /s	Kinematische Viskosität (Flüssigkeit)
ω_{rel}	rad/s	Relative Rotationsgeschwindigkeit

<i>A</i>	Arbeitsraumseite
<i>F</i>	Fluid
<i>L</i>	Lagerraumseite
<i>P</i>	Partikel
<i>rel</i>	Relativ
<i>X, Y, Z</i>	Koordinatenrichtungen

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, "Otto von Guericke" e.V.
CFD	Computational fluid dynamics - Numerische Strömungssimulation
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.
FKM	Fluor-Kautschuk
FWF	Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V.
GG	Gusseisen mit Lamellengraphit
GGG	Gusseisen mit Kugelgraphit
ICE	Intercityexpress
IMA	Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
KSS	Kühlschmierstoff
MMS	Minimalmengen-Schmierung
PKD	Polykristalliner Diamant
RWDR	Radialwellendichtring
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.
VMQ	Silikon-Kautschuk
WGK	Wassergefährdungsklasse

Kurzzusammenfassung

Seit einigen Jahren geht der Trend in der Werkzeugmaschinenindustrie weg von umweltbelastenden Kühlschmierstoffen hin zur Trockenbearbeitung. Um dieser Entwicklung auch von konstruktiver Seite aus Rechnung zu tragen, wurden berührungsfreie Dichtsysteme auf ihre Eignung zur Abdichtung gegen feine Stäube untersucht. Im Rahmen eines vierjährigen Forschungsprojektes am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart wurden Erkenntnisse über das Abdichtverhalten feiner Stäube gesammelt und diese in praxisgerechte Konstruktionsrichtlinien umgesetzt. Die Leistungsfähigkeit derartiger Dichtsysteme wurde experimentell mit Hilfe eines Partikelzählers quantitativ nachgewiesen.

Richtig gestaltete berührungsfreie Dichtsysteme mit Sperrluftunterstützung sind dazu geeignet schnelllaufende Spindeln sicher, zuverlässig und dauerhaft gegen feine Stäube und Partikel abzudichten.

Abstract

As pollution control and cost saving issues have become more pronounced, efforts were made to reduce the amount of cooling lubricant required in machine tooling applications. A non-contacting air barrier sealing arrangement was found to fulfil these requirements in dry tooling processes and dirty applications. During four years of research at the Institut fuer Maschinenelemente at the University of Stuttgart, detailed knowledge was gained regarding the sealing of dust particles in dirty working environments. Through extensive experimental research, the efficiency of these sealing systems were quantified using a particle analyzer. The corresponding data was analysed and the results were ultimately integrated into machine design guidelines.

Ideal designed air barrier sealing systems increase the durability and reliability of high-speed rotating shafts by protecting them from fine dust and particles.

Summary

Shafts with high rotational speeds are a major part of today's tooling machines. Therefore, the sealing of these shafts must be able to withstand high circumferential speeds, be very durable and not produce excessive friction. Because friction causes heat, the shaft elongates and reduces the machine's precision during operation. For applications where this is very important, non-contact air barrier seals have been developed to seal shafts against cooling lubricant.

Environmental issues and cost saving aspects are now driving tooling technology towards dry machining and minimal oil machining (MOM). Instead of sealing against coolant, the new challenge is to seal against dry or oily particles. The purpose of this doctoral thesis is to research whether non-contact seals can be used in dust applications.

In order to control the sealing system's gap geometry, various particle parameters and the system's operating conditions, an existing experimental test rig was modified and used. Dust particles generated by real machining processes were simulated using brass particles with a maximum size of 45 μm . All particles were distributed to the sealing system by a controlled blasting device, however, MOM-related tests particles were blasted through an oil fog to simulate shavings in a real MOM application.

To determine a system's sealing effectiveness required to adequately protect a bearing from abrasive particles, a comprehensive literature review was conducted to obtain a fundamental understanding of parameters affecting bearing durability.

Initially, the behaviour of intruding particles into gaps was investigated by using transparent plates to gain a fundamental understanding. The tests conducted included varying the gap height, the gap orientation and the influence of dry and MOM particles. These parameters influenced the amount of particles entering the gap and the penetration depth. The most effective method of sealing a system against the intrusion of particles was achieved by using a gap height of 0.02 mm (however the smaller the gap, the better the sealing affect), a gap orientation perpendicular to the moving particles and the use of oil-laden particles which tend to adhere at the gap entrance.

To correlate the initial findings discovered using parallel flat plates with real rotating shaft sealing applications, transparent cylindrical components were used. Hereby, the influence of the gap entrance geometry and the effect of sealing air were investigated. Results showed that it is essential to use sealing air in order to avoid accumulation of particles within the sealing system that may lead to seizing. However, results also showed a retarding mechanism is needed, since sealing air alone is not capable of decelerating particles to rest. The most effective means of decelerating particles was found to be a rectangular wall, which blocked the path of particle movement.

The next set of tests used precision-machined steel components as a means of determining the minimum amount of sealing air required to prevent particles from accumulating in the gap. Parameters that were investigated included the gap height, the orientation of the gap entrance, the particle velocity and the shaft's rotational speed. It was discovered that the amount of sealing air required is correlated to the gap height and the particle velocity. Additionally, it was demonstrated that high rotational shaft speeds showed little impact on the required amount of sealing air.

The sealing capability was measured by using a particle analyser. Each particle in the air stream was counted and grouped into six pre-defined diameter ranges. Again, the influence of gap height, gap orientation at entrance, particle velocity and the shaft's rotational speed were investigated. The results showed that by using sealing air in combination with a gap entrance consisting of two directional changes, the lowest amount of particle leakage is achieved. The air flowing out of the sealing system (on the clean side) contained no more than one or two particles per 100 ml of analysed air. According to calculations concerning a bearing's rating life, the amount of particle leakage has no negative influence on the lifetime of the bearing.

Commercially-available non-contact sealing systems were also investigated. From those tested, it was demonstrated that by using sealing air, good results can be achieved, however, most of them require high volumetric flow rates caused by their wide gaps. If no sealing air was used, the commercially-available systems would inevitably fail almost immediately.

Theoretically-derived formulae for calculating different forces acting on particles are readily available in literature. However, exact parameters such as particle geometry, speed, direction and surface characteristics are generally not known. Instead, empirical equations are available which allow estimation of the deceleration distance required to bring a particle to rest due to air resistance. Therefore, to reduce the length of the gap, deceleration must be assisted by particle-to-wall collisions. Secondly, particles at rest must be removed from the gap. This is achieved by introducing sealing air. So long as the aerodynamic forces caused by the sealing air acting on the particle are less than the adhesive forces, no particle movement is observed. To ensure particle movement in order to clear the gap, a limiting amount of sealing air is required to break the equilibrium between aerodynamic and adhesive forces, thus ensuring particle movement.

As a result of the experimental work conducted and theoretical considerations observed, two compact air barrier seals were developed. The focus was directed towards designing a sealing system which combines a maximum sealing capacity with a minimum space requirement and sealing air consumption. It was shown that using a sealing air volumetric flow rate of 10 l/min and a seal length of 13 mm, it is possible to build a highly efficient non-contact sealing system for dust applications.

From the findings obtained, guidelines have also been provided on how to construct and run a non-contact sealing system for dust applications. With these guidelines, one can design a non-contacting sealing system or is able to assess the capability of existing sealing systems.

With the use of sufficient sealing air and a well designed sealing system, non-contact sealing against dust is very effective. Failure will not occur due to wear, aging or thermal damage such as that likely to happen in contact seal applications. The amount of particles which pass the

sealing system and eventually end up in the bearing housing is so low that the durability of the bearings will not significantly be affected. Nevertheless, a non-contact sealing system will not function without any sealing air. Even a short temporary loss of sealing air supplied to the system may cause serious damage.

1 Einleitung

Der Einsatz, der Umgang und die Aufbereitung von Kühlschmierstoffen (KSS) führen zu ökologischen, ökonomischen und zu arbeitsschutztechnischen Problemen. Aufgrund ihres Gefährdungspotenzials ordnet man Kühlschmierstoffe in die hohen Wassergefährdungsklassen WGK 2 (Öle) oder WGK 3 (Emulsionen) ein. Dadurch müssen Kühlschmierstoffe in der Regel als Sondermüll entsorgt werden /1/.

Bedingt durch die strengen gesetzlichen Umweltauflagen stellen Kühlschmierstoffe einen zunehmenden Kostenfaktor in der zerspanenden Fertigung dar. Die Kosten für die Kühlschmierstoffversorgung variieren je nach Anwendungsfall zwischen 8% und 16% der Gesamtherstellkosten eines Bauteils. Die Kosten für die Kühlschmierstoffversorgung übersteigen damit bereits die Werkzeugkosten um ein Vielfaches /2/.

Um diese hohen Kosten zu umgehen, findet heutzutage die Trockenbearbeitung eine immer größere Anwendung in der zerspanenden Fertigung. Hierbei können die Kosten für die Kühlschmierstoffversorgung und anschließende Entsorgung eingespart werden. Ein weiterer Vorteil der Trockenbearbeitung besteht im Wegfall einer möglichen Thermoschockbelastung der Werkzeugschneide. Dies ermöglicht den Einsatz von sehr harten Schneidstoffen wie Schneidkeramik und polykristallinem Diamant (PKD) und damit eine Steigerung der Schnittwerte. Bei der Zerspanung mit Hartmetallwerkzeugen konnte durch die Trockenbearbeitung die Standzeit der Werkzeuge deutlich verlängert werden /3/. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der Trockenbearbeitung.

TABELLE 1.1 Einsatz der Trockenbearbeitung bzw. der Minimalmengenschmierung (MMS) /4/

Werkstoff Verfahren	Aluminium		Stahl		Grauguss
	Guss- legierung	Knet- legierung	Hochlegierte Stähle, Wälzlagerstahl	Automatenstahl, Vergütungsstahl	GG 20 bis GGG 70
Bohren	MMS	MMS	MMS	Trocken	Trocken
Reiben	MMS	MMS	O	MMS	MMS
Gewinde- schneiden	MMS	X	MMS	O	MMS
Gewinde- formen	MMS	MMS	MMS	MMS	O
Tiefbohren	MMS	X	X	MMS	MMS
Fräsen	Trocken	MMS	MMS	Trocken	Trocken
Wälzfräsen	X	X	O	Trocken	Trocken
Sägen	MMS	MMS	MMS	MMS	O
Räumen	X	X	Trocken	Trocken	O
X = keine prozesssicheren Anwendungsfälle bekannt				O = keine Forschungsaktivitäten	

Den veränderten Zerspanungsbedingungen müssen die Konstruktionen der Werkzeuge und der Werkzeugmaschinen angepasst werden. Bei den Werkzeugen wird die Werkzeuggeometrie durch Verändern des Frei-, Span- und Keilwinkels optimiert. Außerdem kann die Reibung des Werkzeugs durch entsprechend aufgebraute Oberflächenbeschichtungen verringert werden. Im Bereich der Werkzeugmaschine ist es vor allem notwendig, die Späne schnell und prozesssicher aus dem Arbeitsraum der Werkzeugmaschine abzuführen. Gelingt dies nicht, so kann es zu thermischen Abweichungen kommen, was eine sinkende Bearbeitungsqualität der Werkstücke zur Folge hätte, siehe auch /4/ und /5/.

Durch die Trockenbearbeitung ändern sich die Anforderungen, welche an die Dichtsysteme einer Werkzeugmaschine gestellt werden. Die im Arbeitsraum anfallenden Späne werden bei der Trockenbearbeitung nicht mehr durch den Kühlschmierstoff weggespült oder in diesem gebunden, sondern es entstehen kleine und kleinste Partikel, die nicht in einer Flüssigkeit gebunden sind und gegenüber denen die Lagerräume zuverlässig abgedichtet werden müssen /3/.

Für die Abdichtung rotierender Spindeln werden in konventionellen Werkzeugmaschinen seit längerer Zeit schon berührungsfreie Dichtsysteme eingesetzt. Die Untersuchung, ob und mit welchen konstruktiven Anpassungen derartige Dichtsysteme zur Abdichtung schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube eingesetzt werden können, ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Sie entstand unter anderem im Rahmen des AiF Forschungsvorhabens Nr. AiF 12632N mit dem Titel „Abdichtung schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube“, das der Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. - VDW bzw. die Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V. - FWF zur Lösung dieser Fragestellungen am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart initiiert hatte.

1.1 Stand der Technik

Der aktuelle Stand der Technik lässt sich anhand der Patentliteratur darstellen. Im Bereich der Staub- und Schmutzabdichtungen sind diverse Dichtsysteme bekannt. Hierbei wird häufig auf Elastomerdichtelemente zurückgegriffen. Durch das Vorschalten von Staubschutzlippen, Schleuderringen oder z.B. Filzringen soll die eigentliche Dichtstelle vor Staub und Schmutz geschützt werden. Diese Dichtstelle besteht dann wiederum aus einer Elastomerdichtkante, die berührend auf einer Gegenfläche läuft. Derartige, zumeist kassettenförmige Dichtsysteme sind in Bild 1.1 dargestellt.

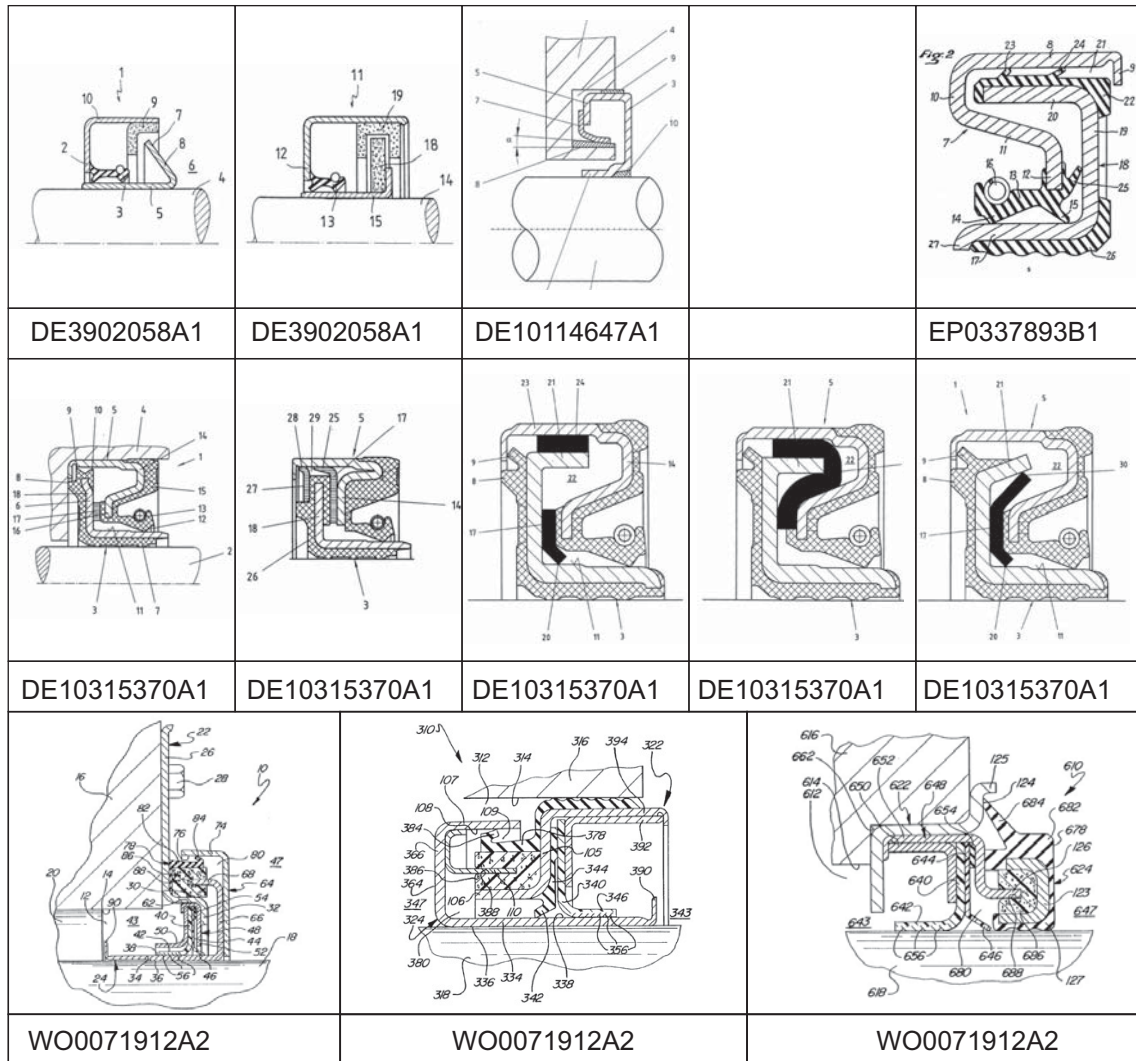


Bild 1.1 Patentierte Staubdichtsysteme mit Elastomerdichtelementen /6/ - /10/

Bei allen oben dargestellten Dichtsystemen entsteht an den Elastomerdichtkanten Reibung aufgrund der Relativbewegung. Diese ist umso größer je schlechter die Elastomerdichtkanten geschmiert sind. Die daraus resultierenden Reibungsverluste die bei einer Standard Radialwellendichtung entstehen, sind im unten stehenden Diagramm dargestellt, vgl. Bild 1.2, /11/.

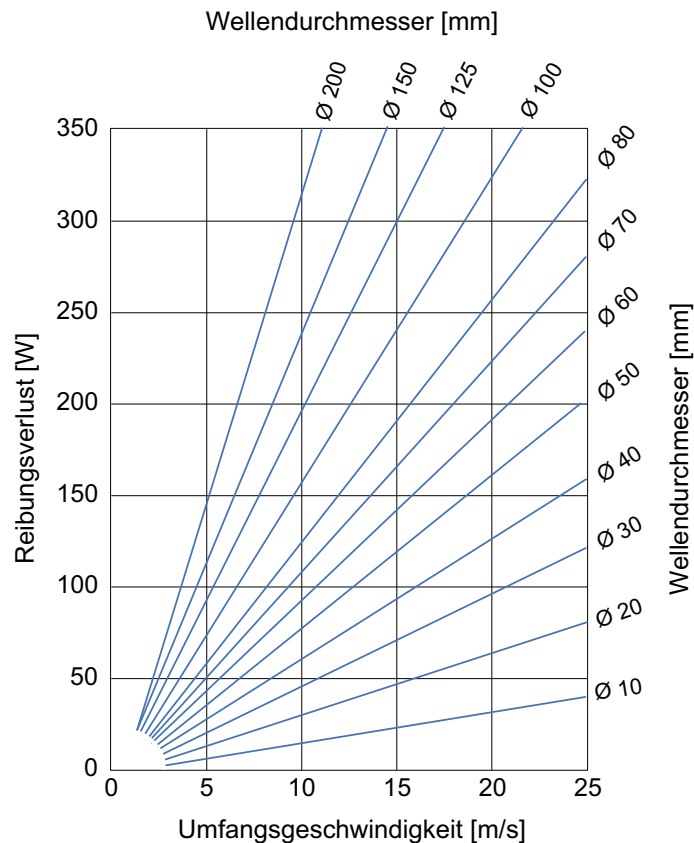


Bild 1.2 Reibungsverlust eines Radialwellendichtrings /11/

Die entstehenden Reibungsverluste führen zu einer Erwärmung der Elastomerdichtkante und können bis zu einer thermischen Zerstörung des Dichtungswerkstoffes führen. In der Norm DIN 3761 sind die zulässigen Umfangsgeschwindigkeiten bzw. Drehzahlen unterschiedlicher Elastomerwerkstoffe für Radialwellendichtringe dargestellt /12/, vgl. Bild 1.3.

Bei größer werdenden Wellendurchmessern sind höhere Umfangsgeschwindigkeiten tolerierbar, da hierbei mehr Wärme von der Dichtkante durch Wärmeleitung ins Innere der Welle abgeleitet werden kann. Die Obergrenze für die thermisch belastbarsten Werkstoffe VMQ (Silikon-Kautschuk) und FKM (Fluor-Kautschuk) stellen Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 38 m/s dar /12/. Diese Werte können jedoch nur erreicht werden, wenn die Dichtkanten ausreichend geschmiert sind und die Reibungswärme von der Welle abgeführt wird.

Bei den in Bild 1.1 dargestellten Dichtsystemen, bei denen die Staubschutzelemente aus Elastomerwerkstoffen nur auf dünnen Gegenflächen laufen, ist die Fähigkeit zur Wärmeableitung gering. Die Möglichkeit der Schmierung dieser Dichtkanten ist insbesondere beim Vorhandensein von Staub und Schmutz ebenfalls sehr begrenzt. Derartige Dichtsysteme eignen sich demnach nicht für hohe Drehzahlen, wie sie z.B. bei Werkzeugmaschinen spindeln auftreten.

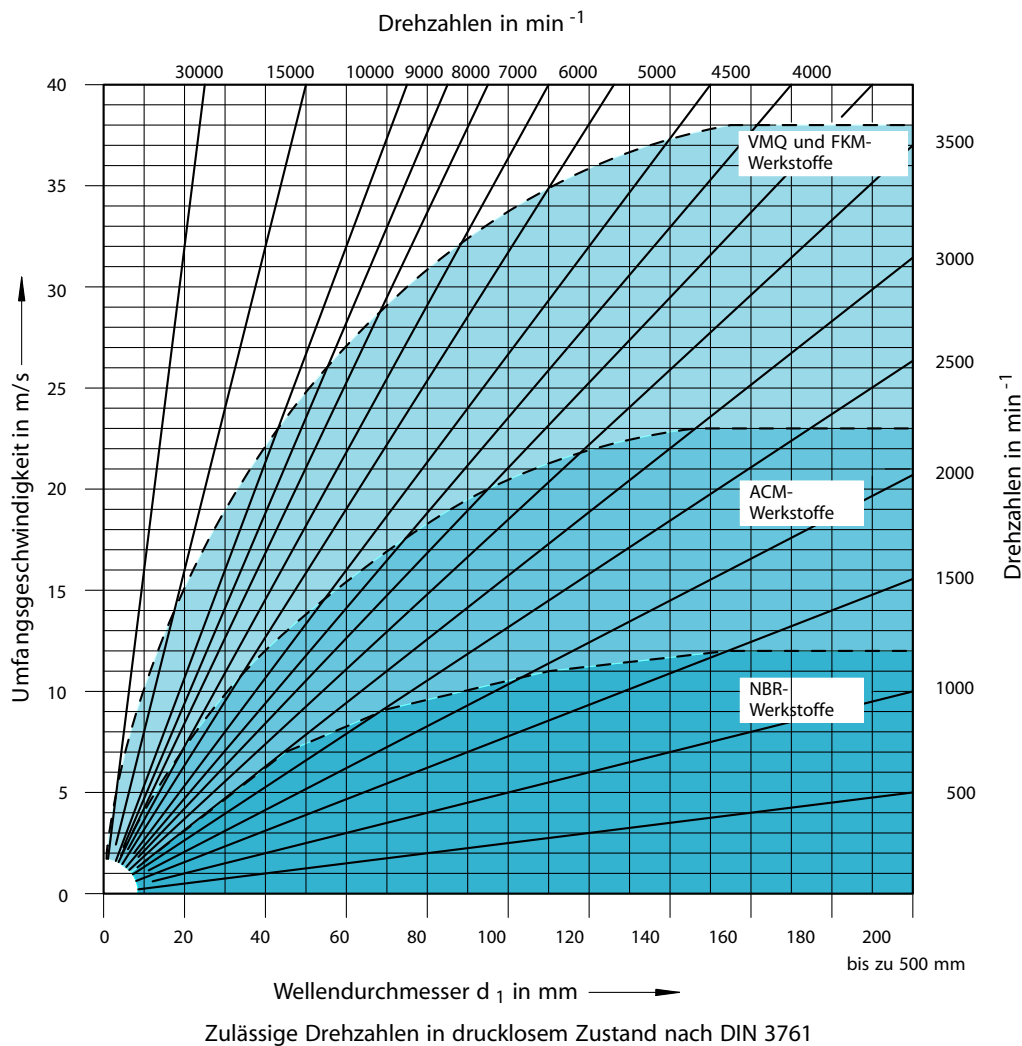


Bild 1.3 Zulässige Drehzahlen in drucklosem Zustand nach DIN 3761 /12/

Eine Alternative zu berührenden Dichtsystemen mit ihren thermisch bedingten Einsatzgrenzen stellen berührungsfreie Dichtsysteme dar, wie sie am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart seit über 20 Jahren entwickelt und erforscht werden, /13/ - /17/.

Aufgrund des Wegfalls jeglicher thermischen Belastung der Werkstoffe durch Reibung sind die zulässigen Umfangsgeschwindigkeiten lediglich durch die Fliehkraft und die Werkstoffsteifigkeit beschränkt. Der Einsatzbereich derartiger berührungsfreier Dichtsysteme reicht vom Zahnarztbohrer mit mehreren 100.000 min^{-1} über die Abdichtung von Eisenbahntrieben z.B. beim Intercityexpress (ICE) bis hin zu Abdichtungen in Windenergieanlagen mit Abdichtdurchmessern mit über 3 m.

Der Wegfall einer thermischen Belastung und die hohen zulässigen Umfangsgeschwindigkeiten sind auch der Grund, weshalb sich das Prinzip der berührungsfreien Dichtsysteme im Werkzeugmaschinenbau in den letzten Jahrzehnten durchgesetzt und bewährt hat. Ein Beispiel hierfür ist unter anderem die DIN 69002 - Werkzeugmaschinen - Kurzspindeln /18/, die mit der Beteiligung des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart entstanden ist.

Bei Werkzeugmaschinen besteht das Problem, dass durch die Reibungswärme einer berührenden Dichtung es zu einer thermischen Ausdehnung der Spindel kommt, was die Maßhaltigkeit beeinträchtigt. Ferner sind die Anforderungen an Umfangsgeschwindigkeiten und Zuverlässigkeit bei Werkzeugmaschinen und mit berührenden Dichtsystemen nicht zu erfüllen.

Es liegen kaum Patente für berührungsfreie Dichtsysteme vor, die speziell für die Staubabdichtung konzipiert sind. Es gibt Varianten, die zur Absicherung der Staubdichtheit zusätzlich mit nur leicht berührenden Dichtelementen ausgestattet sind. Bild 1.4 zeigt einige Ausführungsbeispiele von so genannten Labyrinthdichtungen, die mit berührenden und nichtberührenden Dichtelementen ausgestattet sind, /19/ - /22/.

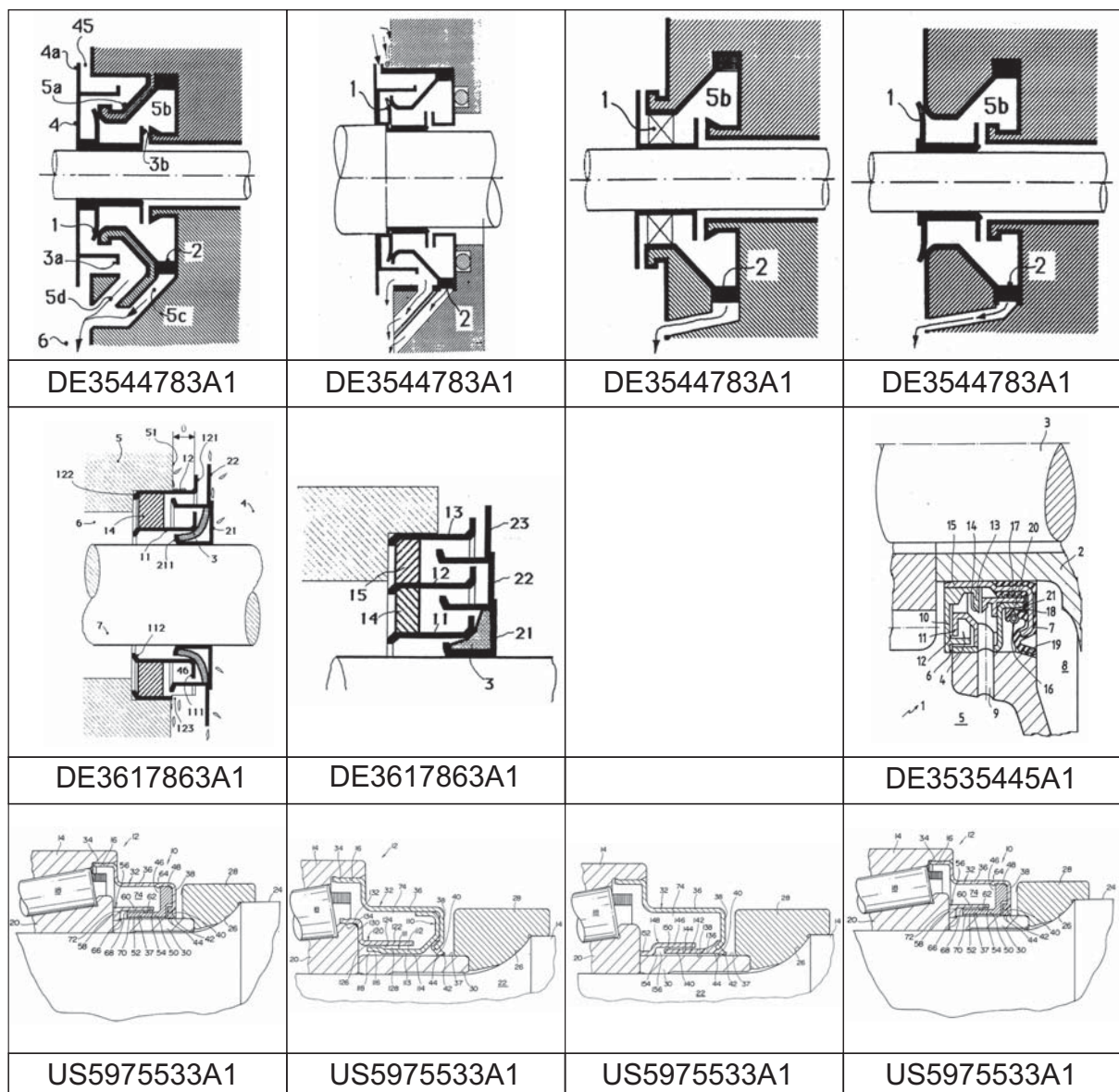


Bild 1.4 Labyrinthdichtsysteme mit berührenden Dichtelementen zur Staubabdichtung /19/ - /22/

Bei den in Bild 1.4 aufgeführten Beispielen besteht wieder das bereits beschriebene Problem der entstehenden Reibwärme. Sie sind demnach für hohe Drehzahlen ebenfalls nicht geeignet.

Reine berührungsfreie Dichtsysteme zur Staubabdichtung, die in der Patentliteratur zu finden sind, sind in Bild 1.5 dargestellt.

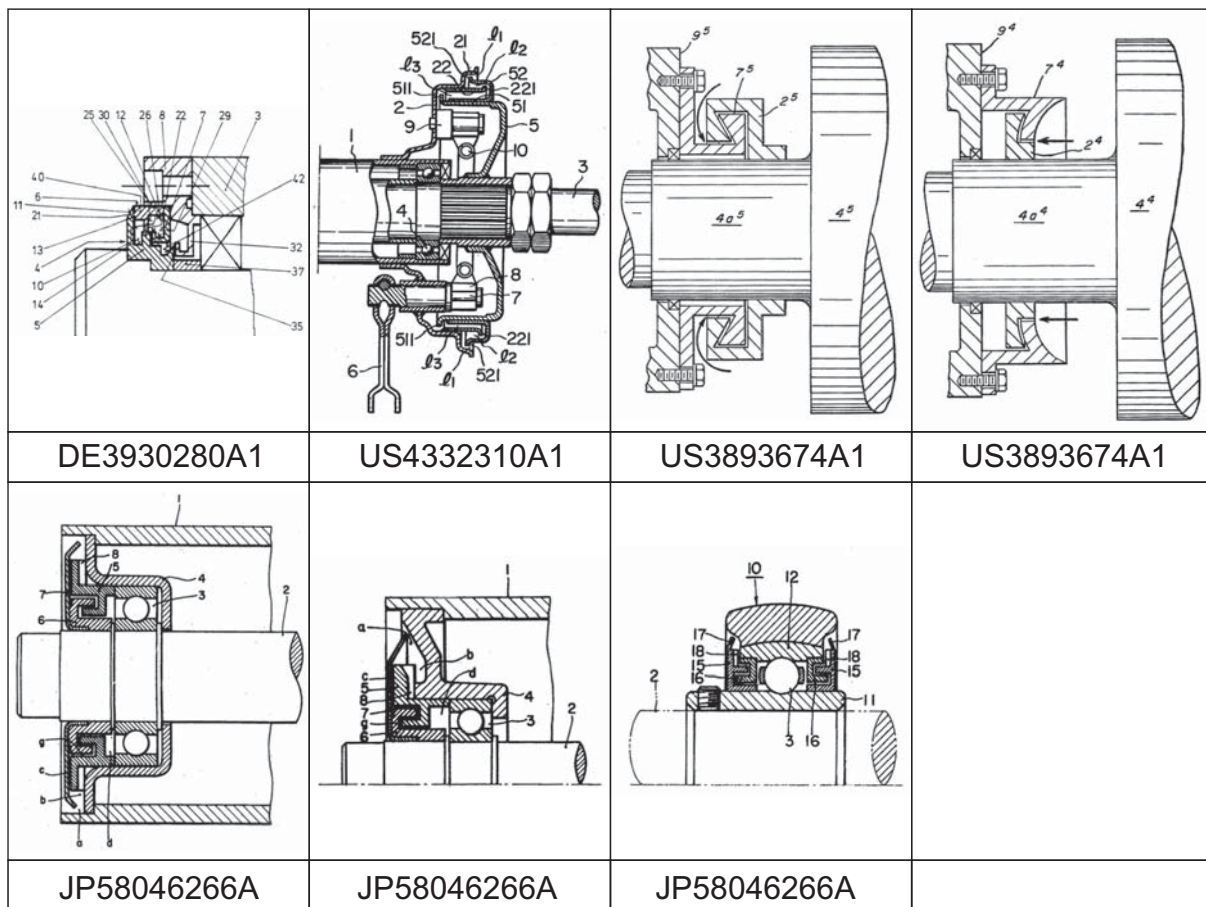


Bild 1.5 Berührungsfreie Dichtsysteme zur Abdichtung gegen Stäube /23/ - /26/

Über die Wirksamkeit derartiger Dichtsysteme ist aus der Patentliteratur nichts zu entnehmen. Herr Würthner /16/ hat in seiner Dissertation am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart erste Versuche zur Abdichtung von Stäuben mittels berührungsfreier Dichtungen durchgeführt und die Ergebnisse in seiner Arbeit beschrieben.

Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass sich berührungsfreie Dichtsysteme, wie sie zur Abdichtung von Flüssigkeiten eingesetzt werden, für die Staubabdichtung nicht eignen. Nach Versuchszeiten von einigen Stunden konnten große Mengen an Staubpartikeln innerhalb des Dichtsystems gefunden werden. Es trat bei diesen Versuchen Staubleckage auf. Beim Einsatz von Sperrluftdichtsystemen konnten jedoch erste, viel versprechende Versuche durchgeführt werden, /16/. An diese ersten Erkenntnisse von Herrn Würthner knüpft die vorliegende Arbeit an.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Eignung von berührungsfreien Dichtsystemen zur Staubabdichtung zu untersuchen und deren Wirksamkeit zu quantifizieren.

In einem ersten Schritt wurde qualitativ die Möglichkeit der berührungsfreien Abdichtung von Stäuben untersucht. Es wurde zunächst das Eindringverhalten von feinen Stäuben in enge Spalte und die Mechanismen, die zum Rückhalten dieser Stäube notwendig sind, untersucht. Aus diesen Versuchsergebnissen wurden dann Erkenntnisse gewonnen, welche zur Auslegung und Konstruktion funktionsfähiger und zuverlässiger berührungsfreier Dichtsysteme zwingend erforderlich sind.

In einem zweiten Schritt wurden unterschiedliche berührungsfreie Dichtsysteme entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse konzipiert und deren Wirksamkeit experimentell untersucht. Die Ergebnisse wurden im Weiteren mit Untersuchungen von handelsüblichen berührungsfreien Dichtsystemen verglichen.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend in einem theoretischen Teil der Arbeit auf physikalische Effekte zurückgeführt und bewertet. Diese Überlegungen mündeten in die Eigenkonstruktion zweier Dichtsysteme die unter der Vorgabe der maximalen Dichtsicherheit bei minimalem Bauraum gestaltet wurden.

Im letzten Teil der Arbeit wurden Richtlinien erarbeitet, um berührungsfreie Dichtsysteme zur Staubabdichtung zu gestalten oder aber bereits vorhandene berührungsfreie Dichtsysteme auf ihre Tauglichkeit zur Staubabdichtung hin beurteilen zu können.

2 Prüfeinrichtungen und Versuchsaufbau

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden mit den nachfolgend beschriebenen Einrichtungen und Prüfständen des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart durchgeführt.

2.1 Prüfstand für Rotationsdichtungen

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche kamen bereits bestehende Prüfstände zum Einsatz, auf denen bei früheren Untersuchungen Rotationsdichtungen mit unterschiedlichen flüssigen Medien beaufschlagt wurden. Für die Untersuchungen mit pulver- bzw. staubförmigen Medien wurde ein vorhandener Prüfstand umgebaut.

Der in Bild 2.1 abgebildete Prüfstand BFWD 3 für Rotationsdichtungen besteht im Wesentlichen aus einer angetriebenen, präzise gelagerten Spindel (3). An diese Spindel kann die Welle der Prüfdichtung, im Folgenden als Hauptwelle (5) bezeichnet, angeflanscht werden. Der Antrieb der Welle erfolgt mittels eines Poly-V-Riemens und einem drehzahlregulierten Elektromotor.

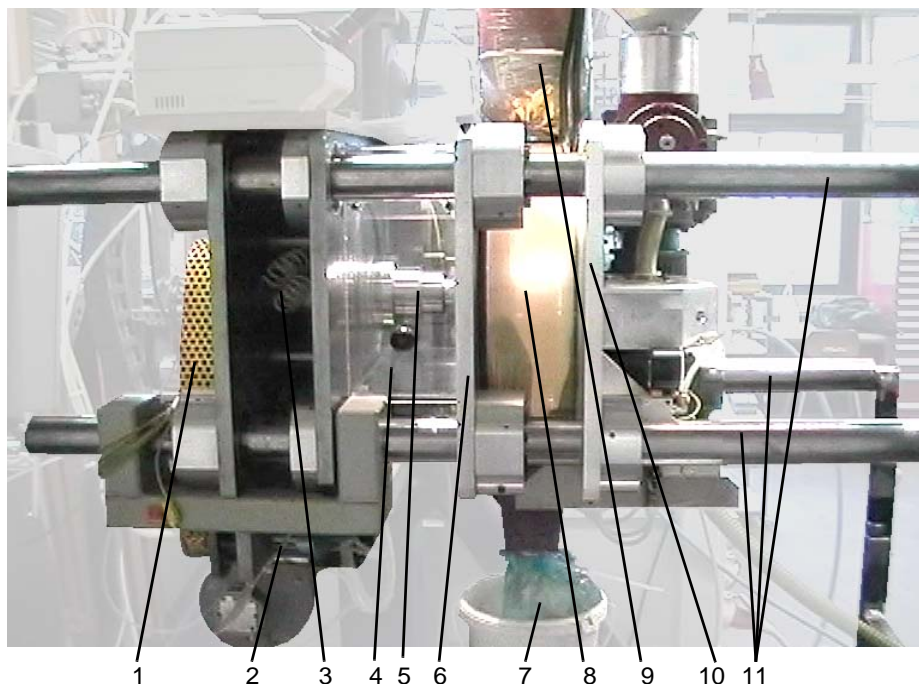


Bild 2.1 Prüfstand BFWD 3: 1 - Poly-V-Riemen, 2 - Motor, 3 - Hauptspindel, 4 - Lagerraum, 5 - Hauptwelle, 6 - Statorplatte, 7 - Partikel-Auffangbehälter, 8 - Prüfzelle/Arbeitsraum, 9 - Entlüftung, 10 - Trägerplatte mit Beaufschlagungseinheit, 11 - Führungsstangen.

Die Statorteile der Prüfdichtung sind auf der Statorplatte (6) montiert, die auf vier achsparallel angeordneten, zylindrischen Stangen (11) geführt ist. Über diese Stangen ist es möglich die Statorteile in axialer Richtung zur Versuchswelle zu positionieren. Auf einer weiteren Trägerplatte (10) wird die Beaufschlagungseinheit montiert, mit deren Hilfe die Versuchsdichtung mit dem Versuchsmedium beaufschlagt wird. Zwischen diesen beiden Platten befindet sich die Prüfzelle (8), im Folgenden als Arbeitsraum bezeichnet.

Um den Arbeitsraum (8) nach außen zu begrenzen ist zwischen den oben beschriebenen Platten ein Plexiglaszylinder angeordnet. Er ermöglicht die Beobachtung des Dichtsystems während des Versuchs. Der als Lagerraum bezeichnete Raum (4) hinter dem Versuchsdichtsystem ist der Bereich, in dem bei einer schnelllaufenden Spindel, z.B. bei einer Werkzeugmaschine, die zu schützenden Wälzlager sitzen. Diesen Raum gilt es bei den Versuchen gegenüber dem Arbeitsraum abzudichten.

Bei den meisten durchgeführten Versuchen erwies es sich als notwendig einen gezielten Luftstrom in den Innenraum des Versuchsdichtsystems einzuleiten, um die Dichtwirkung der Dichtsysteme zu unterstützen. Ein Teil dieser Luft entweicht durch den Dichtspalt des Dichtsystems in den Arbeitsraum und muss aus diesem möglichst ohne größeren Strömungswiderstand entweichen können. Dieser Luftstrom reißt einen Teil der dort befindlichen Versuchspartikel mit sich. Zum Schutz der Umwelt, des Laborklimas und des Bedienpersonals müssen diese Partikel durch Filter aus dem Abluftstrom entfernt werden.

Die Filterung erfolgt mittels Zyklonen, wie sie bei der Entlüftung von Kurbelgehäusen im PKW-Bereich eingesetzt werden. Sie filtern dort aus einem Luftstrom von 100-120 l/min feine und feinste Öltröpfchen bis unter 1 µm Größe heraus. Der große Vorteil der Zyklone gegenüber konventionellen Filtern liegt in der hohen Abscheiderate, der Möglichkeit die abgeschiedenen Partikel in den Prozess zurückzuführen, sowie im geringen Gegendruck und der geringen Betriebs- bzw. Folgekosten begründet.

Für die Bestimmung des Verschmutzungsgrades des Dichtsystems kann die Statorplatte durch eine zweite ersetzt werden, bei der die Dichtungsaufnahme aerostatisch gelagert ist. Diese nahezu reibungsfreie Lagerung der Dichtung ermöglicht es, das beim Betrieb entstehende Reibmoment über einen Biegebalken abzustützen und zu messen. Ein Ansteigen des Moments während eines Versuchs ist ein Indiz dafür, dass Partikel in die Spalte eingedrungen sind und diese nach und nach zusetzen.

Der Lagerraum hinter dem Dichtsystem wurde gekapselt und mit sauberer, partikelfreier Druckluft gespült. So konnte sichergestellt werden, dass keine Partikel oder Staubteilchen von außen in den Lagerraum gelangen. Partikel, die im Laufe eines Versuchs hier gefunden wurden, stammten somit aus dem Dichtsystem und sind als Leckage zu betrachten. Bild 2.2 zeigt eine Seitenansicht des Prüfstandes mit dem gekapselten Lagerraum und dem Arbeitsraum.

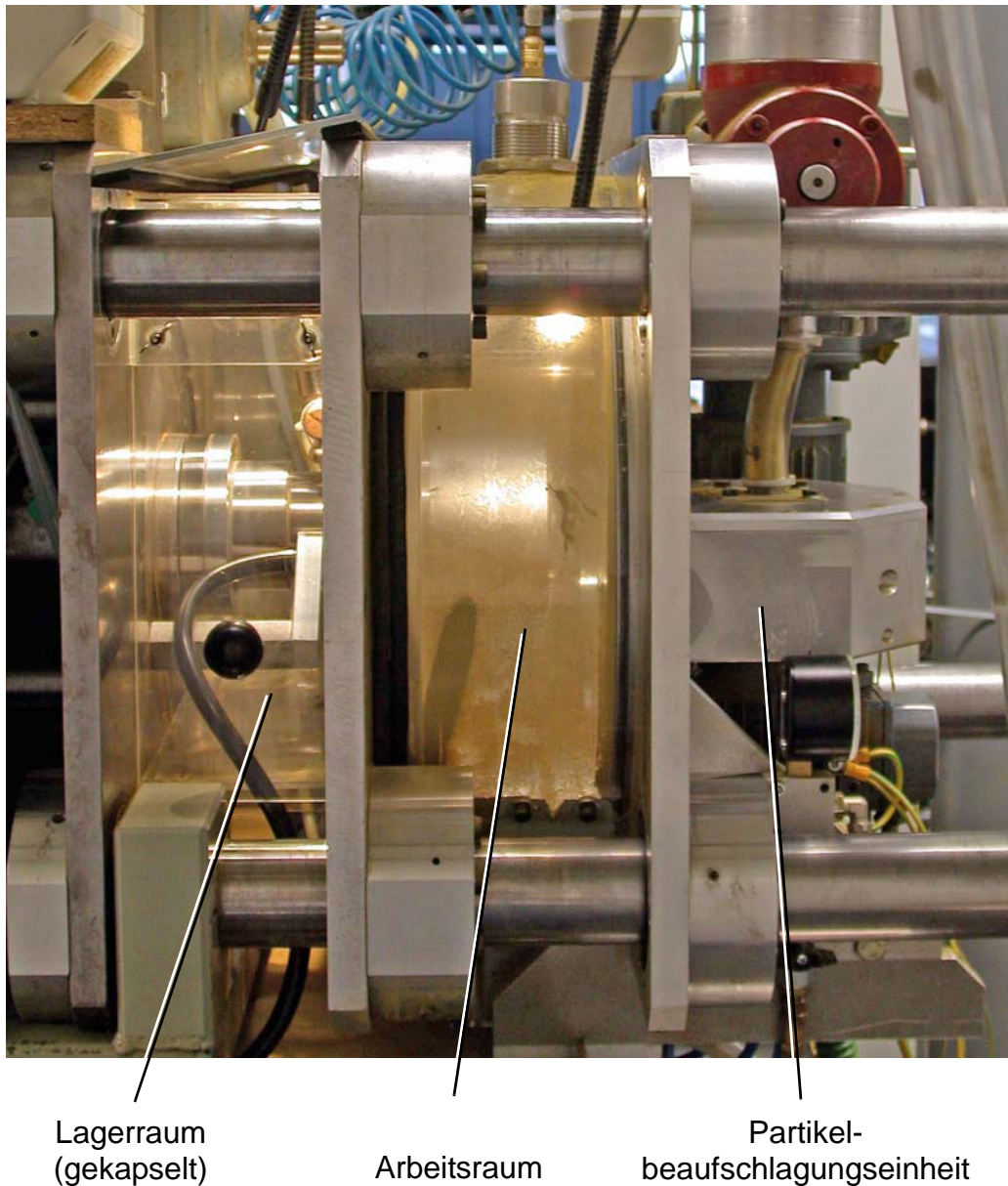


Bild 2.2 Seitenansicht des Prüfstandes mit Lagerraum, Arbeitsraum und Partikelbeaufschlagungseinheit

2.2 Partikelbeaufschlagungseinheit

Zur Beaufschlagung der Dichtsysteme wurde die in Bild 2.3 dargestellte Partikelbeaufschlagungseinheit verwendet. Sie besteht aus einem Partikelbehälter, einer Zellradschleuse zur Dosierung der Partikelmenge und einer rotierenden Streuscheibe zur Beschleunigung der Partikel.

Die Zellradschleuse fördert aus einem Vorratsbehälter einen einstellbaren Massenstrom an Partikeln und führt diesen der Streuscheibe zu. Der Massenstrom ist über die Erregerfrequenz des Antriebsmotors der Zellradschleuse einstellbar. Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein

Massenstrom von 3 g Partikeln pro Sekunde eingestellt und über den gesamten Versuchszeitraum nicht verändert.

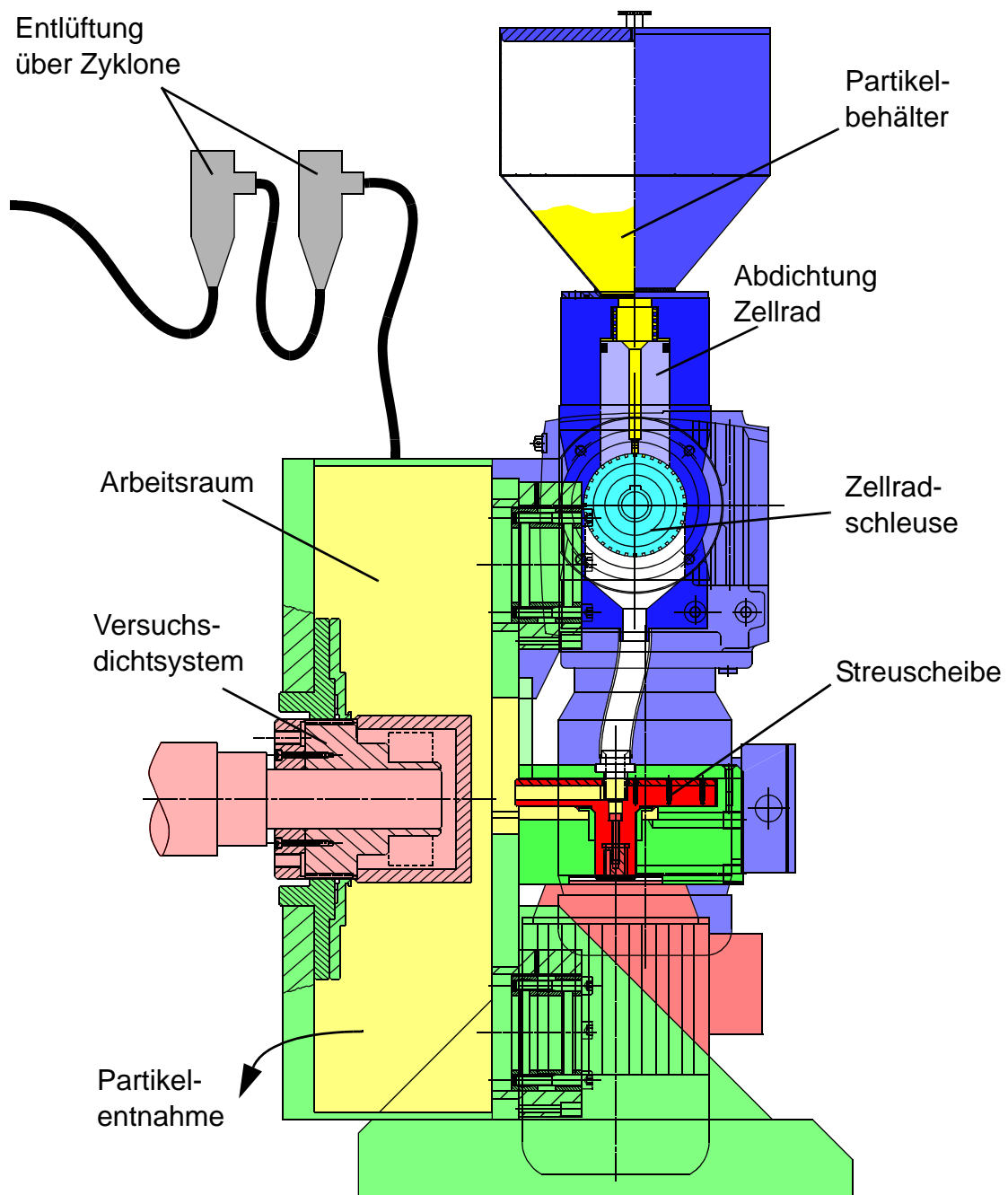


Bild 2.3 Partikelstreuereinrichtung

Die Streuscheibe ist mit Rippen versehen. Sie ist horizontal angeordnet und durch einen ebenfalls drehzahlgeregelten Elektromotor angetrieben. Die Partikel werden von der rotierenden Scheibe aufgrund von Fliehkräften nach außen gefördert und dabei beschleunigt. Sie verlassen die Scheibe tangential mit etwa der Umfangsgeschwindigkeit der Streuscheibe. Die Versuche

wurden größtenteils mit Umfangsgeschwindigkeiten bzw. mit maximalen Partikelgeschwindigkeiten von 11 bis 40 m/s durchgeführt.

In der unten aufgeführten Tabelle 2.1 sind typische Schnittgeschwindigkeiten v_c unterschiedlicher, spanender Bearbeitungsverfahren aufgeführt. Der Bereich der Partikelgeschwindigkeiten, bei denen die Versuche durchgeführt wurden, deckt sich mit den aufgeführten, maximalen Schnittgeschwindigkeiten. Die in der Tabelle angegebenen, minimalen und maximalen Werte streuen sehr stark, da hier nicht nach den zu bearbeitenden Werkstoffen unterschieden wurde.

TABELLE 2.1 Schnittgeschwindigkeiten /27/

Werkzeug	Werkstoff	Verfahren	v_{cmin} [m/s]	v_{cmax} [m/s]
Wendeplatten-Planfräser	VHM	Planfräsen	1,5	21,3
Wendeplatten-Schrupfräser	VHM	Schruppen	1,5	21,3
Schaftfräser	Pulverstahl	Schruppen - Vollnut / Kontur	6,7	16,7
Schaftfräser	PCD	Schruppen - Schlichten	6,7	16,7
Schaftfräser	Diamantbesch.	Schruppen - Vollnut / Kontur	6,7	13,3
Schaftfräser	VHM	Schruppen - Vollnut / Kontur	0,2	4,0
Außendreh-Wendeschnidplatten	VHM	Außendrehen	0,3	16,7
Innendreh-Wendeschnidplatten	VHM	Innendrehen	0,7	11,7
Gewinde-Wendeschnidplatten	VHM	Gewindedrehen	0,7	5,9
Abstech-Schnidplatten	VHM	Abstechen	1,0	2,7
Spiralbohrer	HSS	Bohren	0,1	1,7
Kreissägeblätter	HSS	Sägen	0,1	40,0
Kreissägeblätter	VHM	Sägen	0,3	33,3
Partikelgeschwindigkeit bei Versuchen			11	40

2.3 Versuchspartikel

Zur Auswahl der Versuchspartikel wurden eine Reihe von Vorversuchen und Vorüberlegungen angestellt. Hieraus ergaben sich einige Anforderungen an die Partikel.

Bei Versuchen mit feinen Schleifspänen aus der Stahlbearbeitung zeigte sich, dass diese ungeeignet waren um automatisierte und reproduzierbare Versuche durchzuführen. Die größte Schwierigkeit machte hierbei ihre Spiralform, Korrosionsneigung und schlechte Verfügbarkeit in definierter Partikelgröße. Andere Metalle wie z.B. Aluminium schieden aus, da Aluminium in Form kleiner Partikel lungengängig und hoch toxisch ist.

Die Wahl fiel schließlich auf feines, luftverdüstes Messingpulver. Die Partikel haben eine irreguläre, spratzige Form, die der von echten Spänen am nächsten kommt. Die Messingpartikel sind laut Herstellerangaben zu mindestens 95% kleiner als $45 \mu\text{m}$ /28/.

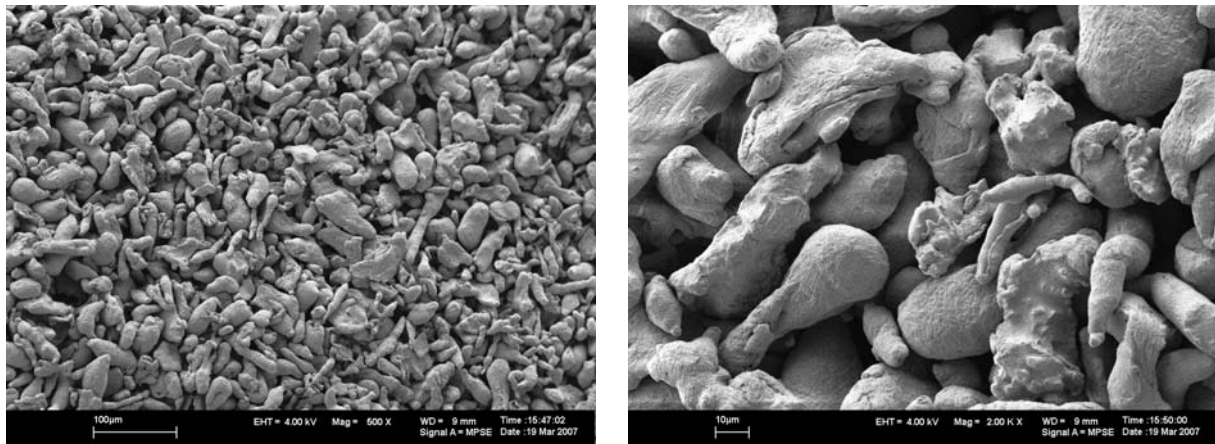


Bild 2.4 Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des Messingpulvers

Bild 2.4 zeigt eine Mikroskopaufnahme des verwendeten Messingpulvers. In Bild 2.5 ist eine Korngrößenanalyse des verwendeten Messingpulvers abgebildet.

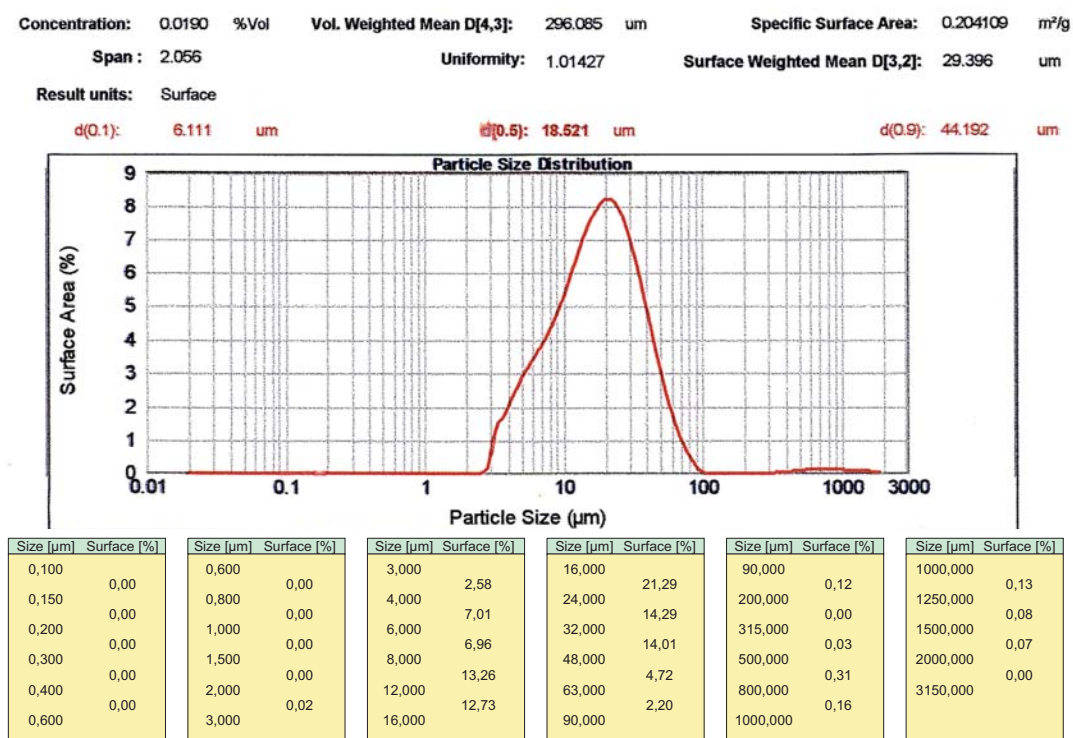


Bild 2.5 Korngrößenanalyse der verwendeten Messingpartikel

Die Messingpartikel haben sich als Versuchsmedium gut bewährt. Neben der geringen Korrosionsneigung und der Ungiftigkeit ist die gelb- / goldene Kontrastfarbe zu den silbergrauen Versuchsteilen besonders vorteilhaft. Die dicke Oxidschicht auf den Messingpartikeln erwies sich als positiv, da diese die elektrische Leitfähigkeit reduziert. Es kam trotz teilweise großer Mengen an Partikeln in Steuerungen und im Messrechner zu keinen Kurzschlüssen.

2.4 Beaufschlagungseinheit für Minimalmengenschmierung (MMS)

Für Untersuchungen zur Abdichtung von öligen Stäuben, wie sie bei der Trockenbearbeitung mit Minimalmengenschmierung (MMS) auftreten, musste eine Einrichtung aufgebaut werden, welche die Messingpartikel gleichmäßig und definiert mit Schmierstoff benetzt.

Bei handelsüblichen Minimalmengenschmiersystemen wird der Schmierstoff mittels Druckluft verdüst oder in Form einzelner Tropfen an der Schmierstelle aufgebracht. Beide Methoden kamen für die Versuche nicht in Frage, da entweder die Messingpartikel durch den Luftstrom abgelenkt oder bei einzelnen Tropfen nur unzureichend benetzt werden. Zum Einsatz kam deshalb eine Einrichtung zur Ölzerstäubung mittels Ultraschall.

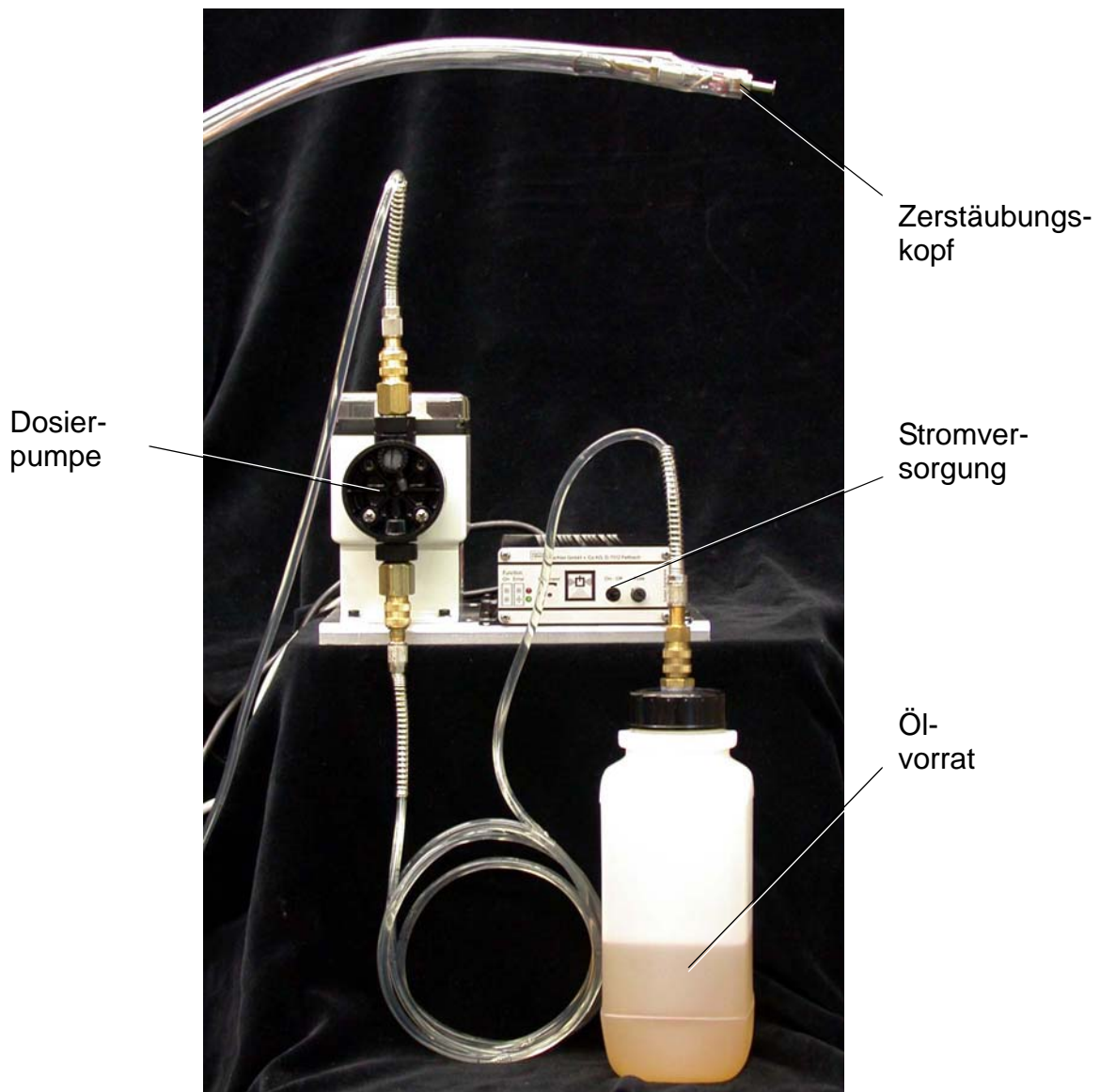


Bild 2.6 Ultraschallzerstäuber, bestehend aus Dosierpumpe, Stromversorgung, Ölvorrat und Zerstäubungskopf

Die Einrichtung zur Ultraschallzerstäubung, siehe Bild 2.6, besteht im Wesentlichen aus dem eigentlichen Zerstäubungskopf, der mittels hochfrequentem Strom einen Piezokristall zum

schwingen anregt. Das zu zerstäubende Öl wird über eine Dosierpumpe zugeführt und durch die Schwingungen in Form von kleinsten Tröpfchen abgeschleudert. Das Resultat ist eine großflächige Nebelschwade, die aus sehr kleinen Öltröpfchen besteht, vgl. Bild 2.7.



Bild 2.7 Ölnebel durch Ultraschallzerstäubung

Der Einbau in den Arbeitsraum der Versuchseinrichtung erfolgt von oben vor dem Dichtsystem. Die Ölnebelwolke wird von den Partikeln auf ihrem Weg von der Streuscheibe zum Dichtsystem durchflogen. Somit ist gewährleistet, dass die Partikel, die auf das Dichtsystem treffen, gleichmäßig mit Öl benetzt sind.



Bild 2.8 Dichtsystem nach Minimalmengenschmierversuch, es sind dicke Partikelablagerungen im Arbeitsraum im Bereich der Dichtstelle zu erkennen

Bild 2.8 zeigt eine Aufnahme der Prüfwelle nach einem ersten Testversuch. Es ist zu erkennen, dass sich die mit dem Öl benetzten Partikel in dicken Schichten auf den Oberflächen im Inneren des Arbeitsraums abgelagert haben. Die Menge an zugeführtem Öl wurde so gewählt, dass möglichst alle Partikel benetzt werden ohne durch zu viel Öl herunter zu fließen. Der Grad der Haftung der Partikel an den Oberflächen war somit maximal. Die Anforderungen an die Dichtsysteme hinsichtlich des Zusetzens der Dichtspalte und der Fressneigung waren dadurch recht hoch. Es zeigte sich aber auch, dass die damit durchzuführenden Versuche einen hohen Zeit- und Kostenaufwand mit sich bringen, da eine mehrfache Verwendung des Messingpulvers nicht möglich ist und die Reinigung des Arbeitsraums recht zeitintensiv ist.

2.5 Partikelzählgerät - LASAIR II

Bei einer großen Zahl von Versuchen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, war eine Aussage über die quantitative Menge an Leckagepartikeln wünschenswert. Hierzu wurde ein Partikelzählgerät der Firma PMT vom Typ LASAIR II 510 ausgewählt und beschafft, siehe Bild 2.9. Dieses Gerät stammt aus der Reinraumtechnik und arbeitet nach dem Prinzip der Laserbeugung.

Das Gerät saugt einen definierten Luftvolumenstrom an und leitet ihn zusammen mit den darin enthaltenen Partikeln durch eine Messzelle. In dieser wird ein Laserstrahl durch die im Luftstrom befindlichen Partikel, abhängig von ihrer Größe, gebeugt. Die gebeugten Laserstrahlimpulse fallen auf sechs verschiedene Detektoren und werden erfasst. Bei dem verwendeten Modell LASAIR II 510 waren so sechs verschiedene Größenklassen detektierbar (0,5 μm ; 0,7 μm ; 1,0 μm ; 2,0 μm ; 5,0 μm und 10,0 μm).



```

Endprobe unbearbeitet
Lasair II
FR_290802_Plexi_Gültig
2002/08/29 11:35:07#1
|| μ ||      Δ ||      Σ ||
|| 0.5 ||    313 ||   3432 ||
|| 0.7 ||    382 ||   3119 ||
|| 1.0 ||    900 ||   2737 ||
|| 2.0 ||   1485 ||   1837 ||
|| 5.0 ||    308 ||    352 ||
|| 10.0 ||    44 ||     44 ||
Mittelw || Min || Max
Druck Kammer mbar
      NaN || NaN || NaN
Druck Nut mbar
      NaN || NaN || NaN
Vol-Strom l/min
      NaN || NaN || NaN
00:01:00 0.028317 cmm
  
```

Ausdruck

Bild 2.9 Partikelzählgerät mit Monitor, Messprotokoll der Messdaten

Es werden jeweils Partikel einer Klasse zugeordnet, die größer oder gleich groß sind wie die Klassenbezeichnung, aber kleiner als die nächst größere Klasse. So werden zum Beispiel alle

Partikel, deren Größe größer / gleich $1\ \mu\text{m}$ und kleiner $2\ \mu\text{m}$ ist, in der Klasse $1\ \mu\text{m}$ gezählt. Die Partikel größer / gleich $2\ \mu\text{m}$ und kleiner $5\ \mu\text{m}$ gehören zu Klasse $2\ \mu\text{m}$. Partikel die größer als $10\ \mu\text{m}$ sind werden alle in der größten Klasse gezählt, Partikel kleiner $0,5\ \mu\text{m}$ können hingegen nicht erfasst werden.

Zusätzlich zu der Anzahl der Partikel und den einzelnen Größenklassen können mit dem Messgerät noch bis zu 6 analoge Messdaten erfasst und abgespeichert werden. Bei den durchgeführten Versuchen wurde die Luftversorgung und der Druck von zwei Druckaufnehmern aufgezeichnet, Näheres siehe unten.

Die Messdaten wurden nach Beendigung eines Versuchs über den eingebauten Thermodrucker ausgegeben, vgl. Bild 2.9 rechts, oder über eine Ethernet-Verbindung mit Hilfe eines Messrechners und eines Browsers ausgelesen und auf dem Rechner gespeichert.

2.6 Endoskop

Für eine gesonderte Versuchsreihe, bei der die Vorgänge im Dichtsystem beobachtet werden sollten wurde ein Endoskop der Firma Classen eingesetzt. Es handelte sich hierbei um ein starres Endoskop mit einem Durchmesser von $3\ \text{mm}$ und einer Länge von $190\ \text{mm}$. Es wurde von außen in den Arbeitsraum der Versuchseinrichtung eingebracht und erlaubte die Beobachtung der Versuchswelle durch eine Bohrung im Statorteil des Dichtsystems, sowohl während als auch nach einem Versuch.

2.7 Prozessluft

Zur Unterstützung der Dichtwirkung wurde bei einem Teil der Versuche Druckluft in die Dichtsysteme eingeleitet. Die Druckluftversorgung erfolgte über ein Gerät das mittels unterschiedlicher Volumenstromregler einen genau definierten Luftstrom aus dem Hausdruckluftnetz zur Verfügung stellt. Das Gerät verfügt über getrennte Zuluftkanäle mit einem jeweils maximalen Volumenstrom von $0,2$; 2 ; 10 ; 100 und $500\ \text{l/min}$. Bei den meisten Versuchen, die im Rahmen dieser Arbeit beschrieben werden, wurden der Zuluftkanal mit $500\ \text{l/min}$ eingesetzt. Bei den Volumenstromangaben handelt es sich um Normliter, bezogen auf 20°C und einen Luftdruck von $1013\ \text{hPa}$.

2.8 PC-Steuerung der Versuchsparameter und Visualisierung

Zur Regelung und Erfassung der Versuchsparameter wurde ein PC mit zwei Multifunktions-Messwerterfassungskarten der Firma National Instruments beschafft. Die eingesetzte Software war LabVIEW 6i ebenfalls von der Firma National Instruments. Der PC hatte zum einen die Aufgabe, die verschiedenen Ist-Messwerte aufzubereiten, zu visualisieren und abzuspeichern. Zum anderen wurde im Bereich der Regelung die Sollwertvorgabe für die Luftversorgung und die Ausgabe der Versuchsparameter an das Partikelzählgerät umgesetzt. Das Partikelzählgerät zeichnete diese Versuchsparameter zusammen mit den detektierten Partikelzahlen auf.

Die nachfolgend aufgeführten Messgrößen wurden mittels des Rechners erfasst bzw. geregelt:

Drehzahl

Die Drehzahlvorgabe der Spindel erfolgte über die Prüfstandssteuerung in Form eines konstanten Wertes bzw. bei Drehzahlrampen oder variablen Drehzahlen über einen programmierbaren Sollwertgeber.

Luftvolumenstrom

Der Luftvolumenstrom, der in das Versuchslichtsystem geleitet wurde, konnte entweder manuell am Luftdurchsatzregler eingestellt oder automatisiert vom Rechner gesteuert werden. Der Ist-Wert wurde vom Luftdurchsatzregler gemessen und vom Rechner auf dem Monitor dargestellt sowie im Rechner und auch im Partikelzählgerät protokolliert.

Luftdruck im Dichtsystem

Der Luftdruck, der sich in der Lufteinleitungsnut des Versuchslichtsystems abhängig vom Luftvolumenstrom und den Drosselspaltabmessungen des Versuchslichtsystems einstellte, wurde mittels eines elektronischen Drucksensors gemessen. Die Signale des Sensors wurden dann im Messprogramm aufbereitet, visualisiert und vom PC und vom Partikelzähler gespeichert.

Druck im Arbeitsraum

Der aus dem Versuchslichtsystem in den Arbeitsraum austretende Luftvolumenstrom sorgt für eine Druckerhöhung gegenüber der Umgebung. Dieser Druck im Arbeitsraum wurde ebenfalls gemessen und protokolliert.

Reibmoment

Das Reibmoment eines berührungsfreien Dichtsystems erlaubt eine Aussage über den Verschmutzungszustand der Dichtspalte. Um das Reibmoment zu erfassen, wurde der Prüfstand mit einem aerostatischen Lager ausgestattet, das die Statorteile des Versuchslichtsystems aufnahm. Das aerostatische Lager wurde über einen Kraftsensor abgestützt. Das aus der Stützkraft errechnete Reibmoment wurde im PC protokolliert.

2.9 Partikelanalyse

Die Bestimmung der Partikelmenge die in das Dichtsystem eingedrungen sind sowie derer, die das Dichtsystem überwinden konnten, diente als Grundlage zur Beurteilung des Abdichtvermögens der untersuchten Dichtsysteme. Durch gezielte Variation der Geometrie der Dichtsysteme sowie der Betriebsbedingungen sollten die Dichtmechanismen bestimmt werden, die bei der Partikel- bzw. Staubabdichtung relevant sind.

Eine optische Auswertung der Leckage hinter dem Dichtsystem liefert nur eine grobe Aussage. Die Leckage fällt nicht in Form von Tropfen an, die aufgefangen werden können, wie dies etwa bei Flüssigkeiten der Fall ist, sondern die einzelnen Partikel lagern sich an den Wänden des Lagerraums ab. Die Menge an Partikeln, die das Dichtsystem passieren müssen um eine

deutlich erkennbare Partikelschicht im Lagerraum entstehen zu lassen, ist so groß, dass dies nur bei extrem ungünstigen Dichtsystemen bzw. Betriebsbedingungen der Fall war.

Eine quantitative Aussage z.B. durch Auswiegen der Leckagepartikelmenge war ebenfalls nicht möglich, da die Partikel zum Teil mit hohen Geschwindigkeiten aus dem Dichtsystem ausgetreten sind und sich anschließend im gesamten Lagerraum verteilt und abgelagert hatten. Zur gravimetrischen Bestimmung der Leckagepartikelmenge wäre es notwendig gewesen, den gesamten Lagerraum zu Spülen, das Spülmedium aufzufangen, die Partikel abzufiltern, zu trocknen und anschließend zu wiegen.

Diese Prozedur hätte den Versuchsaufwand drastisch erhöht und eine 100% Erfassung der Leckagepartikel wäre dennoch nicht möglich gewesen. Es wurde daher nach anderen Methoden gesucht um das Abdichtvermögen der einzelnen Dichtsysteme beurteilen zu können.

2.9.1 Visuelle, qualitative Auswertung

Bevor die Partikel das Dichtsystem passieren und als Leckagepartikel im Lagerraum in Erscheinung treten können müssen sie in die Dichtspalte der Dichtsysteme eindringen.

Durch die Betrachtung der Welle und des Stators eines Dichtsystems, das über einen gewissen Zeitraum mit Partikeln beaufschlagt wurde, ist eine qualitative Beurteilung des Eindring- und Ablagerungsverhaltens von Partikeln im Dichtsystem möglich. Die in den Dichtspalt eingedrungenen Partikel werden abgebremst und lagern sich teilweise an den Spaltwänden des Dichtsystems ab, Bild 2.10. Die Stelle, an der sich die Partikel auf der Welle und dem Stator ablagern, ermöglicht die Beurteilung der Abbrems- und Ausblaswirkung etwaiger Luftströmungen im Dichtspalt. Als Ablagerungsgrenze wird derjenige Betriebsbereich des Dichtsystems bezeichnet, bei dem sich nur im ersten Teil des arbeitsraumseitigen Dichtspaltes Partikel abgelagert haben.

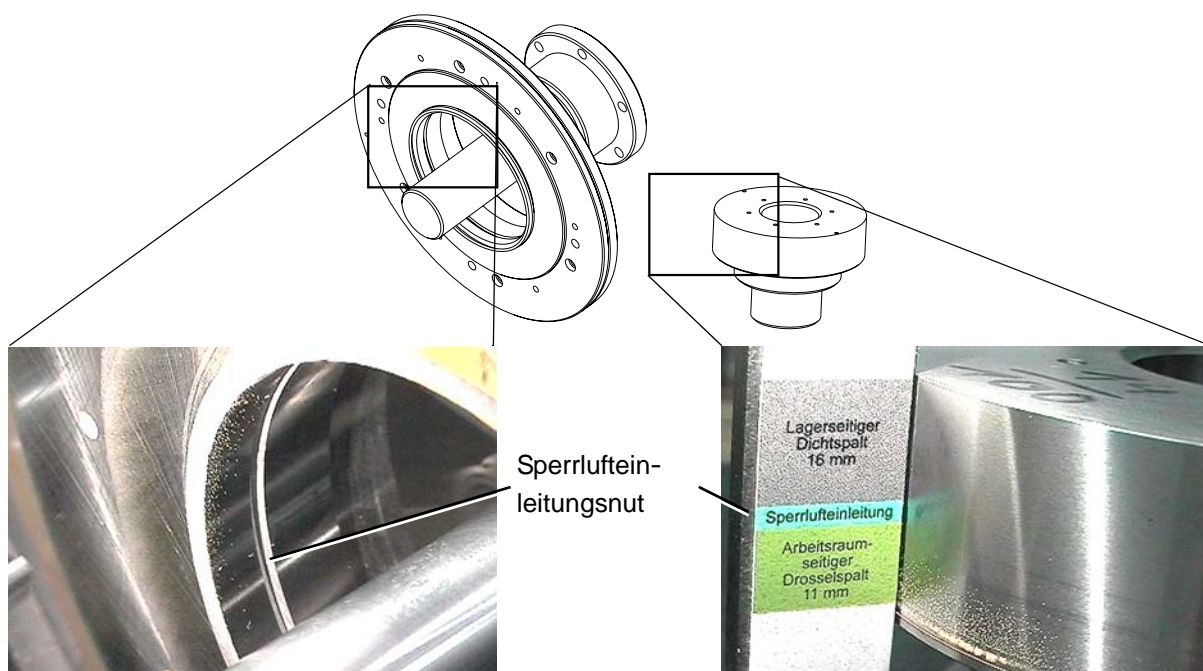


Bild 2.10 Stator und Welle mit anhaftenden Partikeln

2.9.2 Quantitative Auswertung mittels Partikelzähler

Die Leckagebeurteilung mit rein visuellen Mitteln ist nur in einem sehr begrenzten Rahmen möglich. Sie bedingt durch den hohen Aufwand durch Montage, die lange Versuchszeit, bis sich genügend Partikel im Dichtsystem abgelagert haben, die Demontage, fotografische Dokumentation der Oberflächen und der anschließenden Reinigung der Dichtsysteme, sehr hohe Versuchszeiten und liefert nur qualitative Ergebnisse.

Durch den Einsatz eines Partikelzählgeräts, siehe Kapitel 2.5, waren schnelle, quantitative Aussagen möglich. Das Partikelzählgerät verfügt über einen Schlauch, durch den es einen definierten Luftstrom von einer beliebigen Probenentnahmestelle absaugt. Dieser Schlauch wurde im Lagerraum ca. 1-2 mm hinter dem Dichtspalt des Dichtsystems positioniert. Der Schlauch hatte einen Innendurchmesser von 10 mm und überdeckte somit auch 10 mm des Dichtspaltes der untersuchten Dichtungen. Das Schlauchende wurde so positioniert, dass es der Partikelstreueinrichtung in gerader Linie gegenüber lag. Durch diese Anordnung war sichergestellt, dass der Schlauch an der Position hinter dem Dichtsystem angeordnet ist, an dem mit der größten Partikelleckage zu rechnen ist. Damit erfasste das Partikelzählgerät alle Partikel, die den Dichtspalt auf einem Kreissegment von 10 mm verlassen.

Die Messwerte in Form von Partikelanzahl und Größenklasse erlaubte eine qualitative Aussage über den Betriebszustand und damit verbunden das Abdichtverhalten der untersuchten Dichtsysteme. Diese Zahlenwerte wurden gespeichert und mit Excel in Form von Diagrammen dargestellt. Die Auswertung der Partikelanzahlen wird in Kapitel 3.3 noch eingehender beschrieben.

3 Versuchsdichtsystem - Dichtsystemkomponenten

Die grundlegenden Untersuchungen zum Verständnis des Abdichtverhaltens von berührungsfreien Wellendichtungen bei Staubbeaufschlagung wurden mit einem Dichtsystem durchgeführt, das nach dem Baukastenprinzip aufgebaut ist. Durch dieses Baukastenprinzip ließen sich einzelne Gestaltungsparameter getrennt voneinander untersuchen.

3.1 Komponenten der Dichtsysteme

Im Wesentlichen besteht das modulare Dichtsystem aus der Hauptwelle (1), der Lager- und der Bespritzungsscheibe (4, 5) sowie einer Prüfwellen (6) und optional einer Schleuderscheibe (7). Die einzelnen Komponenten des Baukastens sind in Bild 3.1 als Explosionsdarstellung gezeigt, spezielle Erweiterungen werden in den jeweiligen Kapiteln erläutert.

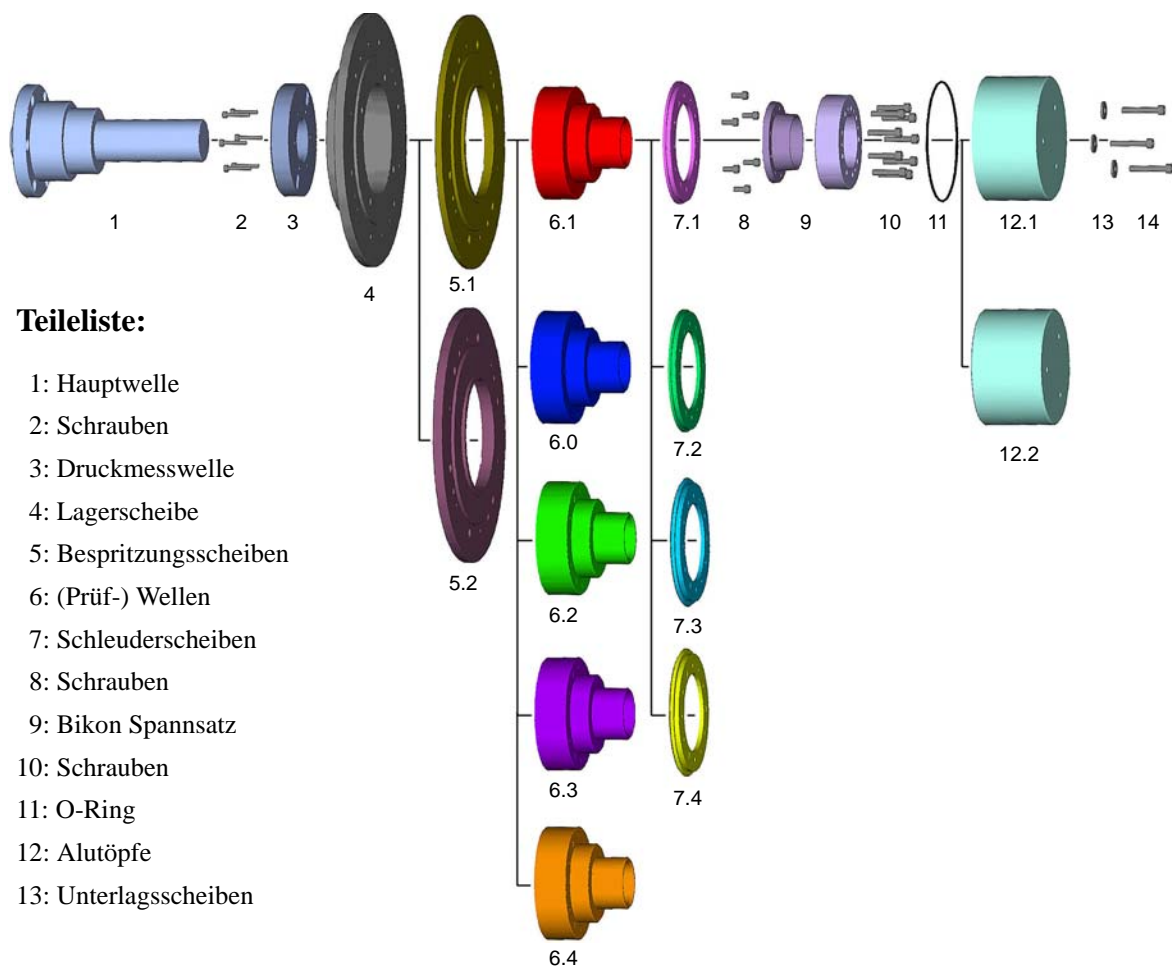


Bild 3.1 Komponenten des untersuchten Dichtsystembaukastens

Die Hauptwelle (1) wird an die Hauptspindel des Prüfstandes angeflanscht. Zu ihr werden die Lagerscheibe (4) und eine Bespritzungsscheibe (5) konzentrisch ausgerichtet. Diese beiden Scheiben bilden den Statorteil des Dichtsystems.

Für die Versuche wird auf die Hauptwelle eine der fünf Prüfwellen (6) zusammen mit der Druckmesswelle (3) aufgesteckt und mit Hilfe eines Bikon Spannsatzes (9) auf der Hauptwelle befestigt, siehe Bild 3.2. Die aufgesteckte Prüfwelle wird im Folgenden Welle genannt. Die fünf Wellen unterscheiden sich in ihrem Außendurchmesser (Nenndurchmesser $D = 120$ mm) und erlauben so die Variation der Spalthöhe h des Dichtsystems in den folgenden Stufen:

TABELLE 3.1 Realisierbare Spalthöhen h

Wellen Nr.	Spalthöhe h [mm]
1	0,14
0	0,11
2	0,09
3	0,06
4	0,04

Bild 3.2 zeigt das komplette Dichtsystem im montierten Zustand am Beispiel eines Aufbaus mit Welle 1 und einem überdeckten Stirnflächenspalt durch eine Schleuderscheibe, vgl. Bild 3.5, Variante E.

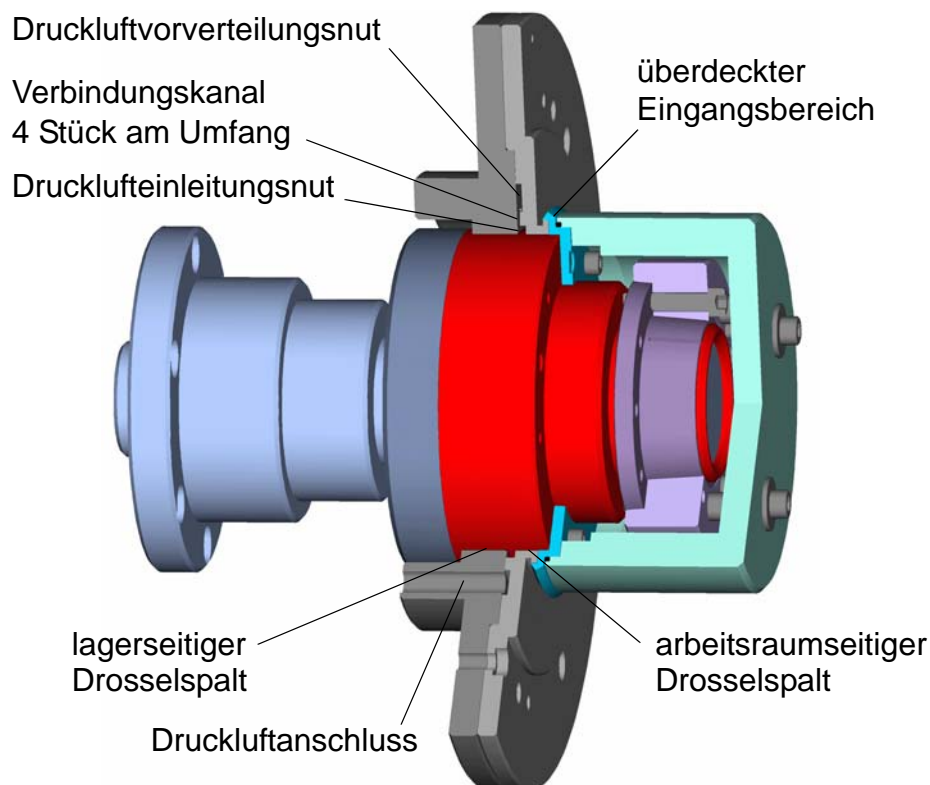


Bild 3.2 Komplettes Dichtsystem im Halbschnitt

Die für die Dichtwirkung wichtigsten Elemente sind in Bild 3.2 bezeichnet. Der eigentliche Dichtspalt besteht aus zwei zylindrischen Ringspalten und einer Überdeckung durch die Schleuderscheibe. Zwischen den beiden zylindrischen Ringspalten kann Druckluft eingeleitet werden, die dann durch den lagerseitigen bzw. arbeitsraumseitigen Ring- bzw. Drosselspalt abströmt. Die Druckluft wird über den Druckluftanschluss eingespeist und über die Druckluftvorverteilungsnut, vier Verbindungskanäle und schließlich durch die Drucklufteinleitungsnut gleichmäßig am gesamten Umfang verteilt.

Bereits bei den allerersten Versuchen zeigte sich, dass Partikel in die Spalten, Bohrungen und Gewinde des Bikon Spannsatzes (9) eindringen und die Demontage des Spannsatzes fast unmöglich machen. Deshalb wurde der jeweilige Spannsatz durch Alutöpfe (12) gekapselt.

3.2 Wirkungsweise von Sperrluftdichtungen

Die in das Dichtsystem eingeleitete Druckluft strömt durch die oben erwähnten Dichtspalte aus dem Inneren des Dichtsystems nach außen ab und wirkt dadurch als ein Sperrgas für eindringende Medien. Aufgrund dieser Sperrwirkung wird sie auch als Sperrluft bezeichnet. Dieser besondere Typ der berührungsfreien Dichtungen wird im Bereich der Dichtungstechnik sowie in der vorliegenden Arbeit als Sperrluftdichtung bezeichnet. Der Aufbau einer Sperrluftdichtung ist in Bild 3.3 anhand eines Spindel-Lager-Systems beispielhaft dargestellt.

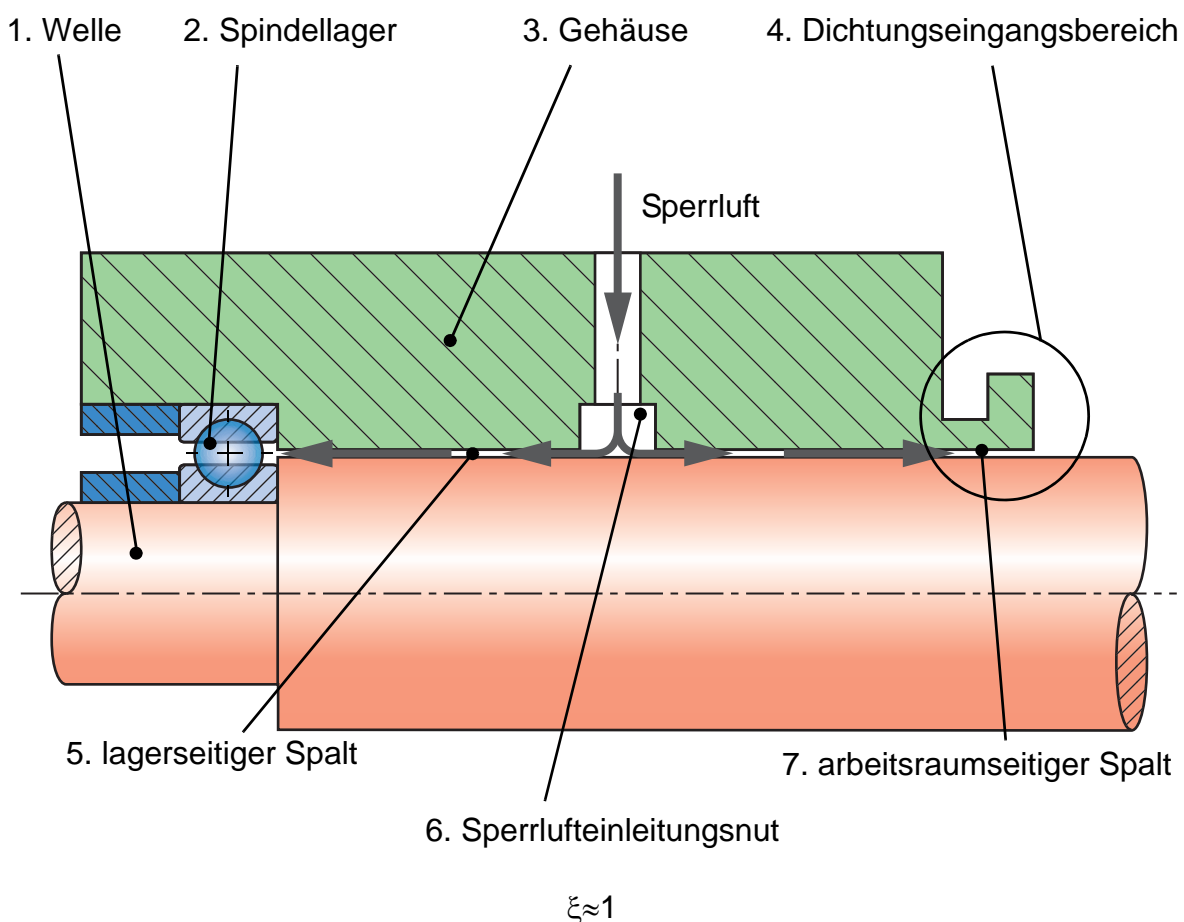


Bild 3.3 Prinzipieller Aufbau einer Sperrluftdichtung, Variante ①

Sperrluftdichtsysteme bestehen im Wesentlichen aus Drosselspalten und einer umlaufenden Sperrlufteinleitungsnut (6), durch welche die Sperrluft gleichmäßig am Umfang verteilt wird. Die Luft strömt auf beiden Seiten der Nut ab. Zum einen strömt sie durch den lagerseitigen Spalt (5) durch das Spindellager (2) und über das Gehäuse (3) ins Freie. Zum anderen strömt sie durch den eigentlichen Dichtspalt, den arbeitsraumseitigen Spalt (7), auf der Beaufschlagungs- bzw. Bespritzungsseite in den Arbeitsraum. Der Luftdruck im System ist somit in der Sperrlufteinleitungsnut am größten. Er fällt auf beiden Seiten der Nut im Drosselspalt ab. Der durch den Luftstrom \dot{V} aufgebaute Sperrluftdruck p hängt vom Drosselwiderstand des Spaltes ab, der seinerseits abhängig von der Geometrie ist. Die Spalthöhe h geht dabei in der dritten Potenz ein, der Durchmesser und die Länge beeinflussen hingegen nur linear. Die Spalthöhe h gebräuchlicher Sperrluftdichtsysteme liegt im Bereich zwischen 0,03 mm und 0,2 mm. Bild 3.4 zeigt Gestaltungsvarianten des Dichtungseingangsbereiches. Variante ③ hat sich bei der Flüssigkeitsabdichtung am besten bewährt /13/.

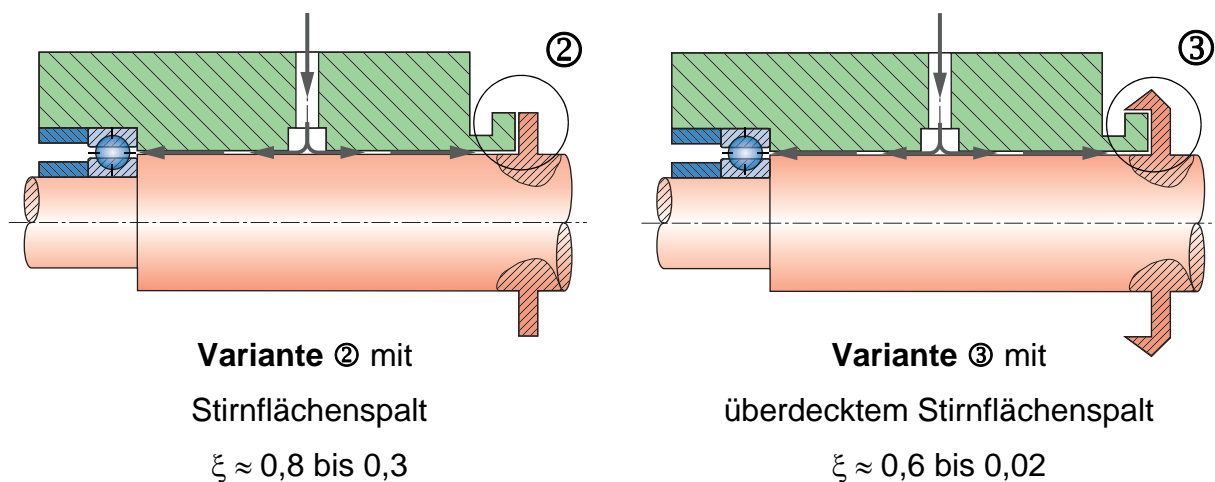


Bild 3.4 Prinzipdarstellung der Varianten ② und ③ des Dichtungseingangsbereichs

Bei der Variante ② wird der lagerseitige, axiale Drosselspalt noch durch einen um 90° abgewinkelten Spaltteil abgeschlossen. Dieser Spaltteil wird als Stirnflächenspalt bezeichnet. Schließt sich an den Stirnflächenspalt noch eine weitere Spaltumlenkung um 90° an, gemäß Variante ③, spricht man von einem Dichtsystem mit überdecktem Stirnflächenspalt.

Bisherige Untersuchungen von Sperrluftdichtsystemen wurden mit Flüssigkeiten wie z.B. mit Kühlschmierstoff oder dünnflüssigen Ölen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde folgender Zusammenhang zwischen erforderlichem Sperrluftdruck p und der Gestaltung des Eingangsbereiches gefunden, /13/:

$$p \geq \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_F^2 \quad (\text{Gl. 3.1})$$

ξ ist hierbei eine Funktion die vom Dichtungseingangsbereich abhängig ist, ρ steht für die Dichte und v_F für die Geschwindigkeit des anspritzenden Fluides.

Ist $\xi \approx 0,02$ (Variante ③) anstatt $\xi \approx 1,0$ (offener Eingangsbereich), so kann der Sperrluftdruck p und damit der Sperrluftstrom \dot{V} bei gleicher Dichtwirkung um bis zu 98% verringert werden.

Um die Varianten ① bis ③ des Dichtungseingangsbereiches experimentell untersuchen zu können, stehen bei dem Dichtsystembaukasten gemäß Bild 3.1 vier Schleuderscheiben zur Auswahl. Zwei Scheiben bilden einen Stirnflächenspalt und zwei Scheiben einen überdeckten Stirnflächenspalt. Ohne Schleuderscheibe erhält man einen glatten, zylindrischen Ringspalt mit offenem Eingangsbereich. In Bild 3.5 sind die somit fünf möglichen Varianten dargestellt.

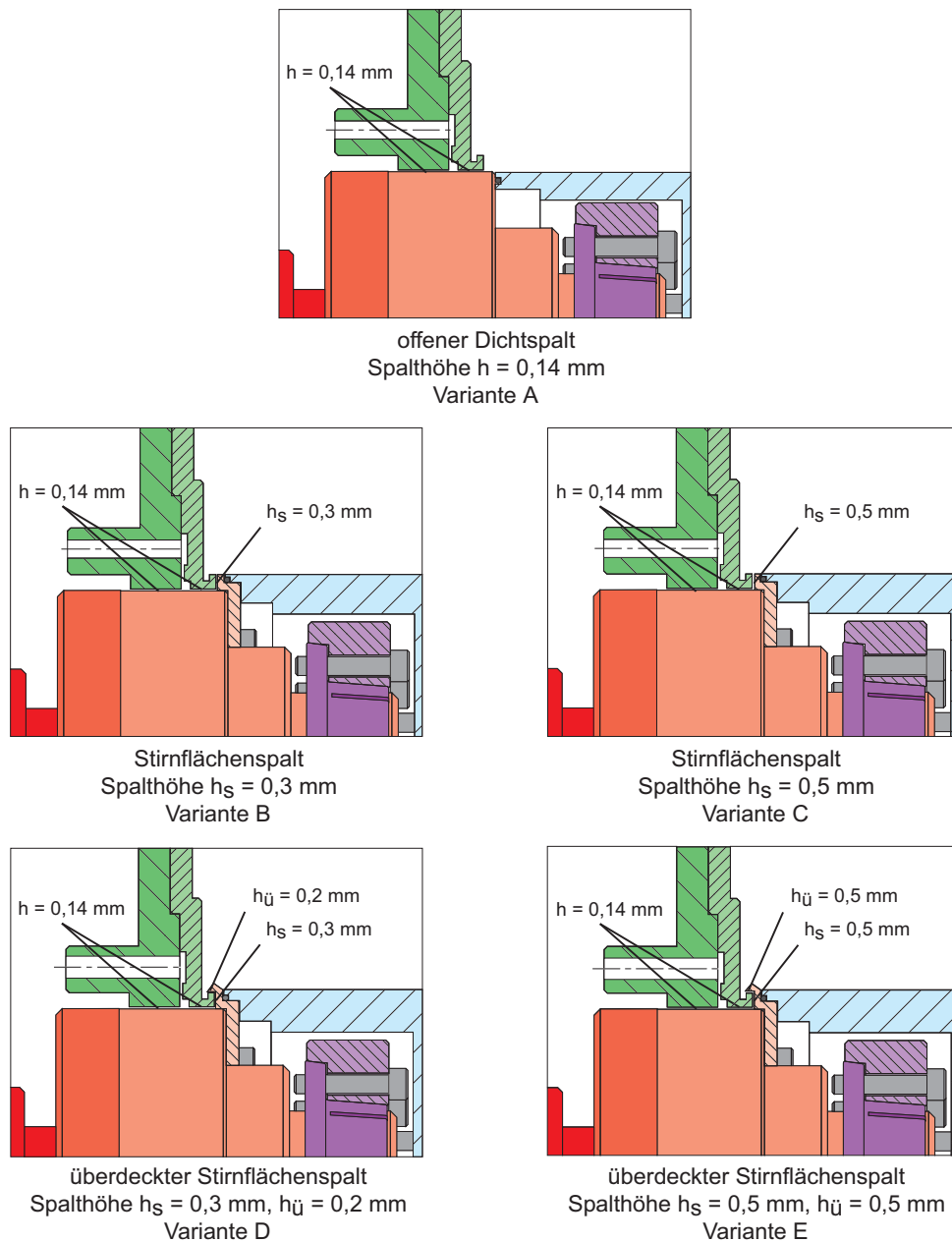


Bild 3.5 Untersuchte Varianten des Dichtungseingangsbereiches

3.3 Lagergefährdung durch Partikeleintrag

Bei den meisten technischen Anwendungen berührungsfreier Dichtungen dienen diese unmittelbar dem Schutz von Wälzlagern vor Medien aus der Umgebung. Um die Wirksamkeit der hier untersuchten Lichtsysteme beurteilen zu können, ist die Kenntnis des Schädigungspotenzials von Partikeln in Lagern notwendig.

Feste Verunreinigungen in Form von Partikel werden in der Literatur für ca. 20 % der Wälzlagerausfälle verantwortlich gemacht. Bild 3.6 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Ursachen für Lagerausfälle, /29/. Andere Untersuchungen Sprechen davon, dass bis zu 70 % der Lagerausfälle in engem Zusammenhang mit Verunreinigungen zu sehen sind, /30/.

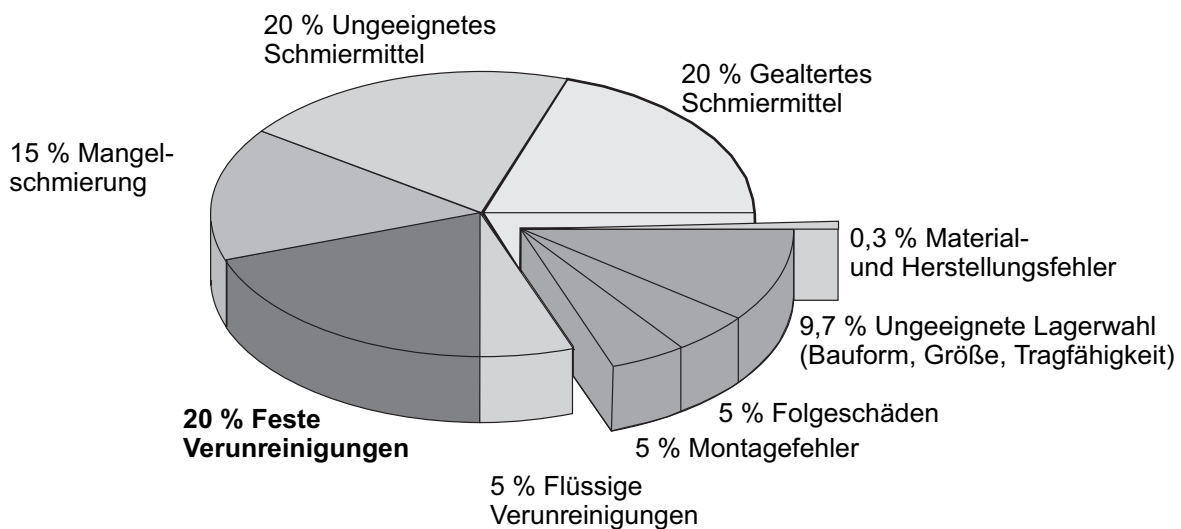


Bild 3.6 Ausfallursachen von Wälzlagern /29/

Für die Schädigung der Lager sind zum einen die Partikelgröße und zum anderen die Partikelhärte ausschlaggebend. Untersuchungen haben gezeigt, dass Partikel in Lagern nur dann zu einer nachhaltigen Schädigung führen, wenn sie größer sind als die Schmierfilmdicke zwischen den Wälzkontaktstellen. Die Schmierfilmdicke liegt im Allgemeinen im Bereich von unter 1 μm , /31/.

TABELLE 3.2 Typische Schmierfilmdicken bei bewegten Maschinenelementen /31/

Maschinenelement	Filmdicken [μm]
Wälzlager	0,1 - 1,0
hydrostatische Gleitlager	0,5 - 100,0
hydrodynamische Gleitlager	1,0 - 25,0
Zahnradpaarungen	0,1 - 1,0
Dichtungen	0,05 - 0,5

Die Größenverhältnisse zwischen Partikeln und Schmierfilmdicke sind in Bild 3.7 veranschaulicht, /32/, /33/. Der Durchmesser eines menschlichen Haares beträgt etwa 60 - 80 μm .

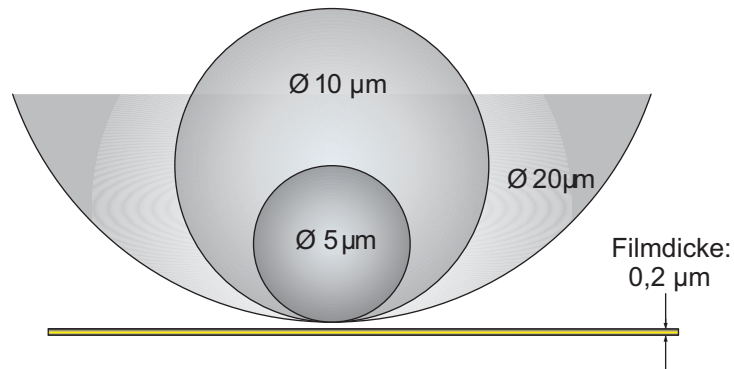


Bild 3.7 Schmierfilmdicke im Verhältnis zur Partikelgröße /32/, /33/

Ist ein Partikel größer als der Schmierfilm kann es zu abrasivem Verschleiß kommen. Als abrasiver Verschleiß oder Furchverschleiß wird eine Zerspanung im Mikrometerbereich bezeichnet. Wenn harte Partikel oder Spitzen eines Reibpartners in die Randschicht der Gegenfläche eindringen entstehen Kratzer, Furchen und Mulden. Voraussetzung für abrasiven Verschleiß ist, dass einer der Kontaktpartner durch den anderen geschädigt wird. Dabei muss das Material des eindringenden Kontaktpartners um das 1,2 fache härter sein als das verschleißende Material. Überschlägig gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{\text{Partikel}} \geq 1,2 \cdot H_{\text{Oberflaeche}} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Dabei ist H_{Partikel} die Härte des Partikels und $H_{\text{Oberflaeche}}$ die Härte der Oberfläche auf die das Partikel wirkt, /34/, /35/.

Überrollte Partikel mit einer entsprechenden Härte führen zu Eindrücken auf den Oberflächen der Lageraufläufen. Die Art der Eindrücke gestaltet sich je nach Härte der Partikel unterschiedlich, wie in Bild 3.8 dargestellt ist.

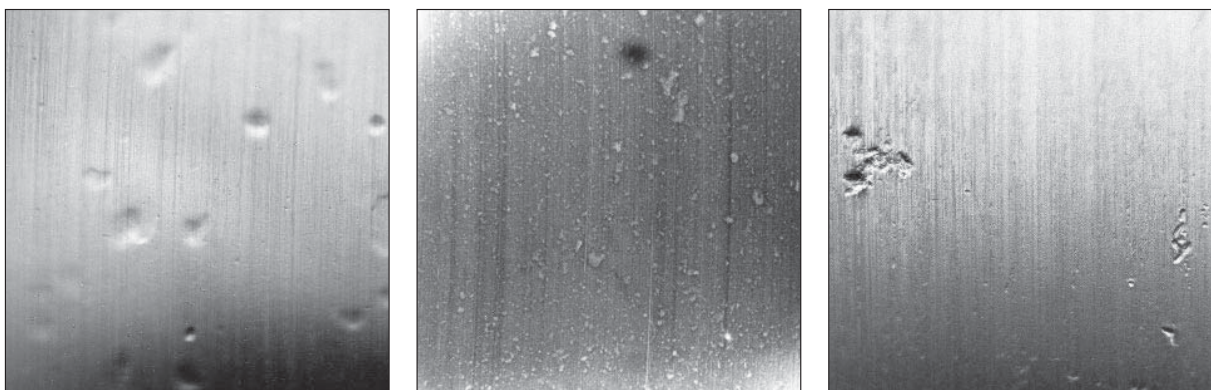


Bild 3.8 Eindrücke von Partikeln, links von relativ weiche Partikel, Mitte von Partikel aus gehärtetem Stahl, rechts von harten, mineralischen Partikel /36/

Aufgrund der durch den Eindruck eines Partikels hervorgerufenen Materialaufwürfe, die über die Laufbahnoberfläche herausragen, kommt es einerseits zu einem ständigen Abriss des Schmierfilmes und andererseits führen die Schäden im Bereich der Eindruckstelle zu einer ört-

lichen Spannungskonzentration und zur Erhöhung der Laufgeräusche der Lager. Die erhöhten Spannungen im Werkstoff führen dann meist weit vor Erreichen der berechneten Lebensdauer zu Ermüdungsschäden, den so genannten Pittings. Im Allgemeinen zeichnet sich der dabei entstehende Schaden durch seine charakteristische Pfeilform aus (V-Pitting), wobei die Spitze des Pfeils den Schädigungsbeginn darstellt und sich in Rollrichtung verbreitert /37/.



Bild 3.9 Durch Fremdkörpereindrücke verursachtes Pitting breiten sich in Überrollrichtung V-förmig aus, links - Schaden zur Zeit der Erkennung, Mitte - Schaden nach ca. 1 000 Betriebsstunden, rechts - Schaden nach ca. 1 200 Betriebsstunden /37/

Die Berechnung der nominellen Lagerlebensdauer ist in der DIN ISO 281 genormt. Seit der Überarbeitung von ISO 281 im Jahre 1990 wurden weitere Erkenntnisse gewonnen, wie sich der Einfluss von Verunreinigungen, Schmierung, inneren Spannungen aufgrund des Einbaus, Spannungen durch Wärmebehandlungen, die Ermüdungsgrenze des Werkstoffs, usw. auf die Lagerlebensdauer auswirken. In ISO 281:1990/A2:2000 wurde ein allgemeines Verfahren angegeben, um diese Einflussfaktoren bei der Berechnung einer erweiterten Lebensdauer für ein Lager zu berücksichtigen. Diese Änderung ist in diese Internationale Norm eingearbeitet; zudem ist auch ein praktisches Verfahren angegeben, wie der Einfluss von Schmierungsbedingungen, Schmierstoffverunreinigungen und Ermüdung des Lagerwerkstoffes auf die Lagerlebensdauer zu berücksichtigen sind, /38/, /39/.

Die Verwendung der nominellen Lebensdauer L_{10} als Kriterium für die Lagerleistung erwies sich viele Jahre hindurch als ausreichend. Dies ist die mit 90 % Zuverlässigkeit erreichbare Lebensdauer bei allgemein verwendeten, hochwertigen Werkstoffen guter Herstellqualität und unter üblichen Betriebsbedingungen.

Für viele Anwendungsfälle ist es jedoch wünschenswert, die Lebensdauer für ein höheres Zuverlässigkeitsniveau und/oder eine genauere Lebensdauerberechnung unter festgelegten Schmierungs- und Verunreinigungsbedingungen zu errechnen. Bei modernem, hochwertigem Lagerstahl wurde festgestellt, dass im Vergleich zur nominellen Lebensdauer L_{10} unter günstigen Betriebsbedingungen und unterhalb einer bestimmten Hertz'schen Kontaktspannung der Wälzkörper sehr lange Lagerlebensdauer erreicht werden können, wenn die Ermüdungsgrenze des Lagerstahls nicht überschritten wird. Andererseits können ungünstige Bedingungen Lebensdauern ergeben, die kürzer als die nominelle Lebensdauer L_{10} sind.

In DIN ISO 281 wurde eine Systemanalyse für die Lebensdauerberechnung eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird der Einfluss von gegenseitig abhängigen Faktoren auf die Lebensdauer des Systems berücksichtigt, indem alle Einflüsse mit der sich ergebenden zusätzlichen Spannung in den Wälzkörperkontakten und unter den Kontaktbereichen in Bezug gesetzt werden.

In dieser Internationalen Norm wird zusätzlich zum Lebensdauerbeiwert für die Zuverlässigkeit a_1 ein Lebensdauerbeiwert, a_{ISO} , auf der Grundlage einer Systemanalyse der Lebensdauerberechnung eingeführt. Diese Faktoren werden in der Gleichung für die erweiterte Lebensdauer eingesetzt, /38/.

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Der Lebensdauerbeiwert für die Zuverlässigkeit, a_1 , ist für einen Bereich von Zuverlässigkeitswerten in DIN ISO 281 angegeben. Das Verfahren zur Bewertung des Lebensdauerbeiwertes für die Systemanalyse a_{ISO} wird im Folgenden genau erläutert.

Neben Lagerart, Ermüdungsbelastung und Lagerbelastung wird für den Lebensdauerbeiwert a_{ISO} in dieser Internationalen Norm der Einfluss

- der Schmierung (Art des Schmierstoffes, Viskosität, Lagerdrehzahl, Lagergröße, Zusätze)
- der Umgebung (Verunreinigungsgrad, Abdichtung)
- der Verunreinigungspartikel (Härte und Teilchengröße im Verhältnis zur Lagergröße, Schmierverfahren, Filtrierung)
- des Einbaus (Sauberkeit beim Einbau, z. B. durch sorgfältiges Spülen und Filtern des zugeführten Öls)

berücksichtigt.

Der Lebensdauerbeiwert a_{ISO} kann abgeleitet werden aus der Gleichung

$$a_{ISO} = f\left(\frac{e_c \cdot C_u}{P}, \kappa\right) \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Verunreinigung und Schmierbedingungen sind durch die Faktoren e_c und κ berücksichtigt. Die Werte für den Lebensdauerbeiwert a_{ISO} der jeweiligen Lagerart wird im Weiteren erläutert. P ist die dynamische äquivalente Belastung und C_u ist die Ermüdungsgrenzbelastung jeweils nach DIN ISO 281 (2006).

Verunreinigungsbeiwert e_c

Wenn der Schmierstoff mit Feststoffpartikeln verunreinigt ist, können beim Überrollen dieser Partikel dauerhafte Eindrücke an der Laufbahn entstehen. An diesen Eindrücken werden örtliche Spannungserhöhungen erzeugt, die zu einer verminderten Lebensdauer des Wälzlagers führen. Diese Lebensdauererminderung auf Grund von Verunreinigungen im Schmierfilm wird durch den Verunreinigungsbeiwert e_c berücksichtigt.

Die durch Feststoffpartikel im Schmierfilm verursachte Lebensdauererminderung ist abhängig von:

- der Art, Größe, Härte und Menge der Partikel
- der Schmierfilmdicke (Viskositätsverhältnis κ)
- der Lagergröße

Richtwerte für den Verunreinigungsbeiwert, mit typischen Verunreinigungsgraden für gut geschmierte Lager sind in Tabelle 3.3 enthalten. Genauere und ausführlichere Richtwerte können aus den Diagrammen oder Gleichungen in Anhang A der DIN ISO 281 (2006) entnommen werden. Diese Werte gelten für ein Gemisch von Partikeln unterschiedlicher Härte und Zähigkeit, in dem die harten Partikel die erweiterte Lebensdauer bestimmen. Sind harte Partikel vorhanden, deren Größe über den zu erwartenden Größen der Reinheitsklassen nach ISO 4406 liegt, so kann die Lagerlebensdauer erheblich kürzer als die berechnete Lebensdauer sein.

Bei starker Verunreinigung ($e_c \rightarrow 0$) kann durch Verschleiß ein Versagen verursacht werden und die Lebensdauer des Lagers kann weit unter der berechneten erweiterten Lebensdauer liegen.

TABELLE 3.3 Verunreinigungsbeiwert e_C nach DIN ISO 281, /38/

Verunreinigungsgrad	e_C	
	$D_{pw} < 100mm$	$D_{pw} \geq 100mm$
Extreme Sauberkeit Partikelgröße der Schmierfilmdicke entsprechend; Laborbedingungen	1	1
Hohe Sauberkeit Öl durch besonders feinen Filter gefiltert; typische Bedingungen bei einem lebenslang geschmierten und abgedichteten Lager	0,8 bis 0,6	0,9 bis 0,8
Normale Sauberkeit Öl durch Feinfilter gefiltert; typische Bedingungen bei einem geschmierten und lebenslang abgedichteten Lager	0,6 bis 0,5	0,8 bis 0,6
Leichte Verunreinigung Leichte Verunreinigung im Schmierstoff	0,5 bis 0,3	0,6 bis 0,4
Typische Verunreinigung Typische Bedingungen bei Lagern ohne fest eingebaute Abdichtung; grobe Filterung; Verschliespartikel und Fremdpartikel aus der Umgebung	0,3 bis 0,1	0,4 bis 0,2
Starke Verunreinigung Lagerumgebung stark verunreinigt und Lageranordnung nicht angemessen abgedichtet	0,1 bis 0	0,1 bis 0
Sehr starke Verunreinigung	0	0

D_{pw} steht hierbei für den Teilkreisdurchmesser des Kugel- oder Rollensatzes, in Millimeter.

Ausführliches Verfahren zur Abschätzung des Verunreinigungsbeiwertes

Das Verfahren aus dem Anhang A von DIN ISO 281 (2006) enthält ein weitergehendes und ausführlicheres Verfahren zur Berechnung des Beiwertes e_C und zeigt zudem in Diagrammen den Wirkungsgrad der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Verunreinigung. Nach der Bestimmung wird der Beiwert e_C zur Berechnung des Lebensdauerbeiwertes nach DIN ISO 281 angewendet.

Die Verunreinigungsfaktoren können entweder anhand von Diagrammen oder Gleichungen für die folgenden Schmierverfahren ermittelt werden:

- Ölumlaufschmierung, wobei das Öl in der Zuleitung vor der Zuführung zum Lager gefiltert wird
- Ölbadschmierung oder Ölumlaufschmierung mit Filtern außerhalb der Zuleitung
- Fettschmierung

In Bild 3.10 ist exemplarisch ein derartiges Diagramm aus der DIN ISO 281 dargestellt.

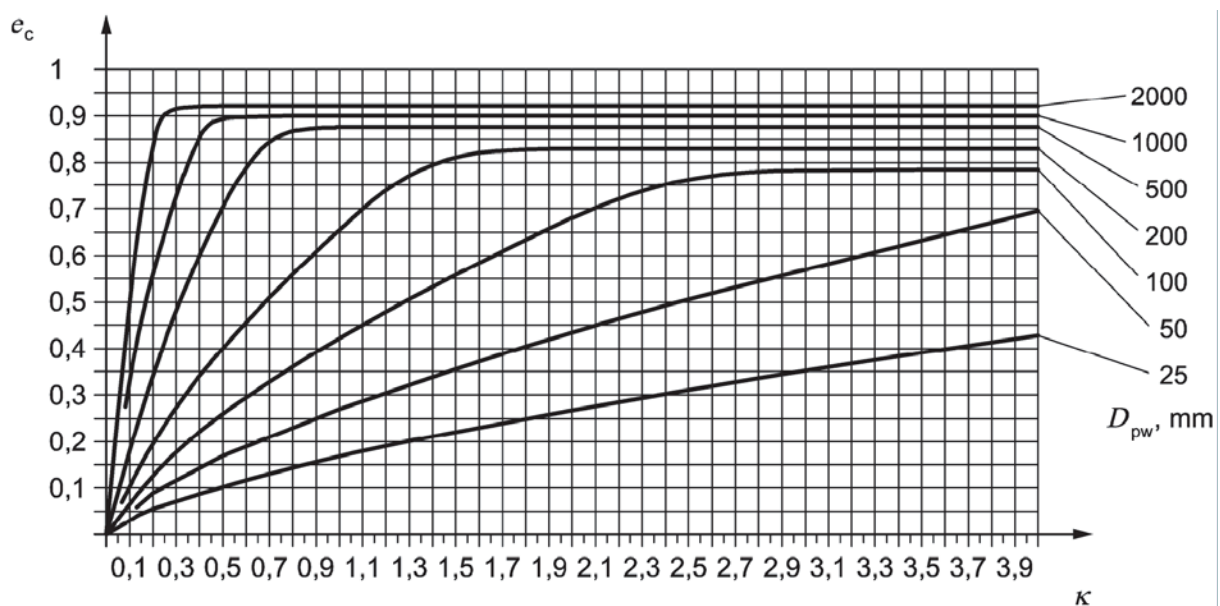


Bild 3.10 Verunreinigungsbeiwert e_c für Ölumlaufschmierung mit Integriertem Filter, Öltreinheitsklasse -/15/12 nach ISO 4406, /38/

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass für einen bestimmten Verschmutzungsgrad der Verunreinigungsbeiwert e_c für kleinere Lagerteilkreisdurchmesser kleiner ausfällt als für ein größeres Lager. Je kleiner die Kontaktfläche, desto schädlicher ist die Wirkung einer bestimmten Partikelgröße. Kleine Lager reagieren also bei gleichem Verschmutzungsgrad empfindlicher als große Lager. Ferner sind Lager mit Punktberührung (Kugellager) empfindlicher als solche mit Linienberührung (Rollenlager).

Bild 3.11 /41/, ist die L_{10} Lebensdauer unterschiedlicher Lagergrößen über der max. Partikelanzahl aufgetragen. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Lebensdauer wesentlich von der Verunreinigung des Schmierstoffes abhängt.

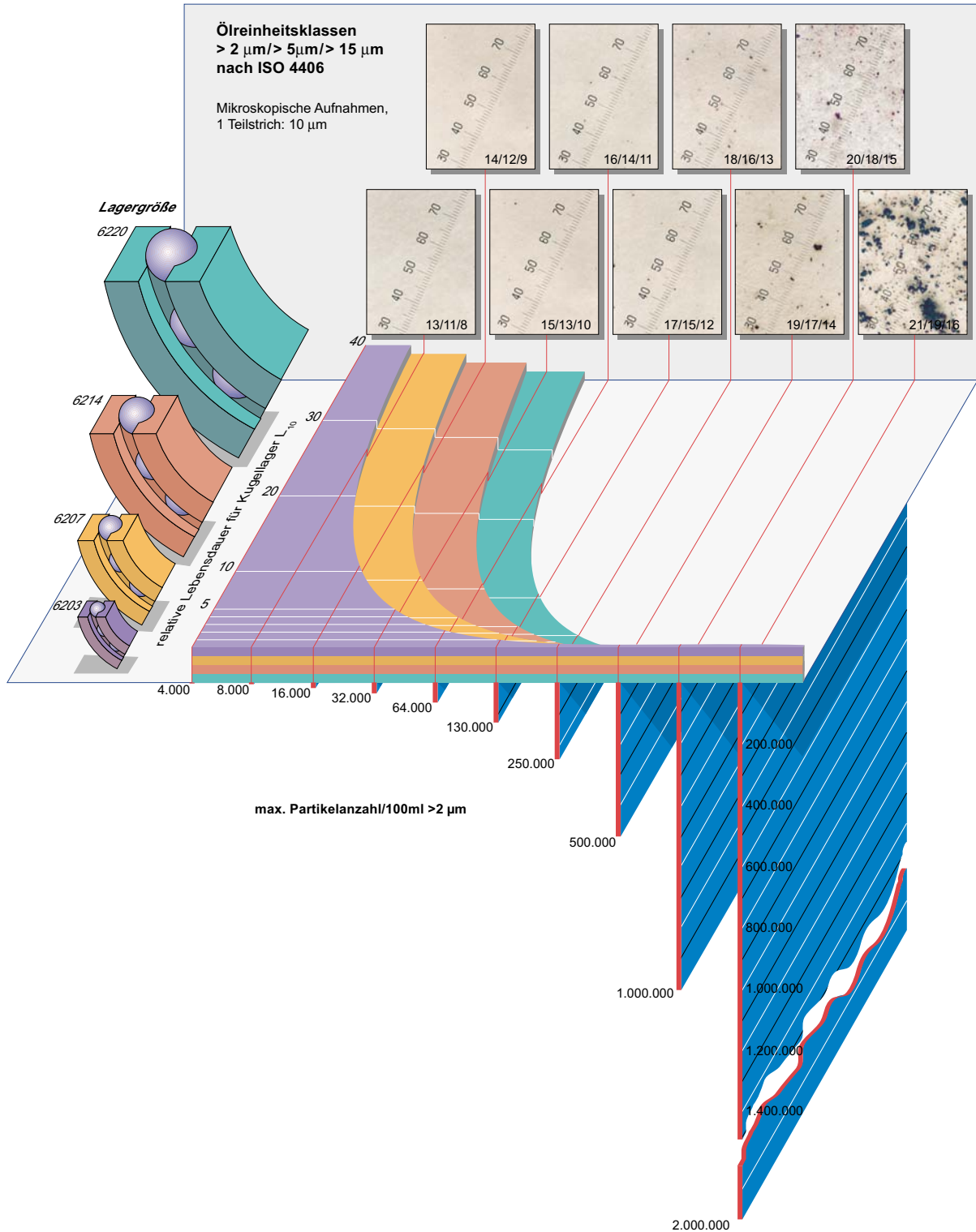


Bild 3.11 Relative Lagerlebensdauer in Abhängigkeit von der Partikelanzahl und Partikelgröße /41/

Bewertung der Ölreinheit

Die Reinheit im Hydrauliköl wird nach der Größe der Partikel und Anzahl der Teilchen einer bestimmten Größenklasse pro 1 ml bzw. 100 ml Öl definiert.

Die gebräuchlichsten Klassifizierungssysteme sind:

- ISO 4406 (1987/1999)
- ISO DIS 4406
- NAS 1638/SAE 4059

Nach diesen Normen wird die Anzahl der Partikel einer bestimmten definierten Größenspanne ermittelt und danach einem Code zugeordnet, /42/.

Bei der Betrachtung der Öleinheit für die Lebensdauerberechnung hat sich die ISO DIS 4406, /40/, bewährt, da diese Klassifizierung eine für die Praxis ausreichende Einstufung vornimmt und eine exaktere Darstellung der Partikelanzahlen enthält.

- Partikel > 15 µm zur Einstufung der Grobverschmutzung
- Partikel > 5 µm zur Einstufung der Feinverschmutzung
- Partikel > 2 µm zur Einstufung der Feinstverschmutzung

In der Praxis war es notwendig und sinnvoll, bei der Bewertung der Öleinheit mittels automatischer Partikelzähler die Feinstverschmutzung zusätzlich zur 5- und 15-µm-Partikelgröße zu definieren. Diese Einstufung erfolgte mit dem 2-µm- Bereich und war bis vor kurzem üblich. Kalibriert wurden dabei die automatischen Partikelzähler nach der ISO 4402. Der überwiegende Teil der Beispiele in dieser Arbeit wird noch nach dieser Einstufung bewertet, /42/.

Im Dez. 1999 wurde die neue Kalibriernorm für automatische Partikelzähler (Bottle sampling), ISO 11171, verabschiedet, die Kalibrierfehler ausräumt, die in der alten Norm festgeschrieben waren. Zum gleichen Zeitpunkt wurde erstmalig die ISO 4406 (1999) in ihrer neuesten Form veröffentlicht.

Für automatische Partikelzähler gilt:

- größer 4 µm (c) (c für zertifiziert) Klassifizierung für Feinstpartikel
- größer 6 µm (c) Klassifizierung für Feinpartikel
- größer 14 µm (c) Klassifizierung für Grobpartikel

Dabei ist zu beachten, dass Bewertungen der Öleinheit mittels mikroskopischer Analysen nach wie vor die Reinheitsklassen 5 µm und 15 µm beibehalten.

Öleinheit

Der ISO-Code bezieht sich auf die Anzahl von Partikeln mit einer Größe von mehr als 4; 6 bzw. 14 µm(c) in 100 ml Probenflüssigkeit.

Zur Bestimmung der ISO-Reinheitsklassen einer Flüssigkeit werden die Ergebnisse der Partikelzählung in einem Diagramm dargestellt. Der entsprechende Codebereich, der auf der linken Seite des Diagramms dargestellt ist, ordnet jeder der drei Partikelgrößen eine bestimmte Codenummer für die Reinheitsklasse zu, siehe Bild 3.12. In der Reinheitsklasse 1 sind demnach zwischen 0 und 1 Partikel in 100 ml Flüssigkeit enthalten. Bei jeder höheren Reinheitsklasse verdoppelt sich jeweils die Anzahl der zulässigen Partikel.

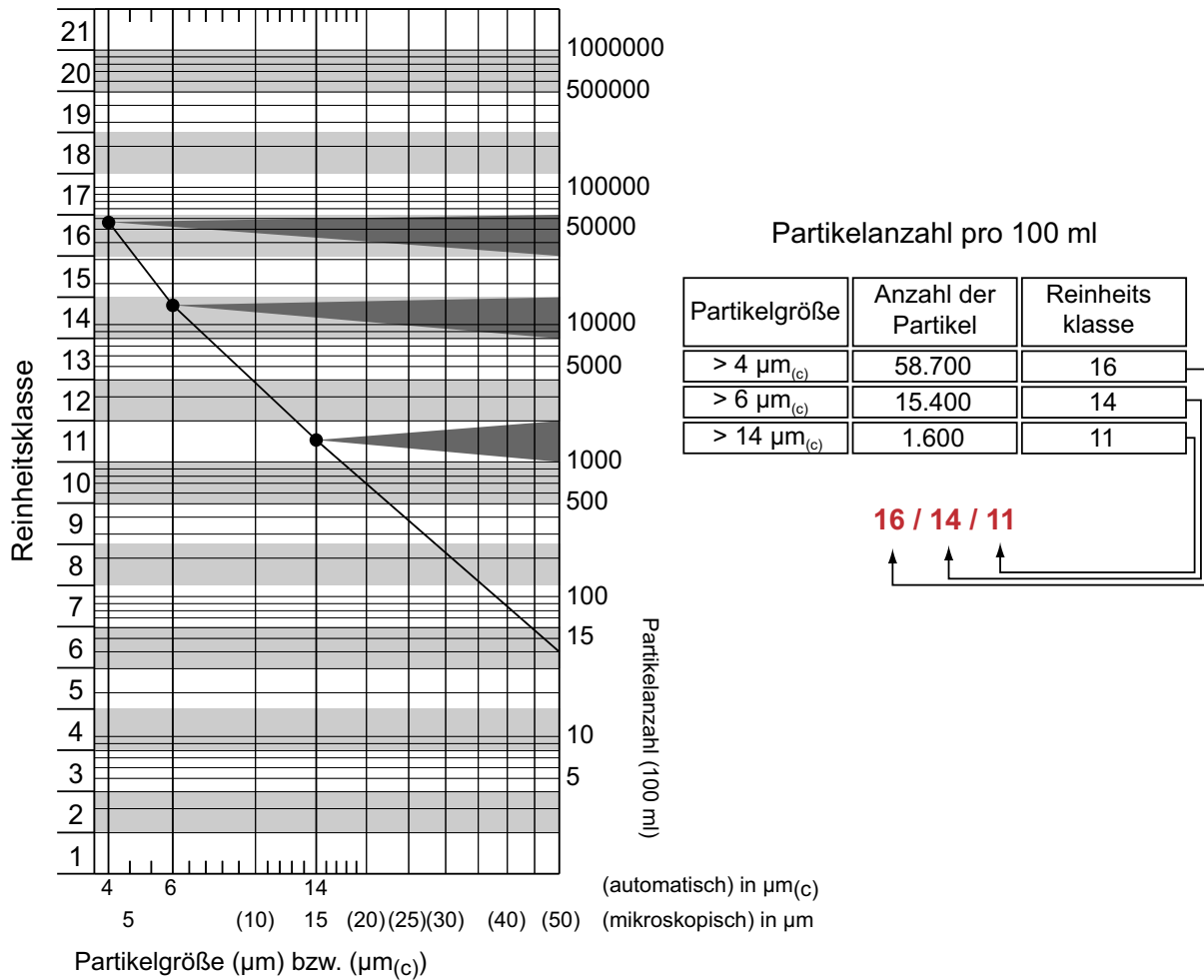


Bild 3.12 Reinheitsklassen nach ISO 4406 (1999) /43/

Dieses logarithmische Diagramm ermöglicht eine graphische Ermittlung der Reinheitsklassen nach ISO 4406. Die erfassten Partikelanzahlen pro 100ml der kumulierenden Partikelgrößen $> 4\mu\text{m}_{(c)}$, $> 6\mu\text{m}_{(c)}$ und $> 14\mu\text{m}_{(c)}$ ($> 5\mu\text{m}$, $> 15\mu\text{m}$ optisch gezählt) werden hierzu in das Diagramm eingetragen. Der jeweilige Reinheitsklassen-Code kann auf der linken Ordinatenachse abgelesen werden. Verbindet man die eingetragenen Punkte miteinander, können die Partikelanzahlen für andere kumulierende Partikelgrößen interpoliert werden.

Die drei Zahlenwerte der Reinheitsklassen werden entsprechend der Reihenfolge der Partikelgrößen $> 4 \mu\text{m}$ / $> 6 \mu\text{m}$ / $> 14 \mu\text{m}$ hintereinander geschrieben und ergeben so den Reinheitscode nach ISO 4406.

Um die Reinheitsklassen auf die hier gemachten Dichtungsuntersuchungen zu übertragen und somit auch die Dichtwirkung besser beurteilen zu können, werden die Anforderungen an das Öl aus der ISO 4406 (1999) auf die gegebenen Luftströme umgerechnet. Die ISO 4406 (1999) geht von einem Ölvolumen von 1 ml aus, in dem eine gewisse Anzahl an Partikeln enthalten ist. Die Vorgängerversion ging noch von einem Ölvolumen von 100 ml aus. Hierbei entsprach die Reinheitsklasse 1 einer Partikelanzahl von 0 bis 1 Partikel. Die nächst höhere Reinheitsklasse enthielt doppelt so viele Partikel. Reinheitsklasse 2 enthielt demnach zwischen 2 und 4 Partikel und so fort. Eine Ölprobe mit 100 Partikeln je 100 ml fiel bei der alten Version in die

Reinheitsklasse 7 mit 64 bis 130 Partikel. Bei der neuen Version der ISO 4406 (1999) wird die Ölmenge auf 1 ml reduziert, d.h. bei einer gleichmäßigen Verteilung der Partikel in der Ölprobe würden auch nur 1/100 der Partikel gezählt werden. Die somit der neuen ISO 4406 definierte Reinheitsklasse ist also ebenfalls die Klasse 7. In der Literatur sind beide Darstellungen, mit Bezug auf 100 ml und mit Bezug auf 1 ml, nach wie vor verbreitet. In dieser Arbeit werden 100 ml als Bezugsgröße verwendet.

Bei dem, im Rahmen der Dichtsystemuntersuchungen eingesetzten Messgerät wird ein Volumenstrom von 28,3 l/min analysiert. Dieser Luftstrom wird aus dem Raum unmittelbar hinter dem Dichtsystem abgesaugt und setzt sich aus einem Luftstrom, der direkt aus dem Dichtspalt entweicht, sowie einem Luftstrom aus dem umgebenden Lagerraum zusammen. Geht man davon aus, dass die Luft im Lagerraum frei von Partikeln ist, kann man den analysierten Luftstrom abschätzen.

Der Sperrluftstrom teilt sich bei gleichen Spalthöhen h im Inneren des Dichtsystems umgekehrt proportional zu den Drosselspalltlängen auf. Im vorliegenden Fall tritt lagerseitig ca. 1/3 des Sperrluftvolumenstroms aus. Dies geschieht gleichmäßig am gesamten Umfang U des Drosselspaltes, der einen Durchmesser von $D = 120$ mm hat. Der Probeentnahmeschlauch hat einen Innendurchmesser von $D_i = 10$ mm und deckt damit nur einen Teil des Drosselspaltes ab. Dieser Teil U_a ergibt sich zu $U_a = 1/37,7$ des Umfangs U .

$$U = 120\text{mm} \cdot \pi = 376,9\text{mm} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

$$U_a = \frac{U}{37,7} = \frac{376,9\text{mm}}{37,7} = 10\text{mm} \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Um auf die Anzahl der Partikel in 100 ml Luft zu kommen, muss also zunächst der Sperrluftstrom aufgeteilt werden, dann mit dem Faktor 37,7 der tatsächlich analysierte Volumenstrom berechnet und danach die Anzahl der Partikel noch durch drei Minuten Messzeit geteilt werden. Ein Beispiel für eine solche Berechnung ist in Bild 3.13 abgedruckt.

Volumenstrom Sperrluft [l/min]	Volumenstrom lagerseitig [l/min]	Volumenstrom analysiert/min [l/min]	Volumenstrom analysiert [l/min]	Partikel gesamt > 5 μm	Partikel pro 100 ml	Code nach ISO 4406
500	166,67	4,42	13,26	707	5	3
450	150,00	3,98	11,94	699	6	3
400	133,33	3,54	10,61	509	5	3
350	116,67	3,09	9,28	455	5	3
300	100,00	2,65	7,96	394	5	3
250	83,33	2,21	6,63	419	6	3
200	66,67	1,77	5,31	218	4	3
150	50,00	1,33	3,98	176	4	3
100	33,33	0,88	2,65	279	11	4
50	16,67	0,44	1,33	1140	86	7
1	0,33	0,01	0,03	2488	9380	14

Bild 3.13 Beispielberechnung: Offener Drosselspalt mit $h = 0,14$ mm, $v_{max} = 39,6$ m/s
Volumenstrom in [l/min]

Mit Hilfe der ISO 4401 Reinheitsklassen Stand 1999 ist es möglich die Dichtsysteme systematisch im Bezug auf ihre Dichtwirkung hin zu vergleichen. Die Menge der Leckagepartikel kann

mit Hilfe der Klassifizierung auch im Hinblick auf ihr Lagergefährdungspotential beurteilt werden. Die Werte der Reinheitsklassen sind somit wesentlich aussagefähiger als die reinen Partikelzahlen an sich.

Die untenstehende Abbildung (Bild 3.14) gibt einen Überblick über die, für eine lange Lebensdauer von Lagern und anderen Schmierölsystemkomponenten, empfohlenen Ölrinheitsklassen, /31/.

Für ein Kugellager mit einem Durchmesser von $D = 120$ mm wird eine Ölrinheit von 14/11/08 nach ISO 4406 (1999) empfohlen, um den verstärkten (sehr hohen) Anforderungen an die Verfügbarkeit und somit Wirtschaftlichkeit einer Werkzeugmaschine gerecht zu werden. Bei normalen Anforderungen an Verfügbarkeit und Belastbarkeit wäre eine Ölrinheit von 16/13/10 ausreichend.

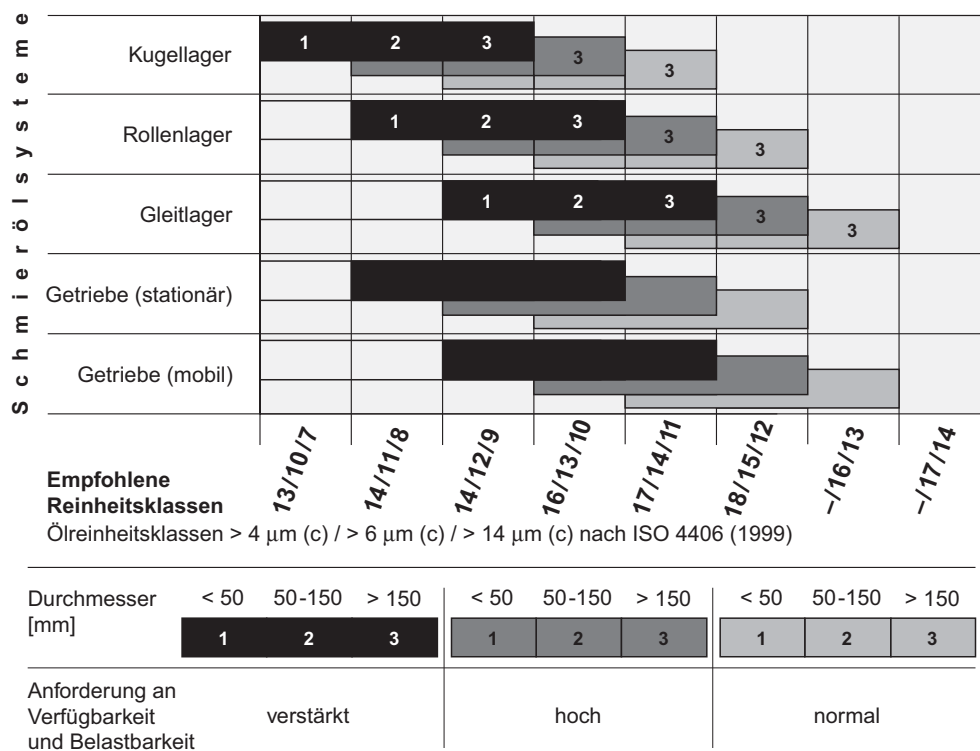


Bild 3.14 Ölrinheitsanforderungen für Antriebskomponenten /31/

In den folgenden Auswertungsdiagrammen zur Partikelleckage in Anlehnung an die ISO 4406 (1999) wird die Reinheitsklasse 8 als unkritische Verschmutzung angesehen und wird aus diesem Grunde in den Diagrammen durch eine dicke Linie gekennzeichnet.

4 Experimenteller Teil

Die Mechanismen, die bei der Abdichtung flüssiger Medien mit berührungsfreien Dichtsystemen relevant sind, sind in den letzten 20 Jahren ausgiebig erforscht worden. Ausgehend von diesen Forschungsergebnissen wurden die Dichtsysteme stetig weiterentwickelt und haben jetzt einen Stand der Forschung erreicht, der es erlaubt ihre Möglichkeiten und Grenzen sicher abzuschätzen.

Bei Partikeln bzw. staubförmigen Medien muss davon ausgegangen werden, dass diese oben erwähnten Erkenntnisse für flüssige Medien nicht oder nur teilweise auf staubförmige Medien übertragbar sind. Bei der Beaufschlagung mit Partikeln handelt es sich um einzelne Teilchen, die nicht durch Anziehungskräfte miteinander verbunden sind, wie dies etwa bei Flüssigkeitsmolekülen der Fall ist. Ferner ist es auch fraglich, ob bei der Partikelabdichtung die Fliehkraft einen ähnlich großen Einfluss besitzt wie bei der Flüssigkeitsabdichtung. Flüssigkeiten die sich in radialen Spaltteilen befinden, rotieren mit der Welle mit und erfahren dadurch eine Fliehkraft, die sie nach außen aus dem Spalt heraus treibt.

Für die richtige Auslegung und Gestaltung von berührungsfreien Dichtsystemen zur Partikelabdichtung sind folglich zunächst einmal Kenntnisse über das Eindring- sowie das Ablagerungsverhalten von Partikeln in engen Spalten notwendig.

4.1 Partikel im Parallelspalt

Eine erste Versuchsreihe sollte das Eindringverhalten von Partikeln in enge Spalte klären. Ziel war es beurteilen zu können ob und wenn ja, wie weit Partikel in Spalte eindringen. Weiterhin galt es zu untersuchen ob und wie dieses Eindringen von Parametern wie Spaltrichtung und Partikelflugrichtung abhängig ist.

Die einfachste Spaltform stellt ein paralleler Spalt mit fixen, nicht relativ zueinander bewegten Spaltwänden dar. Um derartige Spalte untersuchen zu können wurden Spalte zwischen 50 x 50 mm großen Glasplatten hergestellt. Die Glasplatten wurden mit schmalen Streifen aus verschieden dicken Metallfolien auf Abstand gebracht und verklebt. Ein transparenter Klebestreifen verhinderte ein Eindringen der Partikel von hinten. Die Metallfolien hatten Dicken von 0,02 mm, 0,08 mm bzw. 0,15 mm. Die damit entstandenen Spalthöhen lagen durch den Klebstoff meist zwischen 0,03 mm und 0,06 mm über den Dicken der Metallfolien. Die Glasplatten mit dem gebildeten Spalt wurden in drei verschiedenen Raumlagen mit einem Halter in der Prüfkammer angeordnet und mit Partikeln beaufschlagt, siehe Bild 4.1.

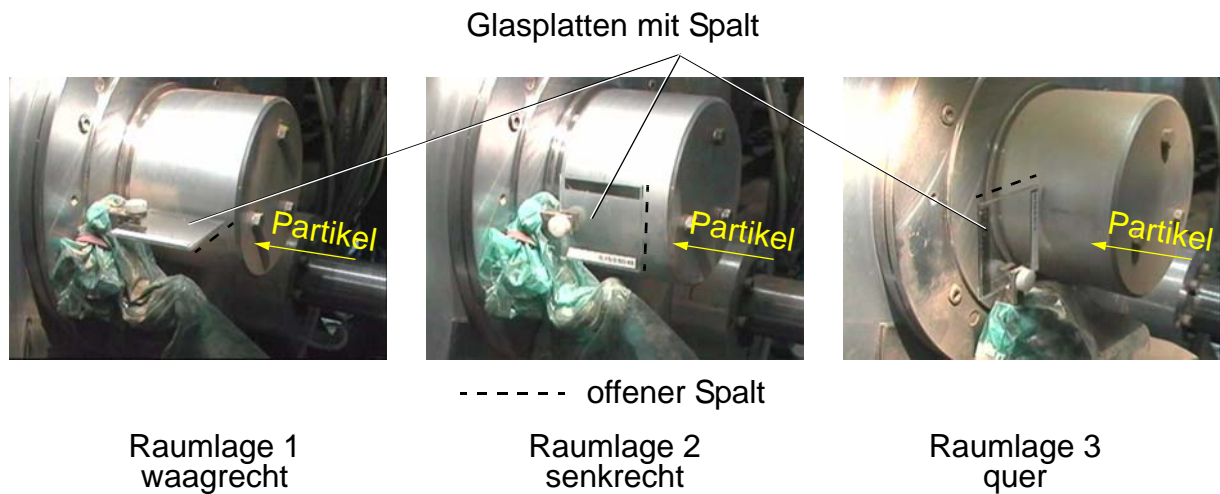


Bild 4.1 Einbau der Glasplatten in den drei Raumlagen

Die Beaufschlagung erfolgte mit 3 g Partikeln pro Sekunde sowohl trocken als auch in Verbindung mit der MMS-Beaufschlagungseinheit mit öligen Partikeln - im Folgenden als „ölig“ bezeichnet. Die Dauer der Beaufschlagung betrug 30 s bzw. 120 s, die maximale Partikelgeschwindigkeit betrug 28 m/s. Die Proben wurden anschließend an der Außenseite gereinigt und fotografiert. Zum Teil wurde der Ablauf der Beaufschlagung auch gefilmt, insbesondere um das Entstehen von Ablagerungen zu beobachten.

4.1.1 Versuche bei Raumlage 1

Bild 4.2 zeigt einen Satz der eingebauten Glasplatten mit dazwischen gebildetem Spalt in Raumlage 1 während der Beaufschlagung mit trockenem Partikeln. Die Glasplatten sind hierbei horizontal eingebaut, der offene Spalt ist in Richtung der Partikelquelle gerichtet.



Bild 4.2 Glasplatten während der Partikelbeaufschlagung in Raumlage 1

Bild 4.3 zeigt das Ergebnis eines Versuchs mit trockenen Partikeln und einer Spalthöhe von $h = 0,08$ mm nach 120 s, der offene Spalt befindet sich rechts. Partikel sind in den Spalt eingedrungen und haben sich dort abgelagert. In einer Entfernung von ca. 10 - 20 mm vom Spalteingang wurde der Spalt ganz mit Partikeln zugesetzt und es bildete sich eine Art Barriere, die den Spaltquerschnitt verschließt.

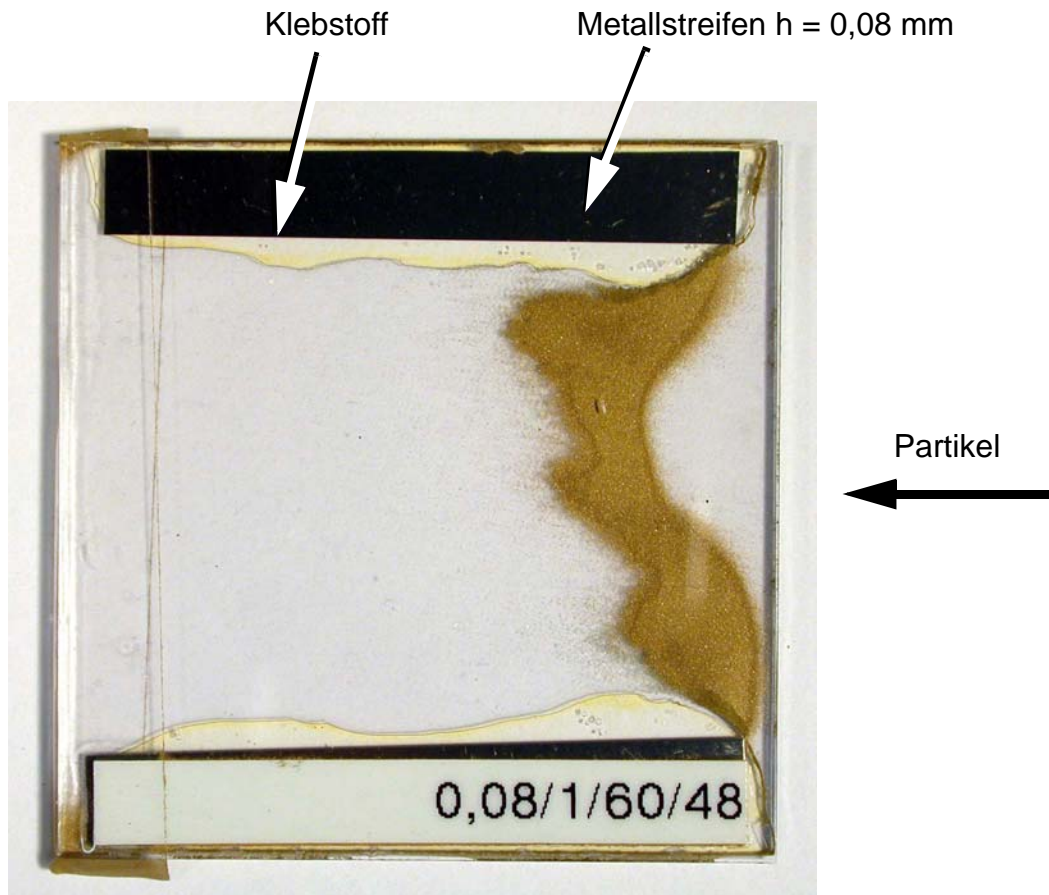


Bild 4.3 Aufnahme der Glasplatten, 50x50 mm , Raumlage 1, $h = 0,08$ mm, 120 s

Die Partikelgrenze verläuft unregelmäßig, was darauf schließen lässt, dass die Entstehung der Barriere von zufälligen Punkten ausgeht. Bleibt ein Partikel hängen, prallen nachfolgende auf, verlieren durch den Stoß ihre kinetische Energie und bilden so nach und nach eine geschlossene Linie.

Bei genauerer Betrachtung des Spaltes ist zu erkennen, dass einzelne Partikel auch weiter in den Spalt eingedrungen sind. Ohne den Klebestreifen, der den Spalt nach hinten abschließt, hätten einige wenige Partikel den Spalt ganz durchquert.

In Bild 4.4 obere Reihe, ist eine Wiederholung des Versuchs bei unterschiedlichen Spalthöhen dargestellt, links $h = 0,02$ mm, Mitte $h = 0,08$ mm und rechts $h = 0,15$ mm. Das Ergebnis ist prinzipiell gleich. Bei engerem Spalt dringen insgesamt weniger Partikel ein und diese auch weniger weit als bei höheren Spalten. In der unteren Reihe ist ein weiterer Versuchsdurchlauf (Versuch 2) dargestellt. Das Ergebnis ist sehr ähnlich dem von Versuch 1; die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ist folglich gegeben.

Versuchslauf 1

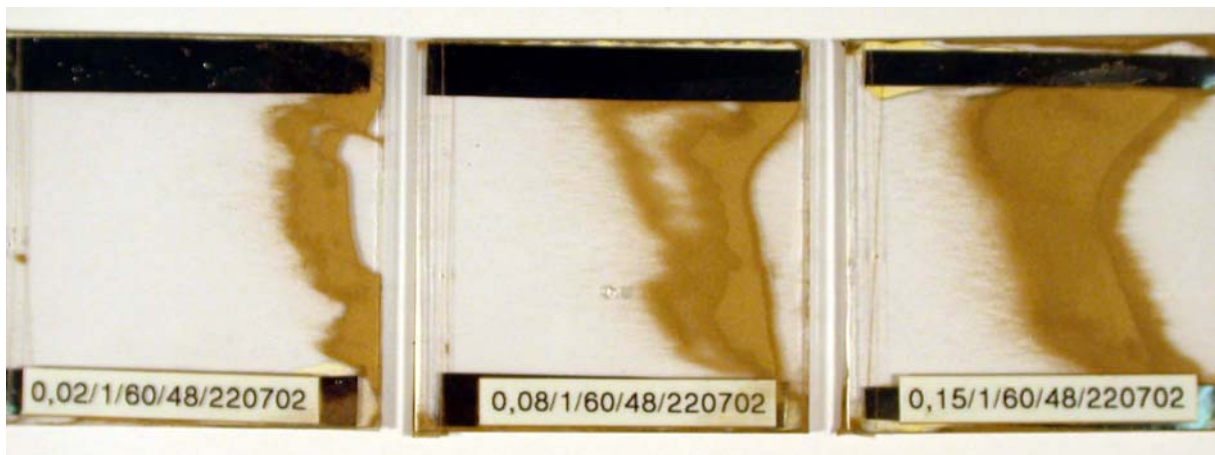


h = 0,02 mm

h = 0,08 mm

h = 0,15 mm

Versuchslauf 2



h = 0,02 mm

h = 0,08 mm

h = 0,15 mm

Bild 4.4 Aufnahme der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 1, Beaufschlagungszeit 120 s, oben: Versuchslauf 1, unten: Versuchslauf 2

Bei dem Versuch der Reihe 2 mit einer Spalthöhe von $h = 0,08$ mm, Bild 4.4 Mitte unten, ist eine doppelte Barriere zu erkennen. Die zweite Barriere bildete sich zu einem späteren Zeitpunkt als die erste Barriere, die sich weiter im Inneren des Spaltes gebildet hatte. Zur genaueren Untersuchung des Entstehens der Barrieren wurden die Versuche ein drittes Mal wiederholt und diesmal von Anfang an mit einer Videokamera gefilmt. Die hohe Partikeldichte in der Prüfkammer führte dazu, dass nach kurzer Zeit auf den Filmaufnahmen nichts mehr zu erkennen war. Deshalb wurde der Versuch nach jeweils 30 s abgebrochen und Bilder der Proben aufgenommen. In den Filmen ist zu erahnen, dass die Bildung von Barrieren schon sehr bald nach Beginn der Partikelbeaufschlagung einsetzt. Beim engsten Spalt mit einer Höhe von $h = 0,02$ mm setzte die Bildung einer Barriere bereits nach 4 s ein. Beim Spalt mit $h = 0,08$ mm nach 5 s und beim Spalt mit $h = 0,15$ mm nach ca. 8-10 s. In Bild 4.5 sind die nach 30 s gebildeten Barrieren gezeigt.



Erste Barrierenbildung nach:

4 s
h = 0,02 mm

5 s
h = 0,08 mm

8 - 10 s
h = 0,15 mm

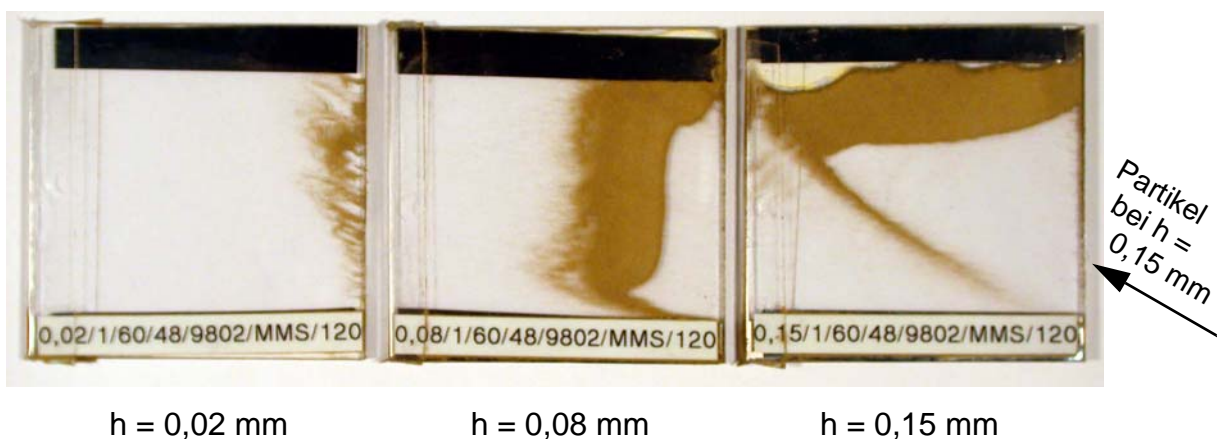
Bild 4.5 Aufnahme der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 1, 30 s, Barrierebildung

Die Aufnahme ganz rechts (h = 0,15 mm) zeigt, dass die Barrierebildung nach Ablauf der 30 s Versuchszeit noch nicht ganz abgeschlossen ist. Am unteren Rand ist noch eine Lücke zu erkennen.

Versuche bei Raumlage 1 und öligen Partikeln

Beaufschlagt man die Glasplatten mit öligen Partikeln, wie sie bei der Minimalmengenschmierung auftreten (vgl. Kapitel 2.4), erhält man folgende Ergebnisse.

Nach Beendigung der 120 s dauernden Partikelbeaufschlagung und anschließender, äußerlicher Reinigung der Glasplatten zeigte sich, dass die Ergebnisse ähnlich denen bei der trockenen Partikelbeaufschlagung sind, Bild 4.6. Das etwas andere Aussehen des Ergebnisses vom Versuch mit einer Spalthöhe von h = 0,15 mm rührt daher, dass der Halter im Versuchsraum verrutscht war und die Partikel wie dargestellt schräg auftrafen.



h = 0,02 mm

h = 0,08 mm

h = 0,15 mm

Bild 4.6 Aufnahmen der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 1, ölige Partikel, 120 s

4.1.2 Versuche bei Raumlage 2

Zur Untersuchung des Einflusses der Schwerkraft auf das Eindring- und Abscheideverhalten der Partikel im Spalt wurden die Glasplatten senkrecht in der Prüfzelle angeordnet. Bild 4.1 Mitte zeigt einen derartigen Versuchsaufbau.

Der Einfluss der Schwerkraft führt dazu, dass trockene Partikel im Spalt nach unten und in die Breite rieseln. Je höher der Spalt ist desto stärker ist der Effekt ausgeprägt. Die rieselnden Partikel dringen dabei teilweise noch weiter in den Spalt vor als bei den Versuchen mit waagrechttem Spalt - Raumlage 1. Lediglich bei der kleinsten Spalthöhe kommt es noch zu einem gewissen Verklemmen oder Verkeilen der Partikel im Spalt. Zur Ausbildung einer geschlossenen Barriere kommt es während der 120 s Versuchszeit und der Beaufschlagung mit 3 g Partikeln pro Minute nicht, Bild 4.7.

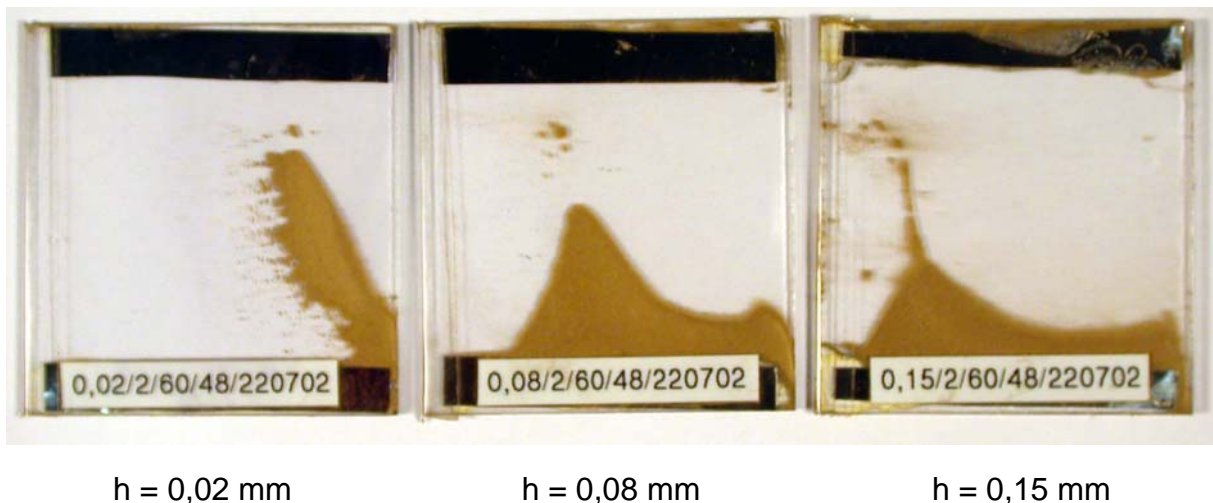


Bild 4.7 Aufnahme der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 2, 120 s, trockene Partikel

Wie bei Raumlage 1 dringen auch hier die Partikel mit steigender Spalthöhe weiter in den Spalt ein. Je kleiner der Spalt ist, desto früher, das heißt näher am Spaltanfang, kommt es zum Kontakt zwischen den Partikeln und den Spaltwänden, wodurch die Partikel abgebremst werden.

Versuche bei Raumlage 2 und öligen Partikeln

Beim Einsatz von MMS zeigt sich aufgrund der schlechteren Rieselfähigkeit der jetzt öligen Partikel ein anderes Verhalten, Bild 4.8.

Bei allen drei Versuchen sind die Partikel nicht mehr durch die Schwerkraft nach unten geriselt. Sie sind auf der Höhe ihres Eintritts kleben geblieben. Die Menge und die Eindringtiefe nehmen mit zunehmender Spalthöhe zu. Bei dem Versuch mit $h = 0,08$ mm ist ein Teil der gebildeten Barriere beim Ausbau aus dem Prüfstand abgefallen.

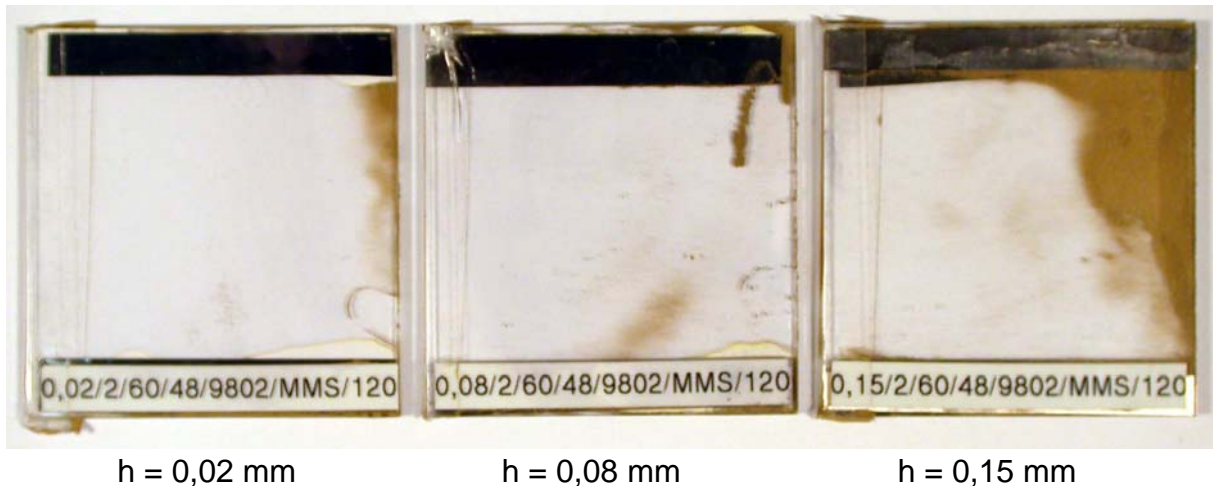


Bild 4.8 Aufnahme der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 2, ölige Partikel, 120 s

4.1.3 Versuche bei Raumlage 3

Zum Abschluss der Versuche mit parallelen Spalten wurden die Glasplatten so eingebaut, dass die offene Seite des Spalts nach oben zeigt, Bild 4.1 rechts. Die Staubpartikel bewegen sich nun quer zum Spalt.

Bei trockenen Partikeln fallen nur sehr geringe Mengen an Teilchen von Oben in den Spalt. Oben auf dem Spaltrand bildeten sich jeweils kleine, ca. 1 mm hohe Partikelanhäufungen, die aber wieder abkippten, sobald sie etwas größer wurden. Nur vereinzelt Partikel gelangen in den Spalt. Auch hierbei ist die Partikelmenge wieder proportional zur Spalthöhe. Die Ergebnisse sind in Bild 4.9 dargestellt.

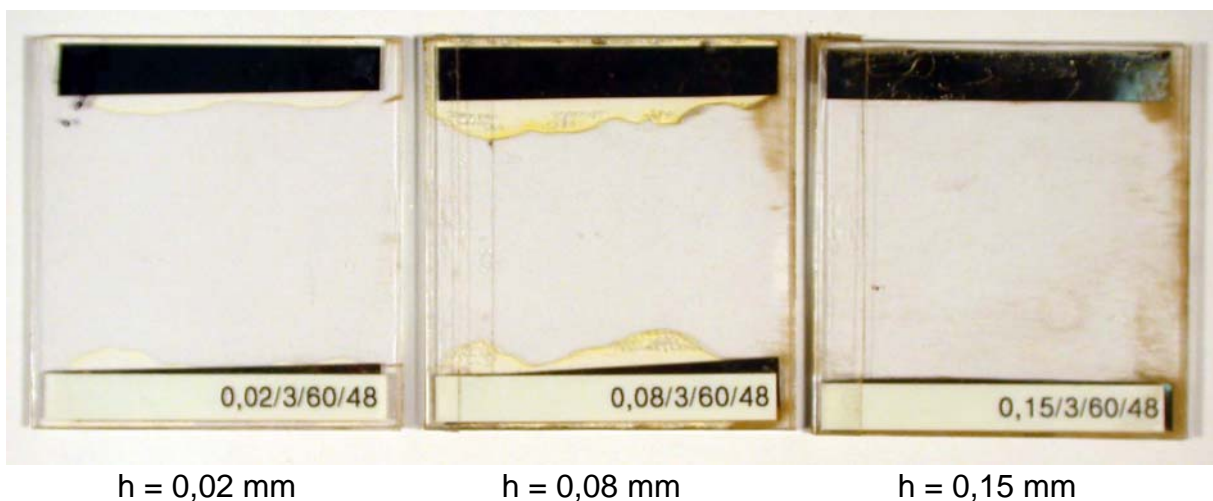


Bild 4.9 Aufnahme der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 3, 120 s, trockene Partikel

Versuche bei Raumlage 3 und öligen Partikeln

Bei Versuchen mit Raumlage 3 und öligen Partikeln (MMS) war die Anzahl der Partikel im Spalt nochmals geringer, da sie schon oben am Spalteingang verklebten, vgl. Bild 4.10. Es sind hier fast keine Partikel in den Spalten zu erkennen.

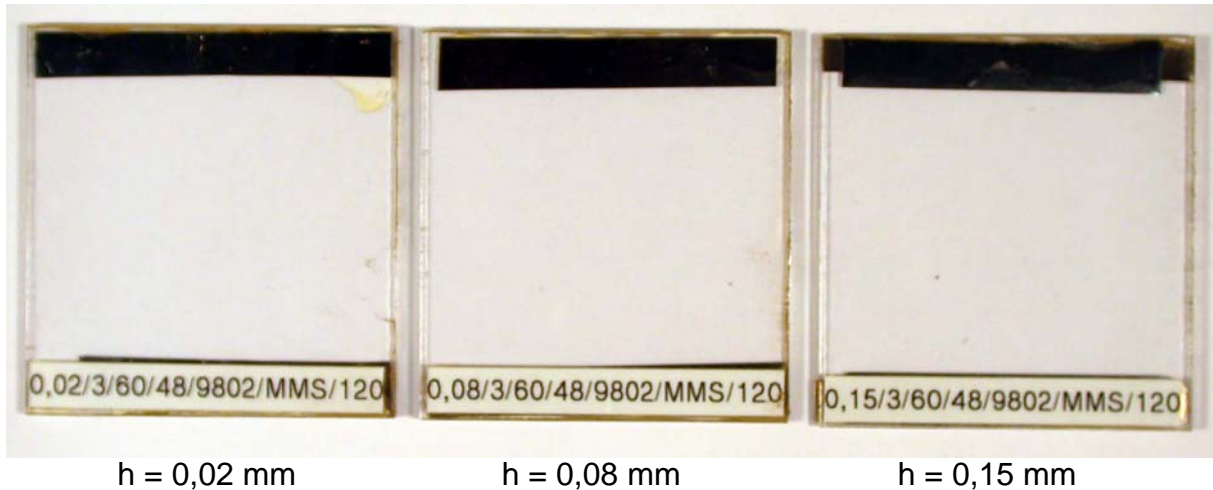


Bild 4.10 Aufnahme der Glasplatten 50x50 mm, Raumlage 3, 120 s, ölige Partikel

Zusammenfassung der Versuche mit parallelen Spalten

Es konnte gezeigt werden, dass Partikel immer in den Spalt eindringen. Ihre Anzahl und die Eindringtiefe ist jedoch stark abhängig von der Spalthöhe h und der Anströmrichtung der Partikel. Einzelne Partikel gelangten in allen Fällen bis an das andere Ende des 50 mm langen Spaltes.

Es zeigte sich auch, dass die Partikel mehr oder weniger gut der Schwerkraft folgend nach unten rieseln. Dieses wird durch engere Spalte zunehmend erschwert und durch ein Verkleben der Partikel mit Öl aus der MMS-Beaufschlagung praktisch ganz unterbunden.

Die bei den Versuchen teilweise aufgebauten Barrieren stellen eine Sonderform von Ablagerungen dar. Sie konnten bei den untersuchten parallelen Spalten entstehen, da sich hier die Spaltwände nicht relativ zueinander bewegten. Bei Versuchen, bei denen keine Barrieren gebildet wurden, waren die Mengen der eingedrungenen Partikel und die Eindringtiefe in den Spalt größer. Die Vorgänge, die bei bewegten Spaltwänden ablaufen, sind Gegenstand des nächsten Kapitels.

4.2 Versuche mit transparenten, zylindrischen Dichtsystemen

Bei den meisten Versuchen mit parallelen Spalten, die im letzten Kapitel beschrieben wurden, bildeten sich Barrieren / Partikelansammlungen im Spalt. Sie bildeten sich bereits nach sehr kurzen Versuchszeiten und hinderten im weiteren Verlauf der Versuche die nachfolgenden Partikel am tieferen Eindringen in den Spalt. Die Frage, ob es sich bei der Barrierebildung ausschließlich um ein Phänomen bei Parallelspalten handelt oder ob sich die Barrierebildung auch bei zylindrischen Ringspalten beobachten lässt ist Gegenstand dieses Kapitels.

4.2.1 Ergänzungen des Dichtsystembaukastens

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde der Dichtsystembaukasten nach Kapitel 3.1 auf Seite 23 um zwei Statorteile und zwei Schleuderscheiben aus Plexiglas (PMMA) ergänzt. Eine der Statorscheiben wurde mit einer Sperrlufteinleitungsnut, sowie Sperrluftanschlüssen und einer Druckmessleitung versehen. In Bild 4.11 sind die beiden Statorscheiben dargestellt, links ohne und rechts mit Sperrlufteinleitungsnut. Die gebildete Ring-spalthöhe betrug bei allen Versuchen $h = 0,15 \text{ mm}$.

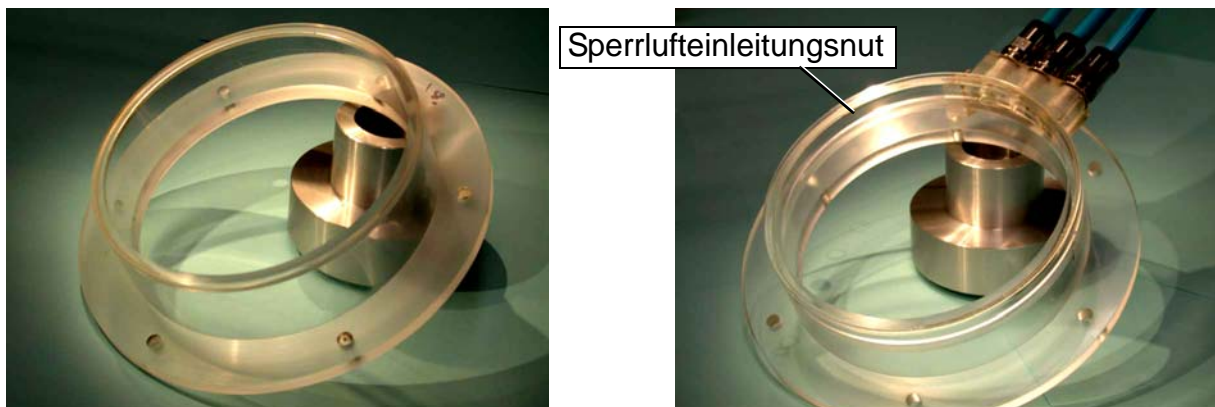


Bild 4.11 Statorscheiben aus Plexiglas, links ohne, rechts mit Sperrlufteinleitungsnut

Durch die transparenten Statorteile war es möglich, vor der Demontage der Versuchsteile die Ablagerungen im Spalt zu erkennen und zu dokumentieren, bevor sie durch die Demontage zerstört wurden. Eine längere Beobachtung während eines Versuchs war leider nicht möglich, da durch die großen Staubmengen im Inneren des Arbeitsraumes die Sicht auf die Statorteile sehr eingeschränkt war. Alle Untersuchungen wurden mit einer maximalen Partikelgeschwindigkeit von 28 m/s durchgeführt.

Zwei Schleuderscheiben, ebenfalls aus Plexiglas, dienten zur Bildung eines Stirnflächenspalts h_S , bzw. zur Bildung eines überdeckten Stirnflächenspaltes $h_{\check{U}}$. Die Spalthöhen betragen jeweils $h_{\check{U}} = h_S = 0,5 \text{ mm}$. Die beiden Schleuderscheiben sind in Bild 4.12 dargestellt.

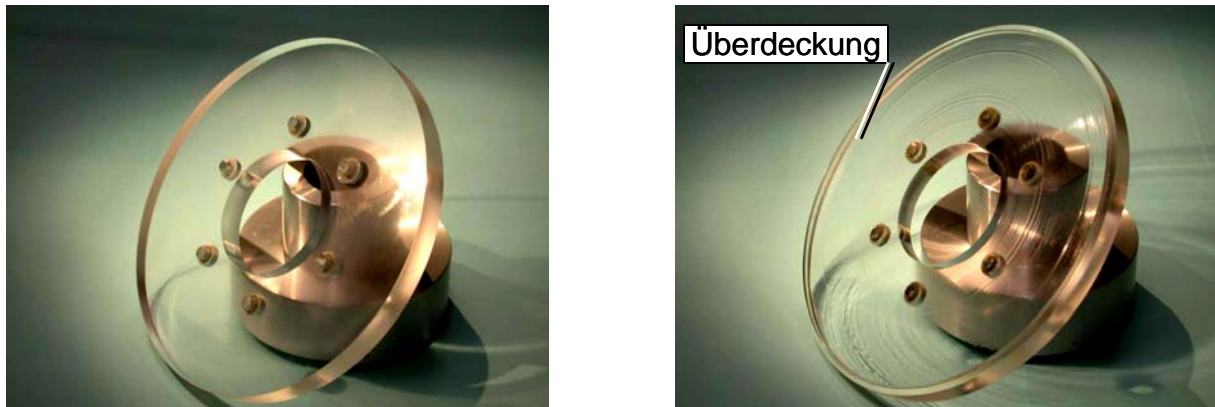


Bild 4.12 Schleuderscheiben, links für Stirnflächenspalt, rechts für überdeckten Stirnflächenspalt

4.2.2 Versuche mit offenem Dichtspalt

Um das Partikelverhalten im Ringspalt zu untersuchen, wurde zunächst mit einem offenen Dichtspalt gearbeitet, d. h. der Spalteingang ist zur Partikelquelle hin geöffnet. Dadurch drangen viele Partikel in den Spalt ein. Der prinzipielle Aufbau entspricht Bild 4.13.

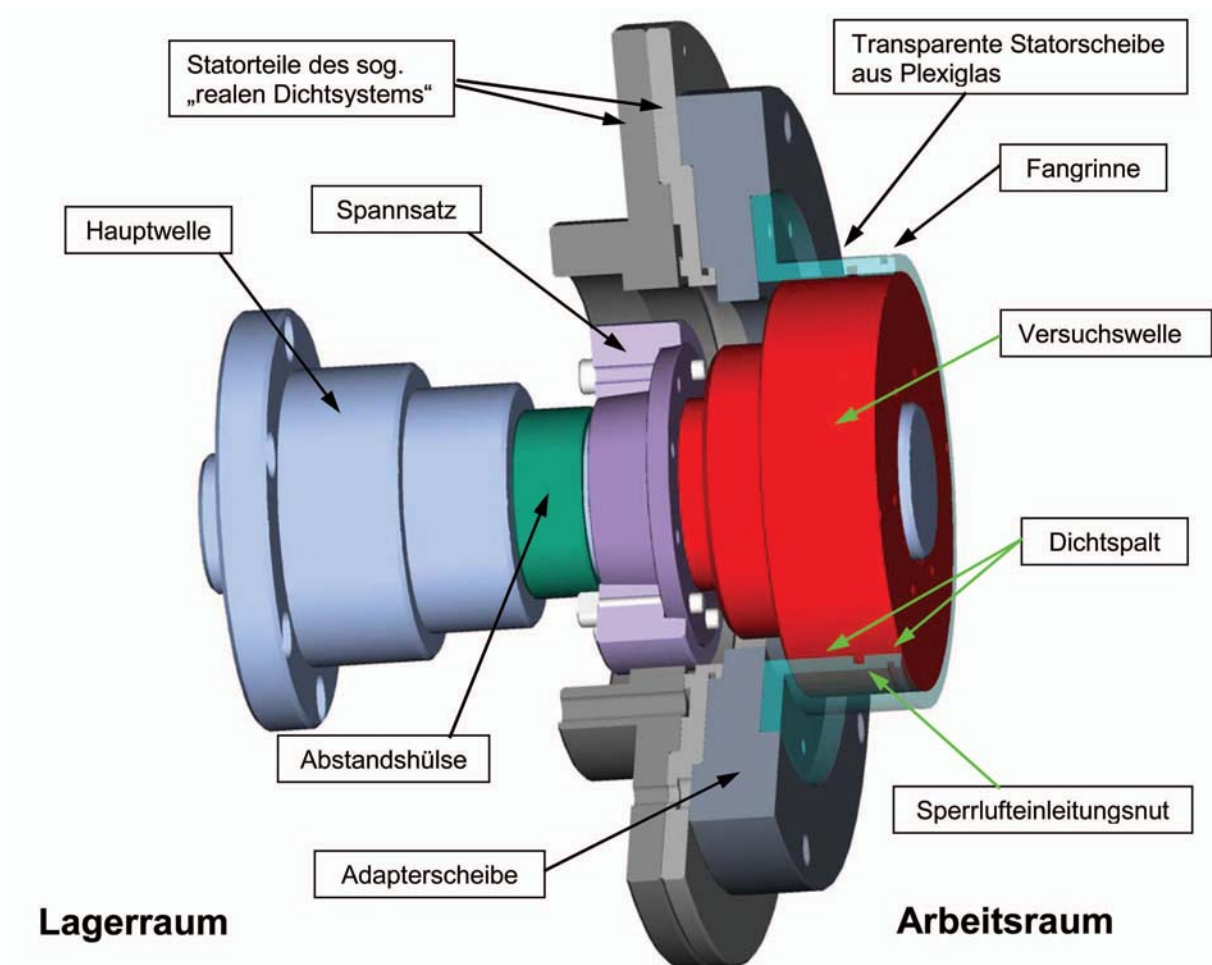


Bild 4.13 Versuchsaufbau mit transparentem Dichtsystem

Drehzahleinfluss

In einer ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss der Drehzahl auf das Eindringverhalten trockener Partikel in den Spalt untersucht. Hierzu wurde das Dichtsystem bei stehender Welle ($n = 0 \text{ min}^{-1}$) mit trockenen Partikeln beaufschlagt. Nach zweiminütiger Versuchszeit zeigte sich, dass die Partikel am Umfang unterschiedlich weit in den Spalt eingedrungen waren, Bild 4.14.

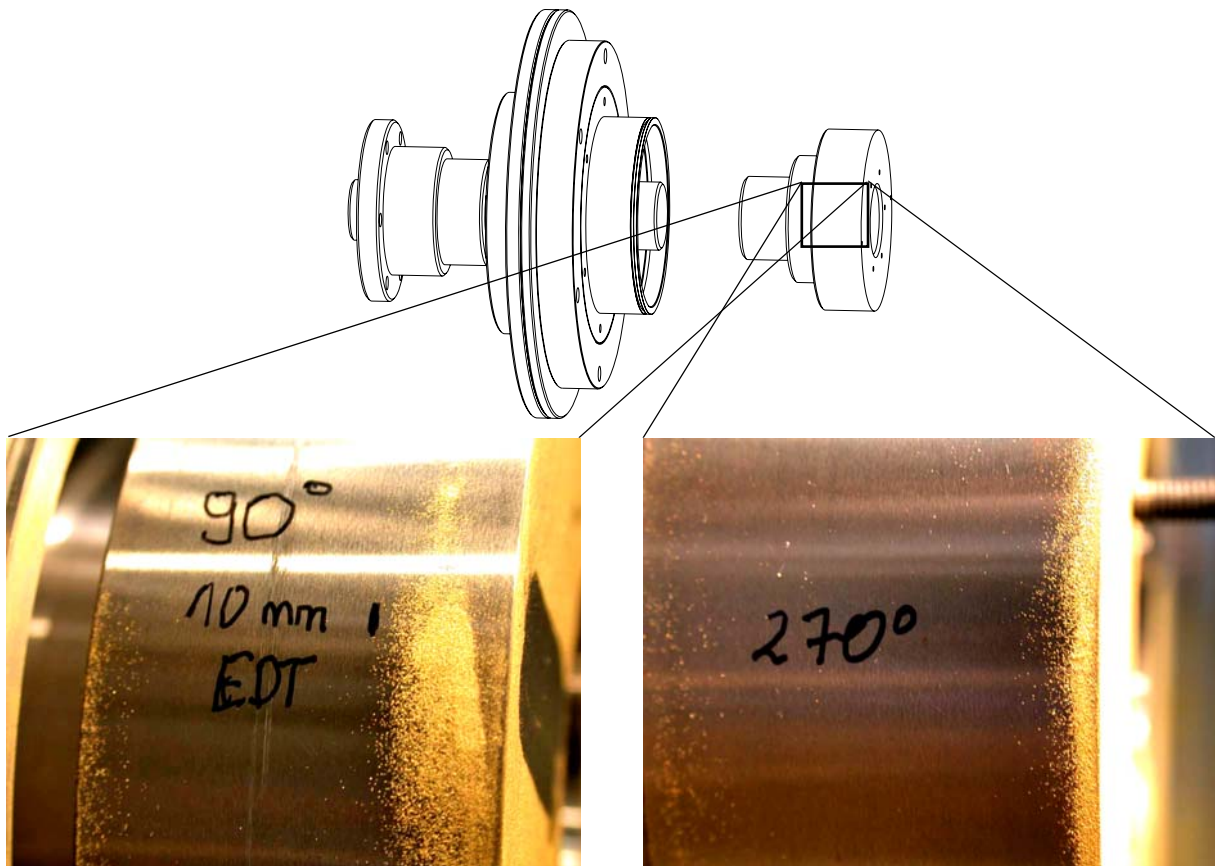


Bild 4.14 Welle mit Partikeln, links: 90°, rechts: 270° Position
Offener Eing., $n = 0 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 2 min, $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$,
Versuchsteile ölfrei

Bild 4.14 zeigt zwei Aufnahmen, links die 90° und rechts die 270° Position der Welle. Im Bereich der 90° Position konnten Partikel ca. 10 mm tief in den Spalt eindringen, wohingegen die Partikel auf der gegenüberliegenden Seite nur 1 bis 2 mm tief in den Spalt eingedrungen waren. Grund dafür war die Position der Partikelquelle, die nur auf die 90° Position der Welle schnelle Partikel parallel zur Dichtspaltlängsachse liefert. Auf der 270° Position der Welle kamen die Partikel unter einem Winkel von ca. 30° zur Dichtspaltlängsachse und mit geringerer Geschwindigkeit an. Es zeigte sich somit, dass die Eindringtiefe und die Menge der eingedrungenen Partikel stark von der Position der Partikelquelle und der Partikelflugrichtung abhängig sind. Ferner ist bei den beiden Aufnahmen der Welle zu erkennen, dass an beiden Positionen einzelne Partikel bis an das gegenüberliegende Spaltende vorgedrungen sind. Eine Spaltlänge von 36 mm reichte nicht aus um die Partikel am Passieren des Spaltes zu hindern.

In Bild 4.15 sind Aufnahmen des Stators bei ausgebauter Welle gezeigt. Auf den Statorwänden sind ebenfalls Partikel zu erkennen, die sich auf der gesamten Spalllänge abgelagert haben. Partikel durchquerten den gesamten Dichtspalt, das System war undicht.

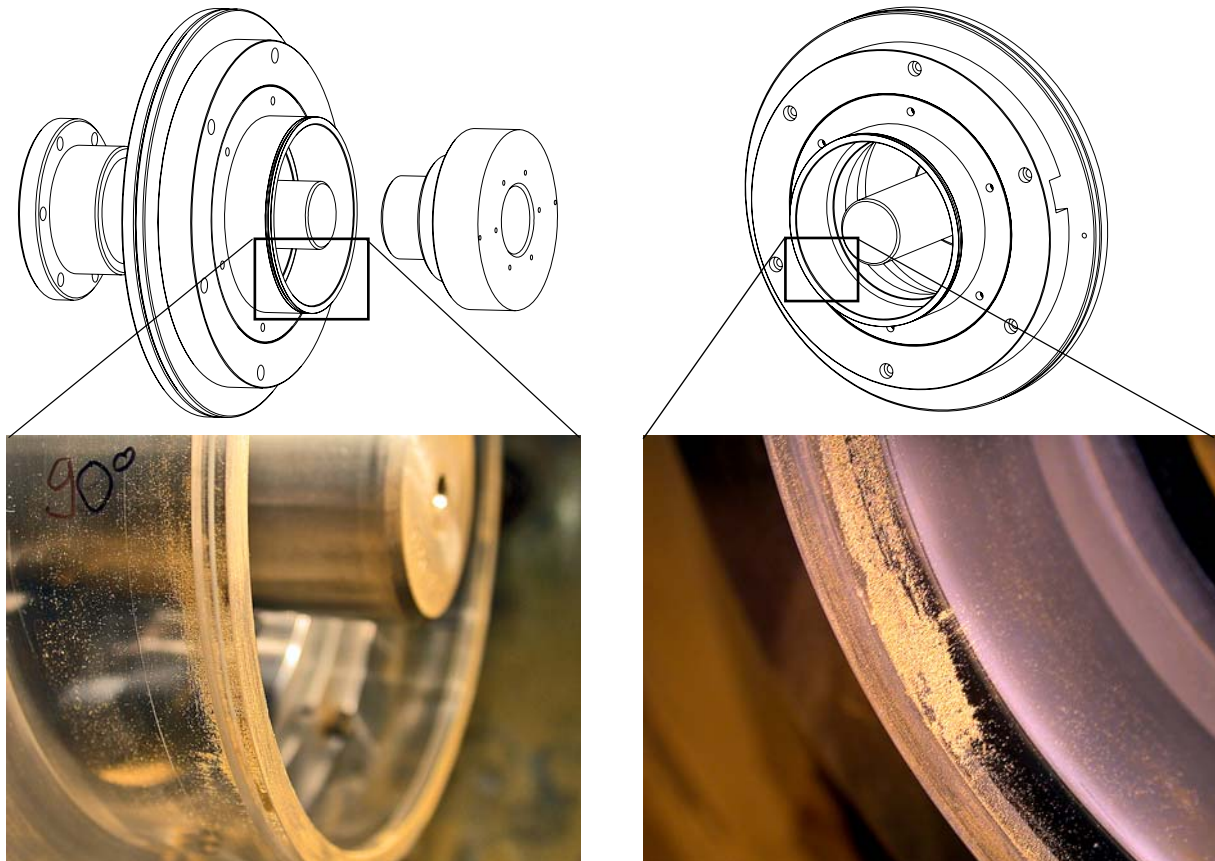


Bild 4.15 Stator mit Partikeln, 90° Pos., links von außen, rechts von innen gesehen. Offener Eing., $n = 0 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 2 min, $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$, Teile ölfrei

Nach einem zweiten Versuch, bei dem die Welle fünf Minuten mit einer Drehzahl von $n = 800 \text{ min}^{-1}$ rotierte, fand sich auf der Welle ein breiter Streifen relativ gleichmäßig am Umfang verteilter Partikel, Bild 4.16, links. Die Drehung der Welle sorgte zunächst für die gleichmäßige Verteilung der eingedrungenen Partikel am Umfang. Die Gesamtmenge der Partikel, die während der Versuchszeit in den Spalt eingedrungen war, schien sich im Vergleich zu dem Versuch mit stehender Welle nicht erhöht zu haben. Die Schichtdicke war jedoch wesentlich geringer, da die Partikel jetzt gleichmäßig am Umfang verteilt waren.

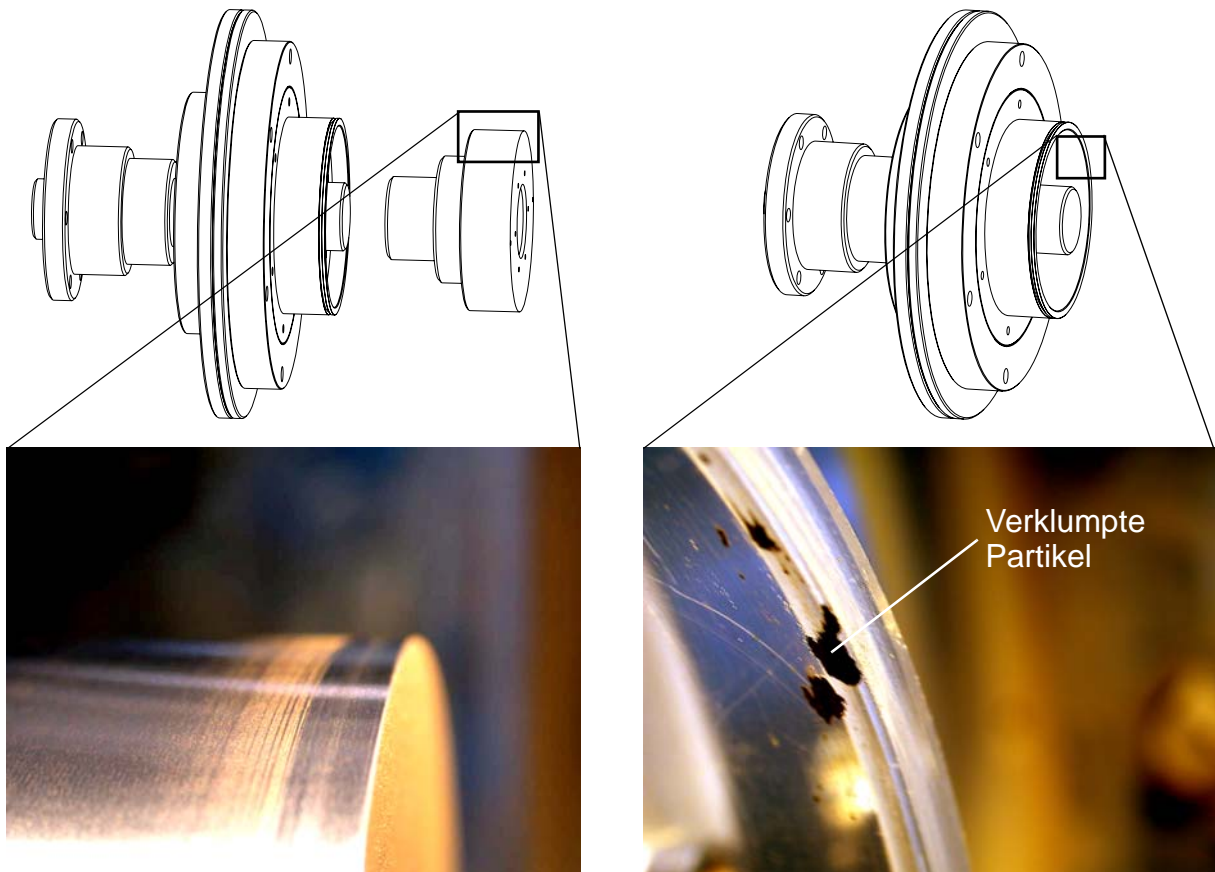


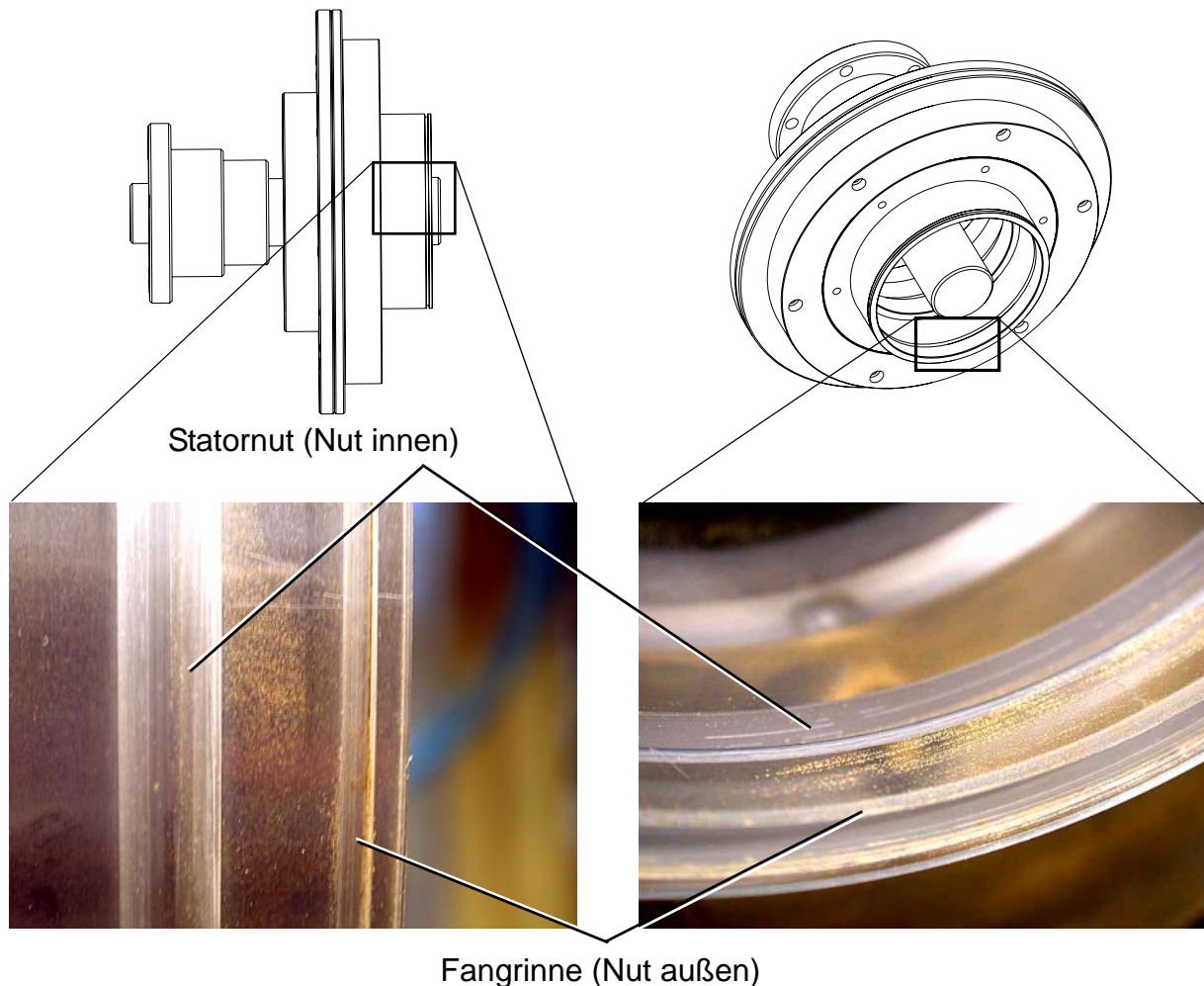
Bild 4.16 Welle mit Partikeln am Umfang (links), abgestreifte Partikel im Stator (rechts); Offener Eing., $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 5 min, $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$, Teile ölfrei

Beim Stator finden sich im Bereich der 270° Position sehr viele Partikel. Sie sind tiefer in den Spalt eingedrungen als bei den Versuchen mit stehender Welle. Eine Barriere, die weitere Partikel am Ein- und Vordringen in den Spalt gehindert hätte, konnte sich aufgrund der relativ zu einander bewegten Spaltwände nicht bilden. Die Partikel, die sich im Bereich der ersten Millimeter des Dichtspaltes auf der Welle gesammelt hatten, waren so hoch angehäuft, dass es an einer Stelle zum Kontakt mit dem Stator kam. An dieser Stelle wurden dann immer mehr Partikel von der Welle abgestreift. Dies erklärt einen ca. 10 mm breiten, relativ partikelfreien Streifen auf der Welle. Bild 4.16 rechts zeigt die abgestreiften Partikel, die sich im Stator verklumpt haben. An dieser Stelle wäre es bei längerer Versuchslaufzeit zum Fressen gekommen.

Einstiche im Dichtspalt

Bei einem Sperrluftdichtsystem wird die Sperrluft meist über Bohrungen in einen Einstich bzw. eine Nut im Gehäuse des Dichtsystems eingeleitet (Bild 4.11). Dieser Einstich wird deshalb als Sperrlufteinleitungsnut bezeichnet. Um die Wirkung dieser Nut als reines Geometrieelement - also ohne Sperrlufteinleitung - zu untersuchen, wurden Versuche mit einer Statorscheibe mit und ohne Nut durchgeführt. Bild 4.17 zeigt links eine Aufnahme der Oberfläche der Welle durch die noch montierte Plexiglas-Statorscheibe hindurch. Die rechte Aufnahme in Bild 4.17 zeigt die innere Mantelfläche der Plexiglas-Statorscheibe bis zur Nut bei

ausgebauter Versuchswelle. Auf beiden Fotos sind lediglich Partikel bis zur inneren Nut zu erkennen. Um Verwechslungen zu vermeiden ist in Bild 4.17 außer der innen liegenden Nut auch die außen liegende Fangrinne bezeichnet.



**Bild 4.17 Statorscheibe, links Welle samt Stator mit Nut, rechts Statornut
Offener Eing., $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 2 min, $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$,
Teile ölfrei**

Auch bei diesem Versuch haben einzelne Partikel den Spalt ganz durchflogen und haben sich auf der Lagerseite abgelagert. Daher ist die Wirkung der Nut als dichtungstechnisches Hilfsmittel als eher gering einzuschätzen. In der Nut würden sich zudem im Laufe der Zeit immer mehr Partikel ansammeln und spätestens wenn diese gefüllt wäre, bestünde keine abdichtende Wirkung mehr.

Druckstöße

Im Rahmen der durchgeführten Versuche zeigten sich Unregelmäßigkeiten bei den Versuchsergebnissen, die auf Druckstöße bzw. Druckschwankungen im Arbeitsraum zurückzuführen waren. Beim Schließen der Prü fzelle wurde eine Gummiprofildichtung 10 bis 15 mm weit gestaucht, die den verschiebbaren Teil der Prü fzelle / des Arbeitsraumes abdichtet. Durch diese

Stauchung entstand kurzzeitig ein geringer Überdruck im Arbeitsraum. Dieser Überdruck entwich teilweise durch das Dichtsystem in Richtung Lagerraum, sofern keine andere, großzügige Entlüftung vorhanden war. Dies führte dazu, dass Partikel in großer Anzahl mit dem Luftstrom mitgerissen wurden und so in den Lagerraum gelangten. Bild 4.18 zeigt den Lagerraum hinter dem demontierten Dichtsystem nach dem Schließen des Arbeitsraums, links mit kurzzeitigem Überdruck mit geschlossener Entlüftung und rechts ohne Überdruck mit offener Entlüftung.

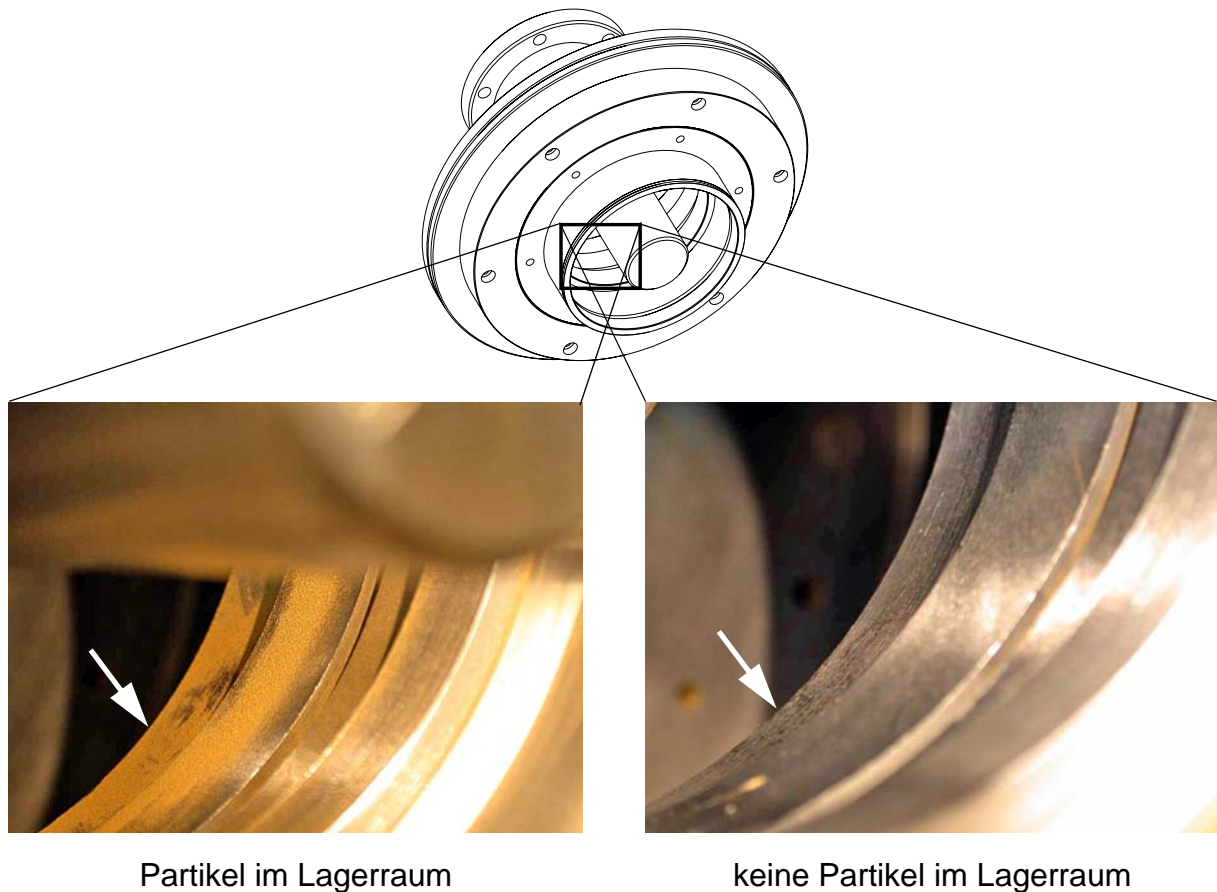


Bild 4.18 Lagerraum nach dem Schließen der Kammer, links mit Druckstoß, rechts ohne Druckstoß

Bild 4.19 zeigt das zugehörige Protokoll des Partikelzählers. Die Partikelanzahl schnellte beim kurzen Druckstoß in die Höhe. Im rechten Protokoll - mit Druckstoß - lag die Gesamtzahl der Partikel um mehr als das 60-fache über der Partikelanzahl ohne Druckstoß im linken Protokoll.

Wenn keine Sperrluft anliegt darf, z. B. im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine, kein Überdruck entstehen. Durch schnelle Verfahrbewegungen, zum Beispiel einer xy-Einheit einer Werkzeugmaschine in z-Richtung, können derartige Druckschwankungen auftreten. Hierbei besteht die Gefahr, dass sich ein Luftstrom in Richtung Lagerraum bildet, der Partikel mit sich trägt.

Endprobe unbearbeitet Lasair II FR_290802 Plexi Gültig 2002/08/29 11:35:07#1			Endprobe unbearbeitet Lasair II FR_290802 Plexi Gültig 2002/08/29 11:20:49#1		
μ	Δ	Σ	μ	Δ	Σ
0.5	313	3432	0.5	20094	219129
0.7	362	3119	0.7	26444	199035
1.0	900	2737	1.0	61070	172591
2.0	1485	1837	2.0	92225	111521
5.0	308	352	5.0	16849	19296
10.0	44	44	10.0	2447	2447
Mittelw	Min	Max	Mittelw	Min	Max
Druck Kammer	mbar		Druck Kammer	mbar	
NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Druck Nut	mbar		Druck Nut	mbar	
NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Vol-Strom	l/min		Vol-Strom	l/min	
NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
00:01:00	0.028317	cmm	00:01:00	0.028316	cmm

Bild 4.19 Protokoll des Partikelzählers, links ohne Druckstoß, rechts mit Druckstoß

Zusammenfassung der Versuche mit offenem Dichtspalt

Bei allen Versuchen drangen Partikel weit in den Dichtspalt ein und es kam zu Leckage. Durch Rotation wird eine Barrierebildung unterbunden. Die Partikel werden durch die Rotation gleichmäßig am Umfang des Dichtspaltes verteilt. Es zeigte sich, dass es lokal zu Partikelanhäufungen kommen kann, die so groß sind, dass sie die Spalthöhe erreichen, die Gefahr des Fressens besteht. Überdruck bzw. Druckstöße im Arbeitsraum müssen unbedingt und zu jeder Zeit vermieden werden da hierbei sehr viele Partikel durch das Dichtsystem befördert werden.

4.2.3 Versuche mit offenen Stirnflächenspalt

Die Versuche mit den parallelen, nicht bewegten Spalten hatten gezeigt, dass bei Anordnung der Spalte in Raumlage 3 (siehe Bild 4.1 auf Seite 40), d. h. Spaltöffnung senkrecht zur Partikelflugrichtung, die wenigsten Partikel in die Spalte eingedrungen sind. Im Falle der rotations-symmetrischen Dichtsysteme bedeutet dies, dass zusätzlich zum achsparallelen Dichtspalt diesem noch ein Stirnflächenspalt vorgeschaltet wird. Der Stirnflächenspalt liegt somit ebenfalls senkrecht zur Flugbahn der Partikel, vgl. Bild 4.20.

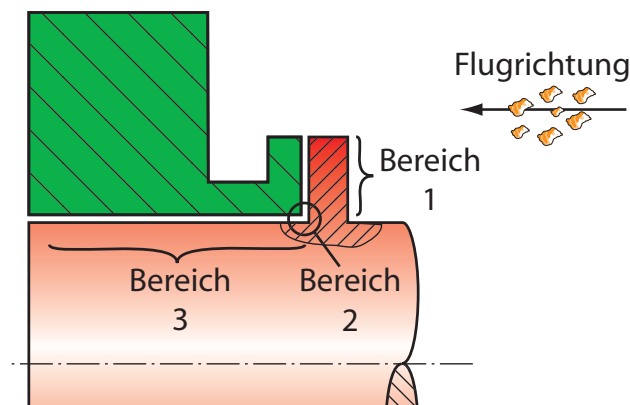


Bild 4.20 Schnitt des transparenten Dichtsystems mit Stirnflächenspalt

Versuchsergebnisse

In einer ersten Versuchsreihe mit Dichtsystemen mit Stirnflächenspalt wurden Versuche mit Schleichdrehzahl, ca. 5 min^{-1} durchgeführt. Hierdurch sollte eine Barrierebildung direkt am Spalteingang möglichst verhindert werden, um nachfolgende Partikel nicht am Eintritt in den Dichtspalt zu hindern. Bei einem Versuch wurden trockene Partikel verwendet, bei einem zweiten Partikel mit MMS. Bild 4.21 zeigt links den Eingangsbereich des Dichtsystems nach trockener Beaufschlagung und rechts nach dem Versuch mit Einsatz von MMS.

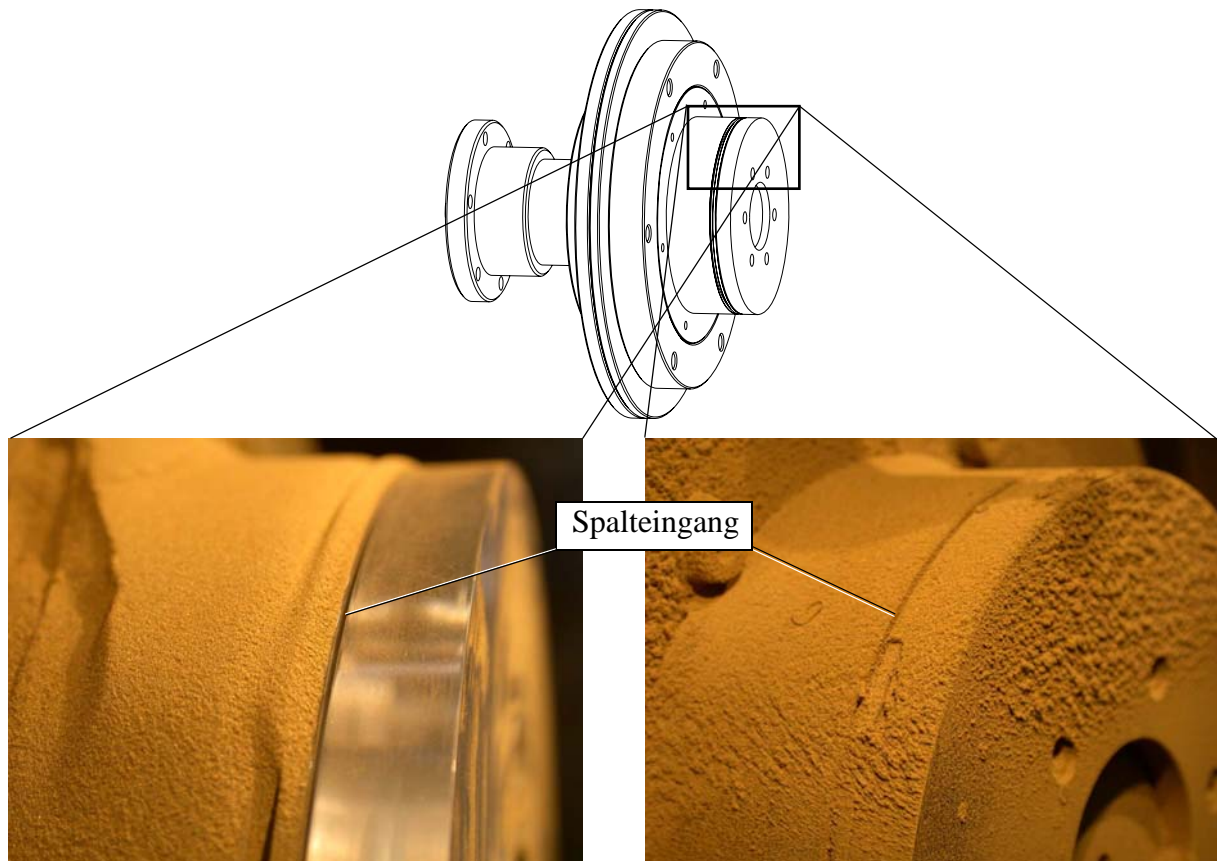


Bild 4.21 Versuchsaufbau mit Stirnflächenspalt nach Versuch, links trocken, $n = 5 \text{ min}^{-1}$, rechts MMS, $n = 5 \text{ min}^{-1}$

Auf der linken Aufnahme in Bild 4.21 ist zu erkennen, dass sich nur wenige trockene Partikel auf der langsam rotierenden Scheibe dauerhaft abgelagert haben. Auf der rechten Aufnahme ist das Ergebnis des Versuches mit MMS dargestellt. Die öligen Partikel sind auf der rotierenden Scheibe haften geblieben. Der Eingangsbereich des Dichtspaltes hat sich hierbei trotz rotierender Welle weitgehend zugesetzt, ganz im Gegensatz zu dem Versuch mit den trockenen Partikeln in der linken Aufnahme.

Nach der Demontage des Dichtsystems und der Plexiglasscheibe, die den Stirnflächenspalt bildete, zeigte sich, dass bei beiden Versuchen Partikel in den Stirnflächenspalt, Bereich 1 siehe Bild 4.20, eingedrungen sind und dort maximal bis zum Übergang in den Ringspalt, Bereich 2, Bild 4.20, vorgedrungen sind. Der Bereich 3 im Ringspalt, der zylindrische Dichtspalteil blieb frei von Partikeln.

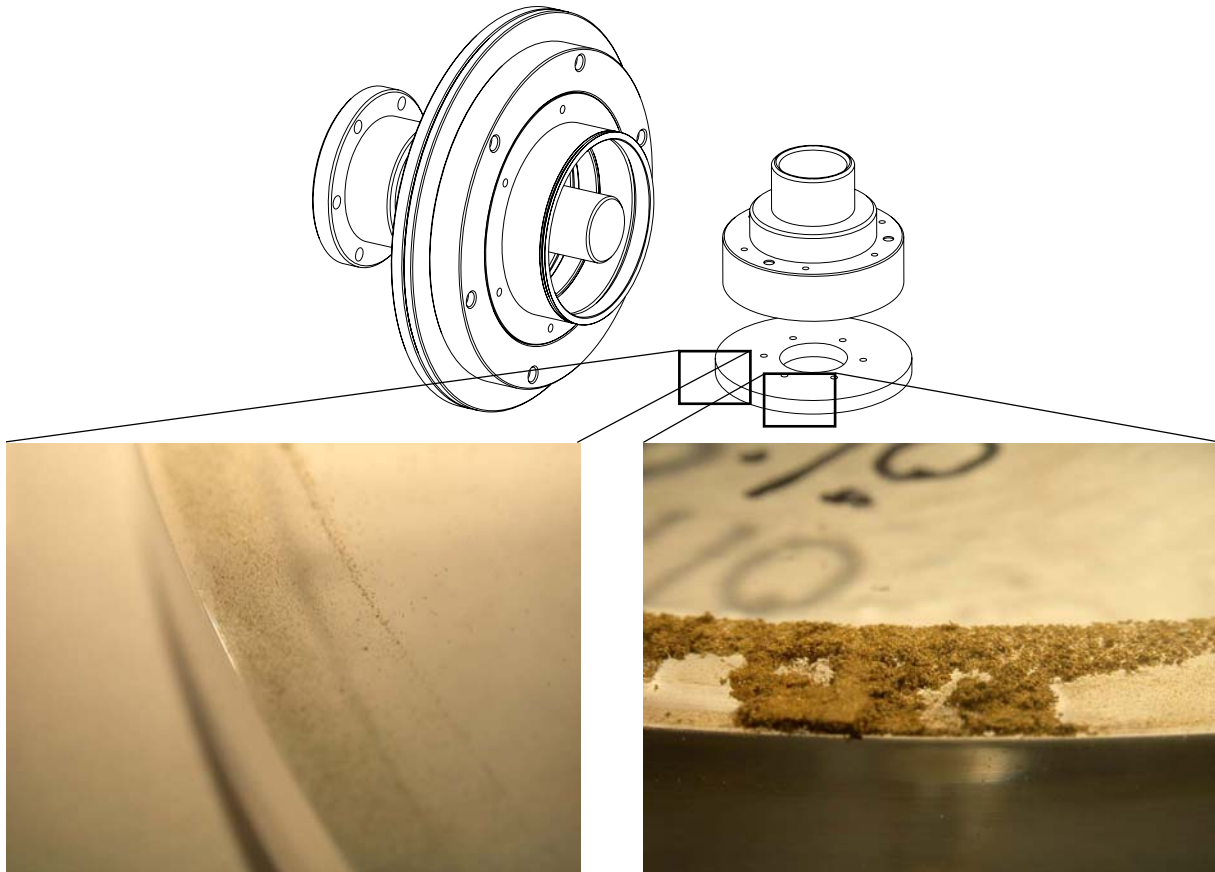


Bild 4.22 Partikel links im trockenen, rechts im öligen Stirnflächenspalt
 $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 15 min , $\dot{V}_{Sperrluft} = 0 \text{ l/min}$

Bei dem Versuch mit trockenen Partikeln zeigte sich eine dünne Partikelschicht im Bereich 1 des Dichtspaltes, Bild 4.22 links. Bei einer Wiederholung des Versuches wurde an einer Stelle des Stirnflächenspaltens ein Öltropfen zu Beginn des Versuches in den Spalt eingebracht. An der Stelle des Öltropfens kam es zu massiven Ablagerungen der trockenen Partikel im Spalt, Bild 4.22 rechts, die die ganze Spaltfläche ausfüllten.

Bei dem Versuch mit Minimalmengenschmierung MMS, verklebten die öligen Partikel schon vor dem Spalt und verengten den Spalteingang noch weiter, wie in Bild 4.23 links zu sehen ist. Nur relativ wenige Partikel drangen in den Spalt ein, Bild 4.23 rechts.

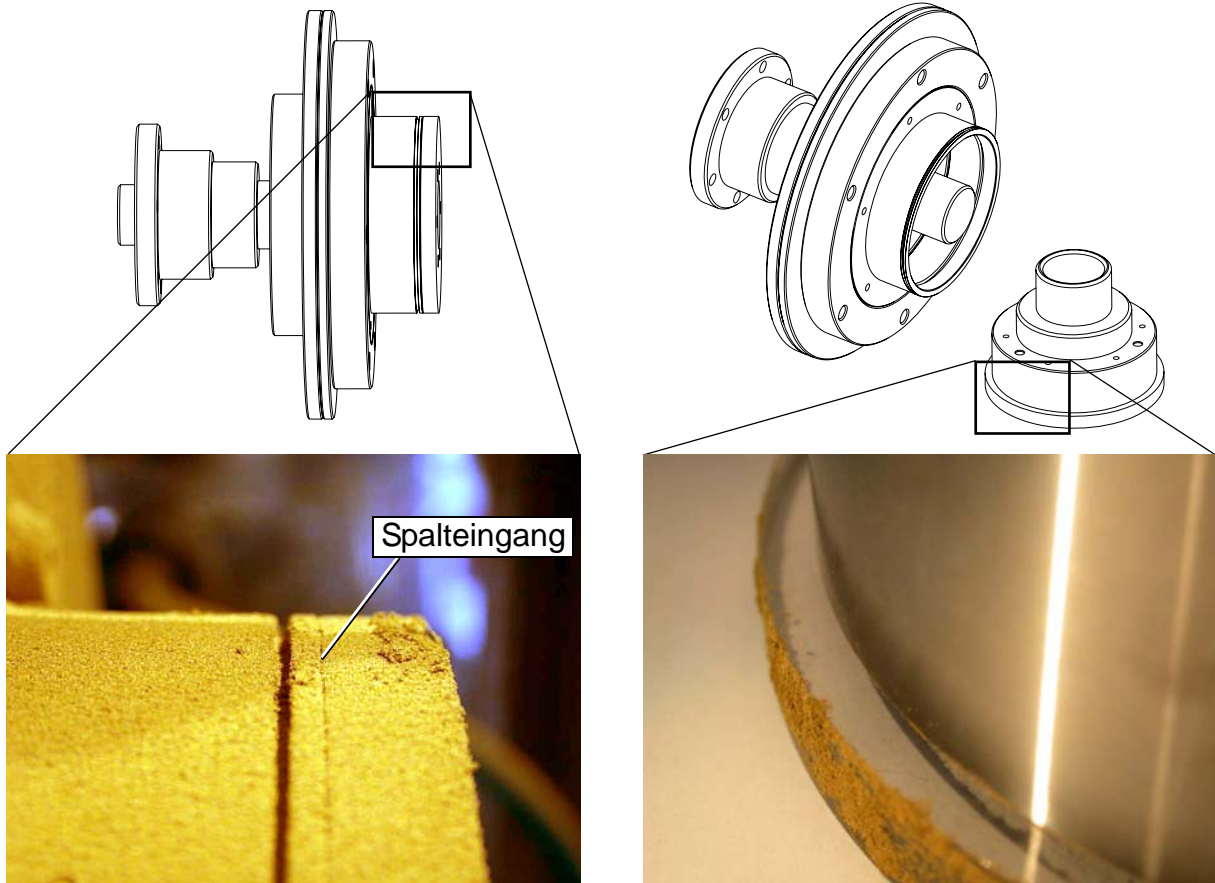


Bild 4.23 Links Dichtsystem und rechts Stirnflächenspalt nach MMS Versuch
 $n = 5 \text{ min}^{-1}$, $v_{\text{max}} = 28 \text{ m/s}$, 15 min, $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$, MMS

Rotiert die Welle im Versuch mit einer höheren Drehzahl, hier mit $n = 800 \text{ min}^{-1}$, kommt es trotz MMS nicht zum Verkleben des Spaltes, Bild 4.24 links. Es gelangen weniger Partikel in den Spalt als bei Schleichdrehzahl. Sie werden von der schneller rotierenden Welle abgeschleudert, wie die geringen Ablagerungen auf den rotierenden Teilen in Bild 4.24 rechts zeigen.

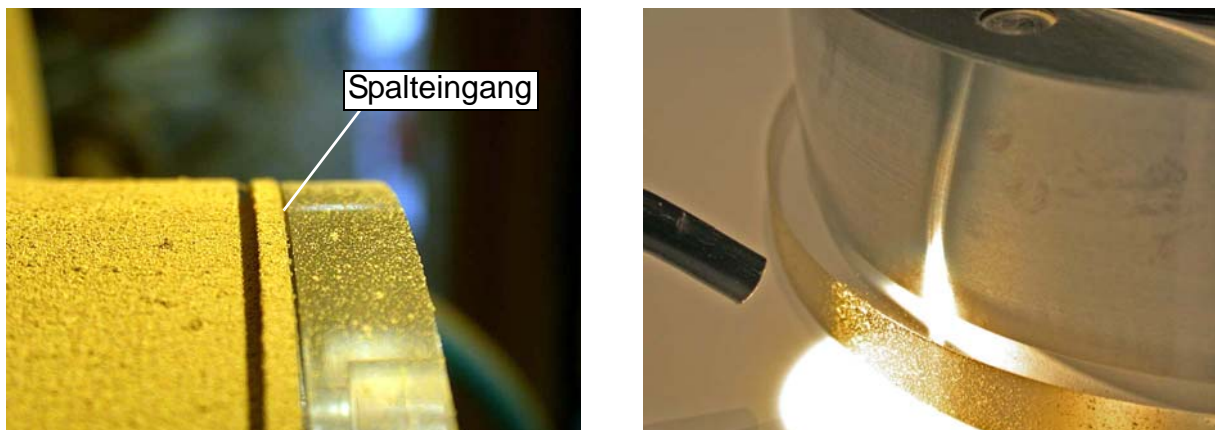


Bild 4.24 Links Dichtsystem und rechts Stirnflächenspalt nach MMS Versuch
 $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{\text{max}} = 28 \text{ m/s}$, 15 min, $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$, MMS

Wird zusätzlich Sperrluft eingesetzt ($\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 50 \text{ l/min}$, Druck $p = 14,2 \text{ hPa}$ - ca. 20% des in DIN 69002 für Kurzspindeln geforderten Drucks), dringen nur noch ganz wenige Partikel in den Stirnflächenspalt ein.

Zusammenfassung der Ergebnisse mit Stirnflächenspalt

Bei Dichtsystemen mit Stirnflächenspalt dringen weniger Partikel in den Dichtspalt ein als beim offenen Dichtspalt. Im Stirnflächenspalt lagern sich bei Rotation der Welle sehr wenige Teilchen ab; sie fallen aufgrund der Rotation teilweise wieder aus dem Spalt heraus. Ölige Partikel, wie sie bei der Bearbeitung mit MMS entstehen können, kleben in großer Zahl außen auf den Dichtungsteilen und verkleben den Spalteingang und hindern so weitere Partikel am eindringen. Ölige Spaltwände führen dazu, dass die Partikel auf den Oberflächen haften und sich dort ansammeln. Die Gefahr des Fressens besteht.

4.2.4 Versuche mit überdecktem Stirnflächenspalt

Ausgehend von der Überlegung, dass in einen Dichtspalt, der von der Partikelquelle abgewandt ist, noch weniger Partikel eindringen sollten als in einen, der zur Flugrichtung senkrecht steht, wurde eine dritte Spaltvariante untersucht. Ein so gestalteter Eingangsbereich wird im Weiteren als überdeckter Eingangsbereich bezeichnet, siehe Bild 4.25.

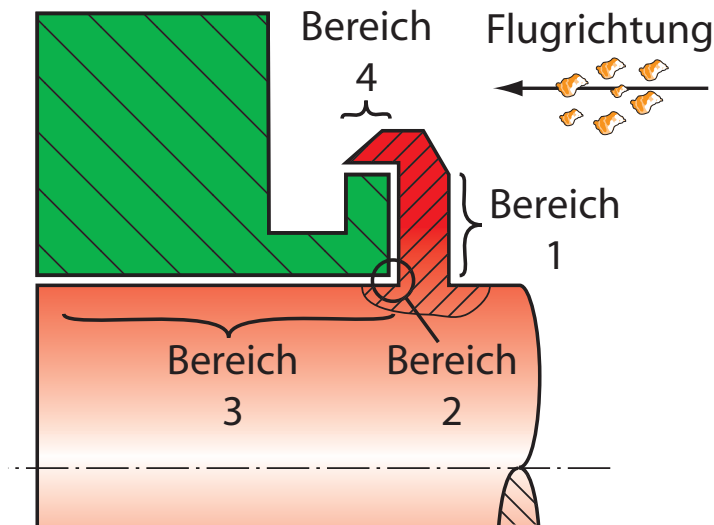


Bild 4.25 Bereiche im Dichtspalt mit überdecktem Stirnflächenspalt

Es wurden auch bei dieser Variante Versuche mit trockenen und öligen Partikeln (MMS) bei trockenem und eingöltem Dichtsystem mit und ohne Sperrluft sowie bei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt.

Versuchsergebnisse

Ohne Sperrluft setzt sich sowohl bei trockenen als auch bei öligen Partikeln (MMS) der Überdeckungsspalt, Bereich 4, innerhalb der Versuchszeit von 15 Min. völlig mit Partikeln zu und es kommt zum Kontakt der Teile untereinander. Bereich 4 in Bild 4.26 rechts vermittelt hier-

von einem Eindruck. Im Stirnspalt, Bereich 1 in Bild 4.26, finden sich kaum noch Partikel. Die trockenen Partikel drangen auch noch bis in den Bereich 2 vor, Bild 4.26 links. Die Eindringtiefe in das Dichtsystem ist somit gleich wie bei den Versuchen mit Stirnflächenspalt ohne Überdeckung. Ölige Partikel (MMS) konnten nicht so weit in das Dichtsystem eindringen.

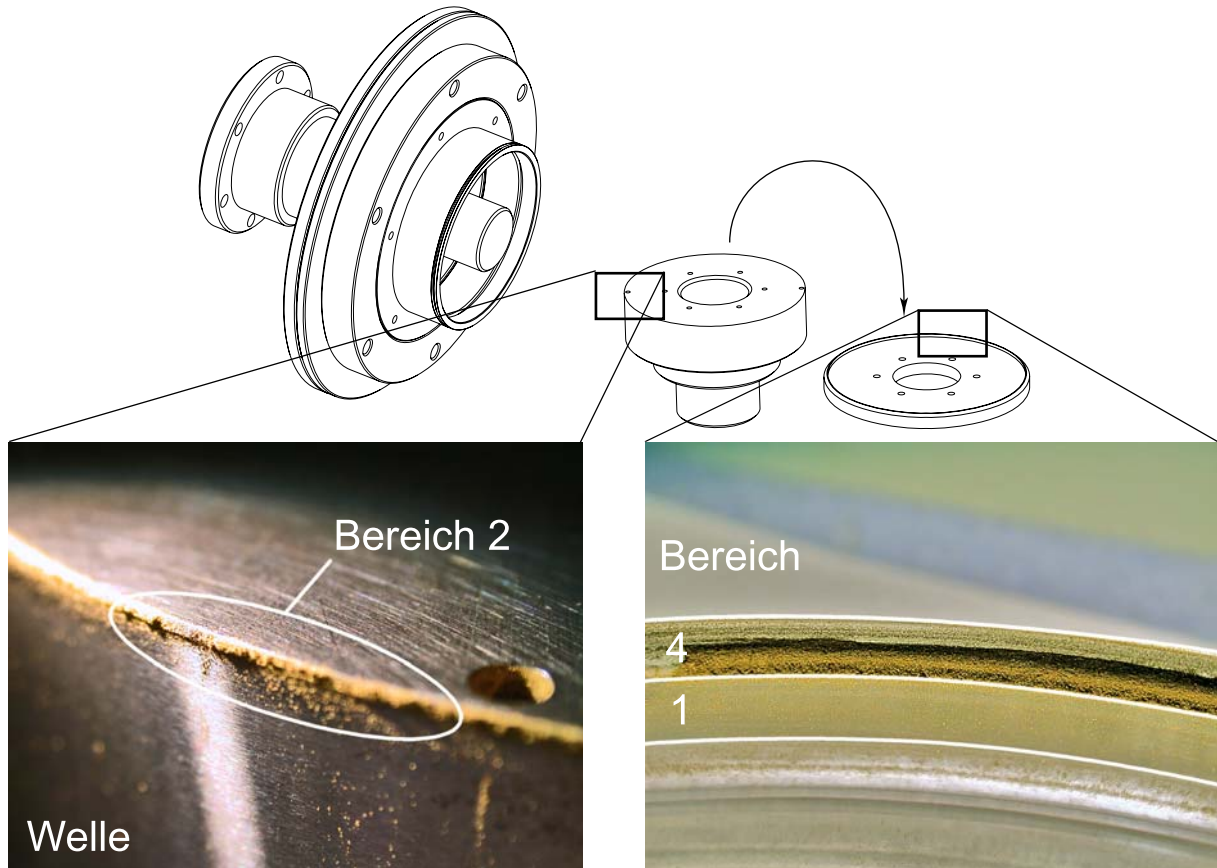


Bild 4.26 Welle und Schleuderscheibe mit Partikeln, überdeckter Stirnflächenspalt, $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{\max} = 28 \text{ m/s}$, 15 min , $\dot{V}_{\text{Sperrluft}} = 0 \text{ l/min}$.

Der Grund für dieses Verhalten ist, dass die Partikel aus dem senkrecht zur Fliehkraft liegenden Überdeckungsspalt (Bereich 4) durch die Rotation der Welle nicht mehr frei abgeschleudert werden können.

Durch den Einsatz von Sperrluft kann der Überdeckungsspalt dennoch partikelfrei gehalten werden. Im vorliegenden Fall waren dazu bei öligen Partikeln lediglich $\dot{V} = 25 \text{ l/min}$ notwendig, wozu ein Druck in der Sperrlufteinleitungsnut von $p = 6 \text{ hPa}$ notwendig war. Bild 4.27 zeigt Aufnahmen der Schleuderscheibe nach Versuchen mit verschiedenen Sperrluftvolumenströmen. Erst bei Sperrluftvolumenströmen von $\dot{V} = 12,5 \text{ l/min}$ und weniger waren eingedrungene Partikel in größerer Zahl festzustellen.

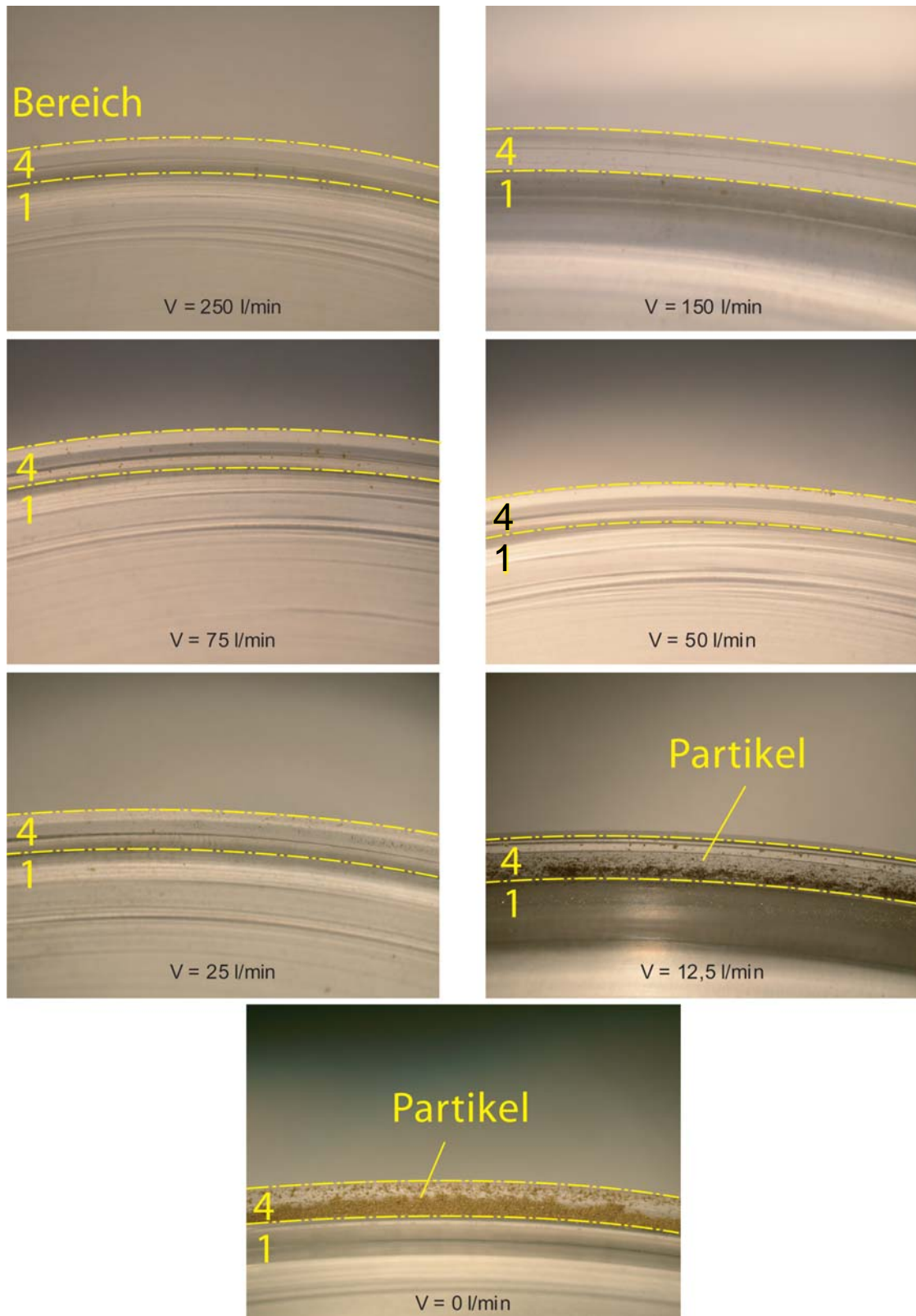


Bild 4.27 Versuche mit Sperrluft und MMS, überdeckter Stirnflächenspalt, $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 15 min , $\dot{V}_{Sperrluft} = 250 - 0 \text{ l/min}$, MMS

Ölt man die spaltbildenden Dichtungsteile kräftig ein und beaufschlagt sie bei geringer Drehzahl mit trockenen Partikeln, ist ein größerer Sperrluftstrom notwendig. Bei $\dot{V} = 75 \text{ l/min}$

Sperrluft drangen nur wenige Partikel in den Überdeckungsspalt ein. Die Partikel hafteten außerhalb des Spaltes stark an den Versuchsteilen an, da dort das Öl durch den Luftstrom hintransportiert wurde, siehe Bild 4.28.

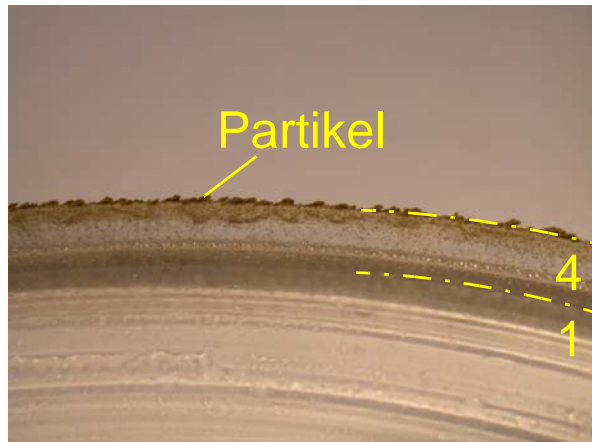


Bild 4.28 Schleuderscheibe nach dem Versuch, überdeckter Stirnflächenspalt, $n = 5 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 15 min, $\dot{V}_{Sperrluft} = 75 \text{ l/min}$, Teile ölig

Bei der Beaufschlagung des Dichtsystems mit öligen Partikeln (MMS), waren $\dot{V} = 75 \text{ l/min}$ Sperrluft bei Weitem ausreichend, um das Dichtsystem partikelfrei zu halten, siehe Bild 4.29.

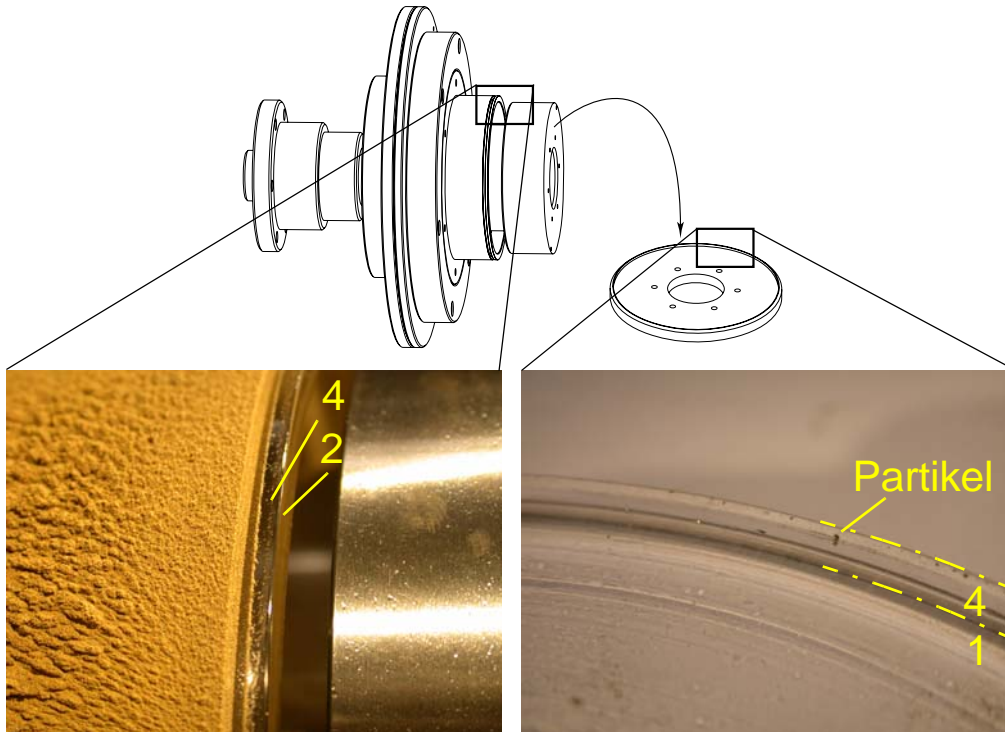


Bild 4.29 Stator und Schleuderscheibe nach dem Versuch, überd. Stirnflächenspalt, $n = 800 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 28 \text{ m/s}$, 15 min, $\dot{V}_{Sperrluft} = 75 \text{ l/min}$, Teile ölig, MMS

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse mit überdecktem Eingangsbereich

Partikel dringen in den Überdeckungsspalt ein, die Anzahl ist jedoch sehr gering. Die Partikel werden aus dem Überdeckungsspalt durch die Rotation der Welle nicht aus dem Spalt befördert. Ohne Sperrluft entstehen Ablagerungen - es besteht die Gefahr des Fressens. Durch einen gezielten Luftstrom vom Inneren des Dichtsystems in den Arbeitsraum kann der Dichtspalt frei von Partikelablagerungen gehalten werden.

Ergebnis

Prinzipiell zeigte sich auch bei den Versuchen mit den transparenten Dichtsystemen, dass Partikel in die vorhandenen Spalte eindringen. Lediglich die Eindringtiefe ist, in Analogie zu den Versuchen mit den Parallelspalten, je nach Orientierung des Spaltes zur Flugrichtung der Partikel unterschiedlich. Die Drehzahl hat nur einen geringen Einfluss auf die Eindringtiefe der Partikel in das Dichtsystem. Barrieren von Partikeln, die das Eindringen weiterer Partikel unterbinden, wie bei den Versuchen mit den parallelen Spalten in Kapitel 4.1, bilden sich jedoch nicht. Spalterweiterungen wie Nuten haben einen geringen Einfluss auf die Eindringtiefe, bringen aber das Risiko mit sich, dass angesammelte Partikel sich plötzlich lösen können, in den Spalt fallen und diesen zusetzen. Druckschwankungen im Arbeitsraum, bei denen Luft durch das Dichtsystem in Richtung Lagerraum strömt, sind unbedingt zu vermeiden.

Dichtsysteme mit einer Spaltumlenkung wie beim Stirnflächenspalt oder beim überdeckten Stirnflächenspalt können bereits durch kleine Mengen an Sperrluft partikelfrei gehalten werden. Bei diesen Versuchen waren Sperrluftströme von $\dot{V} = 25$ bis 75 l/min bereits ausreichend um die Spalte frei zu halten. Hierbei stellte sich ein Druck in der Sperrlufteinleitungsnut von $p = 5,4$ bis $20,8$ hPa ein.

Eine Berechnung der sich bei diesen Versuchen einstellenden mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist aufgrund der großen Toleranzen bei der Fertigung der Plexiglasteile nicht aussagekräftig, siehe nächstes Kapitel.

Bei den Plexiglasversuchen zeigte sich ferner, dass Dichtsysteme mit einem glatten Radialspalt dichtungstechnisch ungünstiger sind als solche mit Spaltumlenkungen, da an den Umlenkungen im Spalt die Partikel wirkungsvoll abgebremst werden. Im Dichtspalt befindliches, bzw. aus dem Dichtspalt austretendes Öl kann zum Verklumpen der Partikel und somit eventuell zum Fressen führen. Ölige Partikel aus der MMS-Bearbeitung sind nicht so kritisch wie trockene Partikel bei öligem Dichtsystem, da sie schon vor dem Spalt verkleben, und somit dringen sie erst gar nicht so weit in den Spalt ein.

Generell gilt: Ohne Sperrluft besteht bei allen Betriebsbedingungen die Gefahr des Fressens durch Ablagerungen von Partikeln im Bereich der Spaltüberdeckung.

4.3 Versuche mit metallischen Dichtsystemen und visueller Auswertung

Bei den Versuchen mit transparenten Dichtsystemen aus Plexiglas (PMMA), die im letzten Kapitel beschrieben wurden, konnten einige wichtige Erkenntnisse über das Eindringverhalten von Partikeln in enge Spalte gewonnen werden. Bedingt durch die mechanischen Eigenschaften von Plexiglas ergaben sich jedoch auch einige Schwierigkeiten. Plexiglas ist ein thermoplastischer Werkstoff, der bei der spanenden Bearbeitung sehr vorsichtig zu handhaben ist. Aufgrund der Wärmeentwicklung beim Zerspanen kann es zu Wärmeausdehnungen kommen, die die Maßhaltigkeit beeinflussen. Eine weitere Eigenschaft von Plexiglas ist eine gewisse Wasseraufnahme und damit verbunden ein Quellen. Diese Punkte sollen nur exemplarisch dafür stehen, dass die Herstellung von Präzisionsteilen aus PMMA nicht in der Qualität möglich ist wie sie aus metallischen Werkstoffen, hier Stahl, realisiert werden können. Ferner ist auch davon auszugehen, dass die Oberflächeneigenschaften der Dichtspalte wie Rauheit und elektrostatische Aufladung ebenfalls Einfluss auf das Ablagerungsverhalten der Partikel haben.

Für eine praxisgerechte Konstruktion von berührungsfreien Dichtsystemen ist eine Aussage über die genauen Spaltabmessungen und deren Einfluss notwendig. Aus diesem Grunde wurden in weiteren Versuchsreihen Untersuchungen mit metallischen Dichtsystemen durchgeführt. Zum Einsatz kamen die Komponenten und Dichtsysteme, die mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen modularen Dichtsystem offene, achsparallele Spalte mit unterschiedlichen Spalthöhen und Spaltlängen bildeten. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen werden im vorliegenden Kapitel dargestellt.

4.3.1 Versuchsdurchführung mit visueller Versuchsauswertung

Ziel dieser Untersuchungen war die Bestimmung des Eindring- und des Ablagerungsverhaltens von Partikeln ähnlich den Versuchen mit den transparenten Dichtsystemen, jedoch mit definierten Spaltgeometrien und dem systematischen Einsatz von Sperrluft.

Vor jedem Versuch wurden die Versuchsteile erst gereinigt, entfettet und anschließend leicht eingeölt, um ein Anhaften der Partikel an den Spaltwänden zu ermöglichen. Dann wurde die Partikelstreuung gestartet und insgesamt eine Menge von ca. 10 kg Partikeln auf das Dichtsystem beschleunigt. Die MMS-Beaufschlagungseinheit wurde bei diesen Versuchen nicht verwendet, es kamen nur trockene Partikel zum Einsatz.

Zur Auswertung der Versuche wurde die Prüfwelle geöffnet und die darin abgelagerten Partikel, die nicht im Bereich des Dichtsystems waren, grob abgesaugt. Anschließend wurde die Welle ausgebaut und untersucht. Der optische Eindruck des Stators und die darauf vorhandenen Partikel wurden ebenfalls festgehalten.

4.3.2 Definition der Ablagerungsgrenze

Als Ablagerungsgrenze abhängig von den Sperrluftparametern wird derjenige Zustand bezeichnet, bei dem Partikel im ersten Teil des arbeitsraumseitigen Dichtspaltes haften geblieben sind. Es dürfen sich keine Partikel im Bereich der Sperrlufteinleitung befinden. Zur Verdeutlichung sind die Bereiche, in denen sich Partikel bei den unterschiedlichen Betriebsverhältnissen finden dürfen, in Bild 4.30 dargestellt.

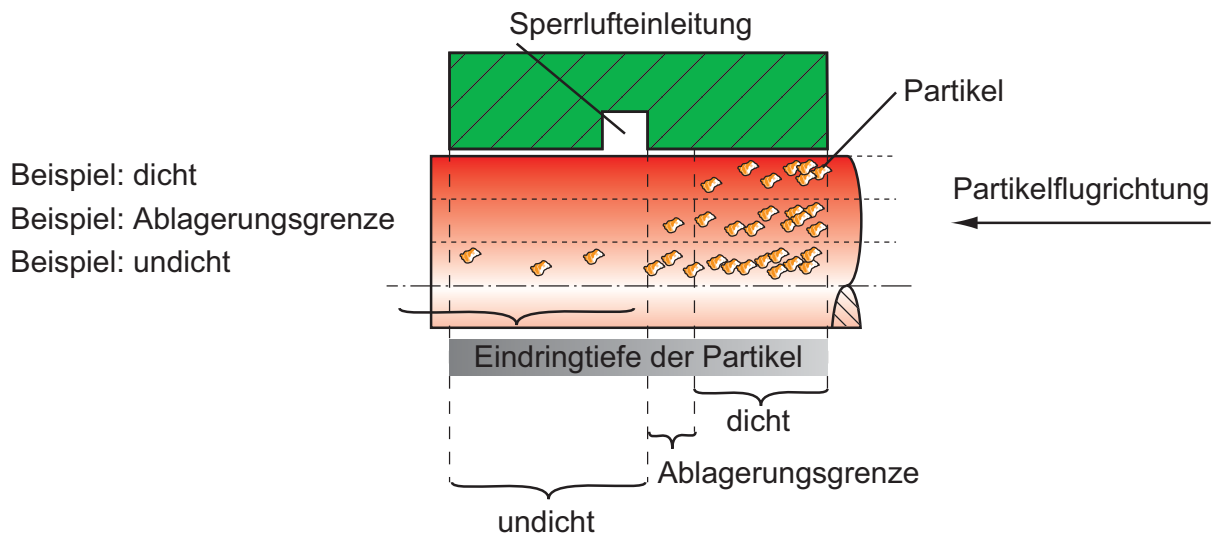


Bild 4.30 Schematische Darstellung: dicht - Ablagerungsgrenze - undicht

Versuche, bei denen sich nur im ersten Spaltteil Partikel abgelagert haben, werden im Folgenden als dicht bezeichnet, Bild 4.30 oben. Hierbei ist davon auszugehen, dass die eingedrungenen Partikel durch den Sperrluftstrom aus dem Spalt wieder ausgeblasen werden und nicht in den abzudichtenden Raum gelangen. Finden sich nach einem Versuch Partikel in der Nähe der Sperrlufteinleitungsnut, ist die kritische Grenze erreicht. Ab dieser Grenze muss davon ausgegangen werden, dass einzelne Partikel in die Sperrlufteinleitungsnut vorgedrungen sind und dann mit dem lagerseitigen Sperrluftstrom in den abzudichtenden Raum ausgeblasen wurden, Bild 4.30 Mitte. Finden sich Partikel hinter der Sperrlufteinleitungsnut ist sicher, dass Partikel in den abzudichtenden Raum eingedrungen sind, das Dichtsystem war undicht, Bild 4.30 unten. Eine Erfassung der Leckagepartikel fand nicht statt, über den Grad der Dichtheit kann folglich keine Aussage getroffen werden, hierzu siehe Kapitel 4.4.

Zur Auswertung der Versuche wurde das Dichtsystem nach der Beaufschlagung mit den Partikeln demontiert und die dichtspaltbildenden Flächen fotografiert. In Bild 4.31 ist das demontierte Dichtsystem schematisch dargestellt. Die beiden Rechtecke markieren die Bildausschnitte, die bei den nachfolgenden Versuchsbeschreibungen zu sehen sind.

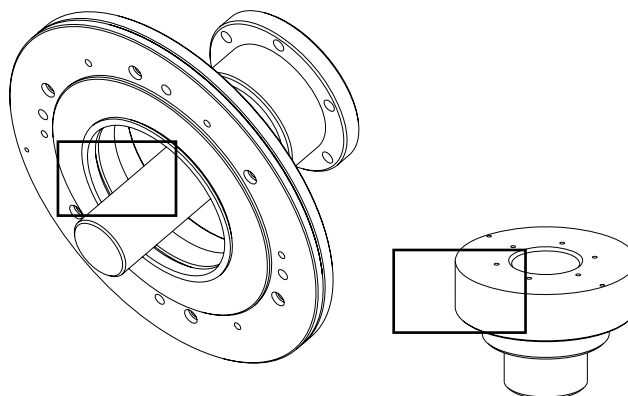
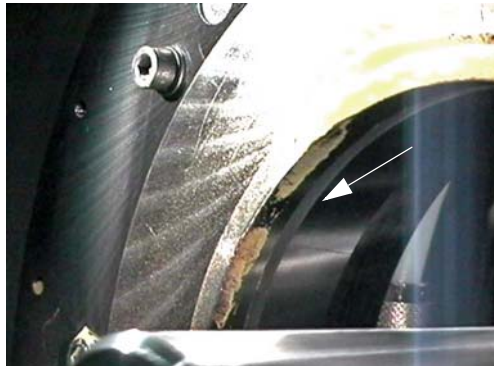


Bild 4.31 Betrachtete Bildausschnitte links am Stator und rechts an der Welle

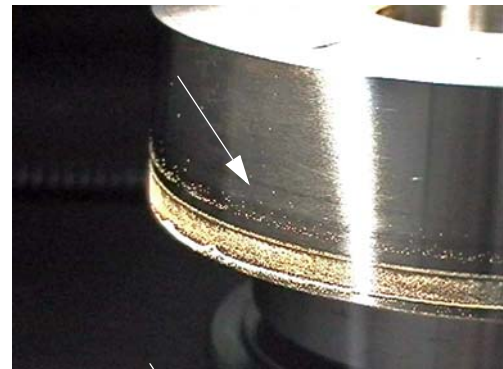
Die Aufnahmen in Bild 4.32 bis Bild 4.34 veranschaulichen die Vorgänge im Dichtspalt bei unterschiedlich gewählten Sperrluftparametern. Exemplarisch wurden die Aufnahmen der Welle 1 mit einer Spalthöhe $h = 0,14 \text{ mm}$ bei einer maximalen Partikel-Geschwindigkeit von $v_{max} = 13 \text{ m/s}$ ausgewählt. Die Wellendrehzahl betrug $n = 150 \text{ min}^{-1}$.



Versuch 1
 $h = 0,14 \text{ mm}$
 $v_{max} = 13 \text{ m/s}$
 $\dot{V} = 2 \text{ l/min}$
 $p = 0,5 \text{ hPa}$



Versuch 2
 $h = 0,14 \text{ mm}$
 $v_{max} = 13 \text{ m/s}$
 $\dot{V} = 10 \text{ l/min}$
 $p = 2,09 \text{ hPa}$



Versuch 3
 $h = 0,14 \text{ mm}$
 $v_{max} = 13 \text{ m/s}$
 $\dot{V} = 20 \text{ l/min}$
 $p = 4,01 \text{ hPa}$

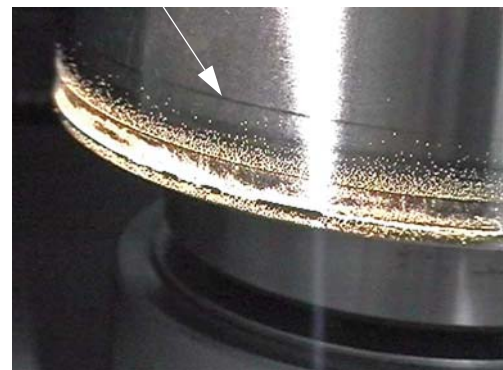
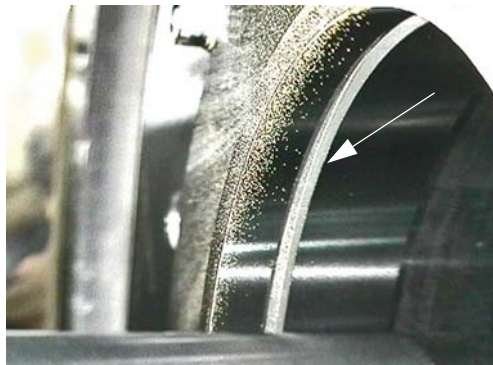


Bild 4.32 Welle 1: Sperrluftparameter unterhalb der Ablagerungsgrenze - undicht, der Pfeil deutet auf die Position der Sperrlufteinleitungsnut

Bild 4.32 zeigt jeweils links den Stator und rechts die Welle nach drei Versuchen mit offenem Dichtungseingangsbereich, bei denen die Sperrluftparameter unterhalb der Ablagerungsgrenze für diese Partikelgeschwindigkeit lagen. Die Pfeile weisen jeweils auf die Position der lagerseitigen Begrenzung der Sperrlufteinleitungsnut hin, siehe auch Bild 4.30. In allen drei Fällen gelangten Partikel bis zur Nut und darüber hinaus. Die Partikel lagerten sich im gesamten Dichtspalt ab. Im oberen Bild wird noch ein zweites Problem sichtbar. Bei diesem Versuch mit nur $\dot{V} = 2 \text{ l/min}$ Sperrluft war der Luftstrom so schwach, dass sich Partikel in größeren Mengen ablagern konnten. Sie bildeten an manchen Stellen dicke Schichten, welche die Spalthöhe ausfüllten. Es bestand die Gefahr des Fressens.

Je stärker der gewählte Luftstrom war, desto weniger Partikel lagerten sich auf den Spaltwänden ab. Die Aufnahme Bild 4.33 rechts zeigt die Welle im Bereich der Ablagerungsgrenze. Partikel haben sich zwar im Spalt abgelagert aber nur im ersten Teil des arbeitsraumseitigen Dichtspaltes. Der Sperrluftstrom von $\dot{V} = 55$ l/min im Spalt war groß genug, um ein großflächiges Ablagern der Partikel zu verhindern.



Versuch 4
 $h = 0,14$ mm
 $v_{max} = 13$ m/s
 $\dot{V} = 55$ l/min
 $p = 13,1$ hPa

Ablagerungsgrenze

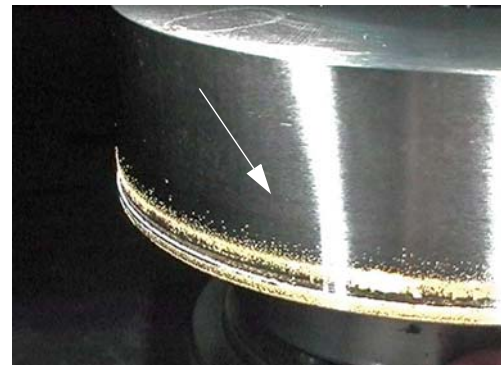
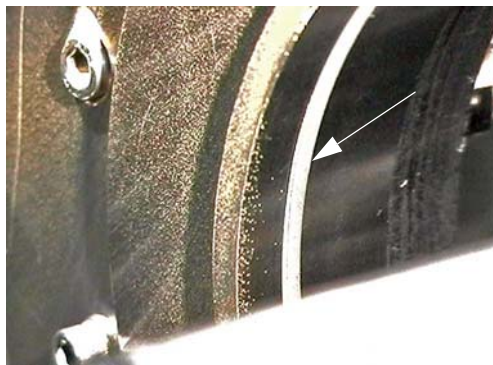


Bild 4.33 Welle 1: Sperrluftparameter im Bereich der Ablagerungsgrenze

Wird der Sperrluftstrom auf $\dot{V} = 100$ l/min Sperrluft erhöht, ergeben sich die in Bild 4.34 dargestellten Verhältnisse. Die Menge der im Drosselspalt abgelagerten Partikel ist nochmals geringer. Eine Gefahr des Fressens besteht nicht. Auf der Welle deutlich zu erkennen ist der scharfe Partikelrand am arbeitsraumseitigen Spaltende, der bei den vorigen Bildern bei geringerem Sperrluftstrom wesentlich breiter ausfiel.



Versuch 5
 $h = 0,14$ mm
 $v_{max} = 13$ m/s
 $\dot{V} = 100$ l/min
 $p = 28,4$ hPa



Bild 4.34 Welle 1: Sperrluftdruck oberhalb der Ablagerungsgrenze

4.3.3 Einfluss der Partikelgeschwindigkeit und der Drosselpalthöhe

Um den Einfluss der Drosselpalthöhe zwischen Welle und Stator auf das Ablagerungsverhalten der Partikel im Sperrluftdichtsystem untersuchen zu können, wurden Versuche mit verschiedenen Wellendurchmessern und offenem Dichtungseingangsbereich durchgeführt. Als weiterer Parameter wurde jeweils die maximale Partikelgeschwindigkeit variiert.

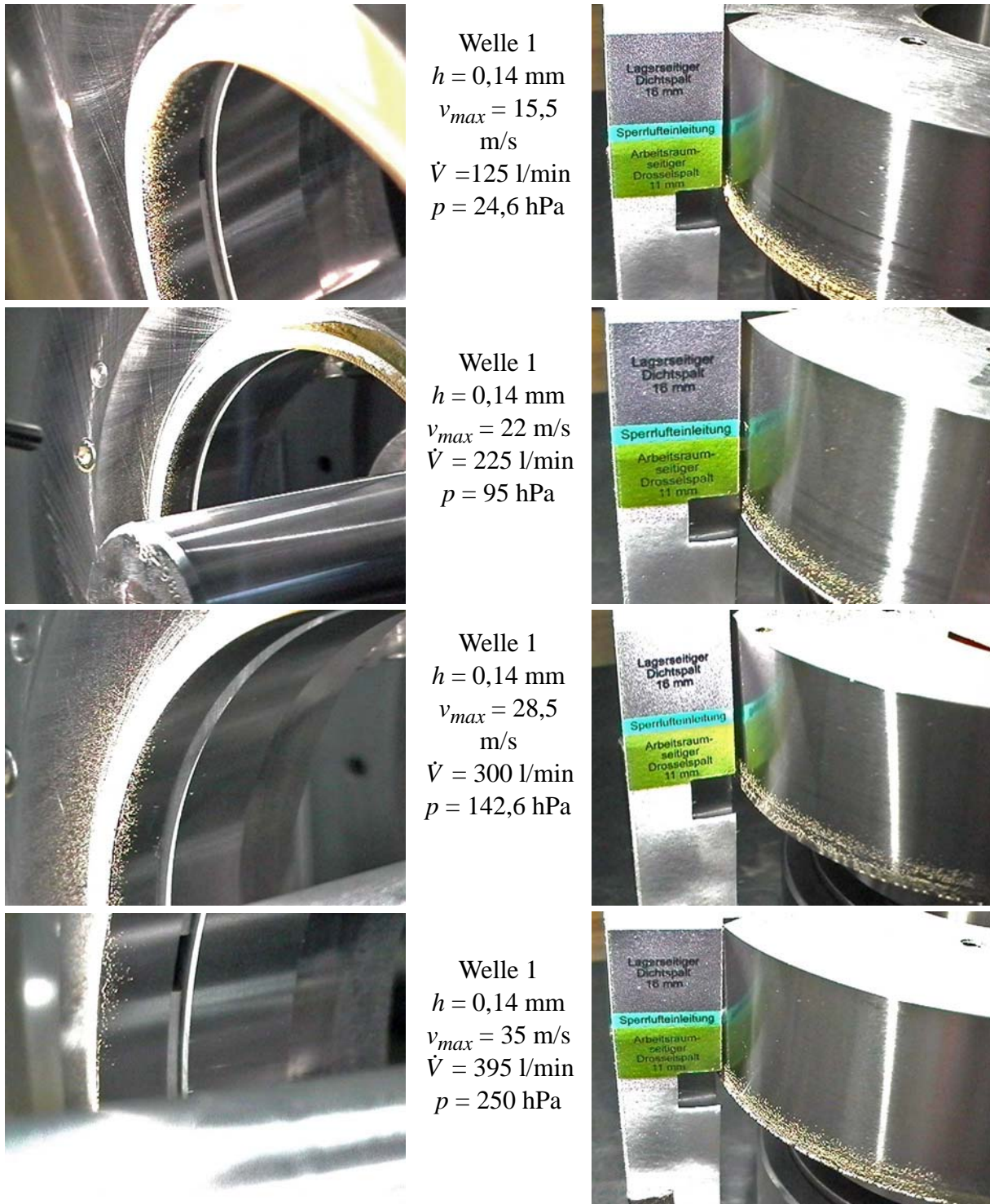


Bild 4.35 Aufnahmen der Welle 1 und des Stators im Bereich der Ablagerungsgrenze

Bei konstantem Wellendurchmesser und somit konstanter Drosselspalthöhe ergab sich eine lineare Abhängigkeit des benötigten Sperrluftstroms zum Erreichen der Ablagerungsgrenze und zur maximalen Partikelgeschwindigkeit. Die Aufnahmen von Welle und Stator nach den jeweiligen Versuchen sind in Bild 4.35 dargestellt. Sie zeigen Versuche ohne Eingangsberreichsüberdeckung mit einer Drosselspalthöhe von $h = 0,14 \text{ mm}$ und einer arbeitsraumseitigen Drosselspalthöhe von $l_A = 11 \text{ mm}$. In allen Fällen konnten sich nur am Anfang des arbeits-

raumseitigen Drosselspaltes einige Partikel ablagern. Die Aufteilung in die einzelnen Bereiche, arbeitsraumseitiger Drosselspalt, Sperrlufteinleitungsnut und lagerraumseitiger Drosselspalt, ist links neben der Welle mittels eines Maßstabs gekennzeichnet. Der mittlere Streifen zeigt die Position der Sperrlufteinleitungsnut an. Am Stator ist die Sperrlufteinleitungsnut deutlich sichtbar.

Die Parameter bei Erreichen der Ablagerungsgrenze, bei denen die oben gezeigten Versuche durchgeführt wurden, sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Zusätzlich sind die Werte für den Sperrluftvolumenstrom und den Sperrluftdruck angegeben, die sich für den Betriebspunkt bei der Ablagerungsgrenze der Versuche mit Drosselspalthöhen von $h = 0,11$ mm und $h = 0,09$ mm ergeben haben.

TABELLE 4.1 Versuchsergebnisse mit trockenen Partikeln und verschiedenen Spalthöhen im Bereich der Ablagerungsgrenze

Versuch Nr.	Drossel- spalthöhe h [mm]	Max. Partikelgeschw. v_{max} [m/s]	Sperrluft- volumenstr. \dot{V}_L [l/min]	Sperrluft- druck p_L [hPa]
1	0,14	15,5	125	24,6
2	0,14	22,0	225	95,0
3	0,14	28,5	300	142,6
4	0,14	35,0	395	250,0
5	0,11	15,5	63	37,3
6	0,11	22,0	140	83,0
7	0,11	28,5	205	121,5
8	0,11	35,0	277	164,1
9	0,11	41,5	340	201,5
10	0,09	15,5	36	21,3
11	0,09	22,0	93	55,1
12	0,09	28,5	146	86,5
13	0,09	35,0	203	120,3
14	0,09	41,5	261	154,7

Wird der ermittelte Sperrluftbedarf zum Erreichen der Ablagerungsgrenze für eine gegebene Drosselspalthöhe über der maximalen Partikelgeschwindigkeit aufgetragen, so ergibt sich der in Bild 4.36 für die Drosselspalthöhen $h = 0,14$ mm, $h = 0,11$ mm und $h = 0,09$ mm dargestellte, lineare Zusammenhang. Die oberste Kurve repräsentiert die Ergebnisse der Versuche aus Bild 4.35, die weiteren Werte entsprechen denen aus Tabelle 4.1.

Die Kurven für die gefundenen Ablagerungsgrenzen verlaufen mit abnehmender Spalthöhe auf einem niedrigen Niveau und flacher als bei den größeren Drosselspalthöhen, d.h. es wird weniger Sperrluft benötigt um die Partikel am zusetzen des Spaltes zu hindern.

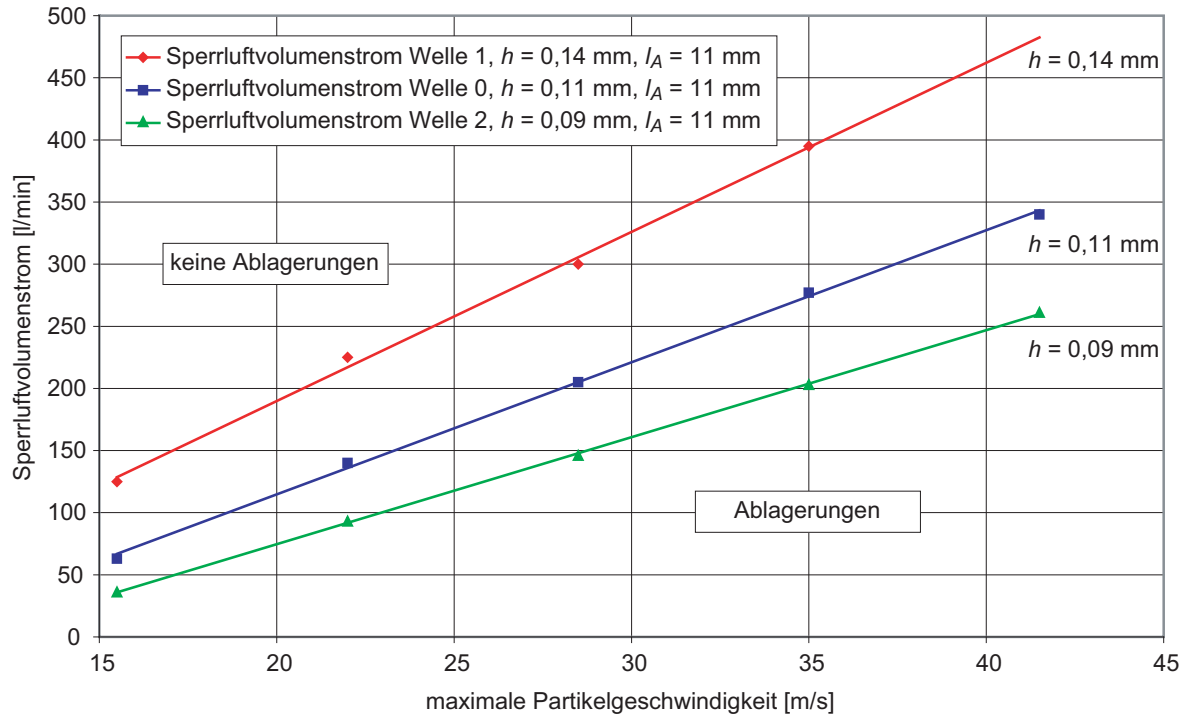


Bild 4.36 Sperrluftbedarf über der max. Partikelgeschwindigkeit bei $h = 0,14$ mm $h = 0,11$ mm und $h = 0,09$ mm, $l_A = 11$ mm

Trägt man die in der Sperrlufteinleitungsnut gemessenen Sperrluftdrücke im Bereich der Ablagerungsgrenzen der drei untersuchten Spalthöhen über der max. Partikelgeschwindigkeit auf, so erhält man das in Bild 4.37 dargestellte Verhalten.

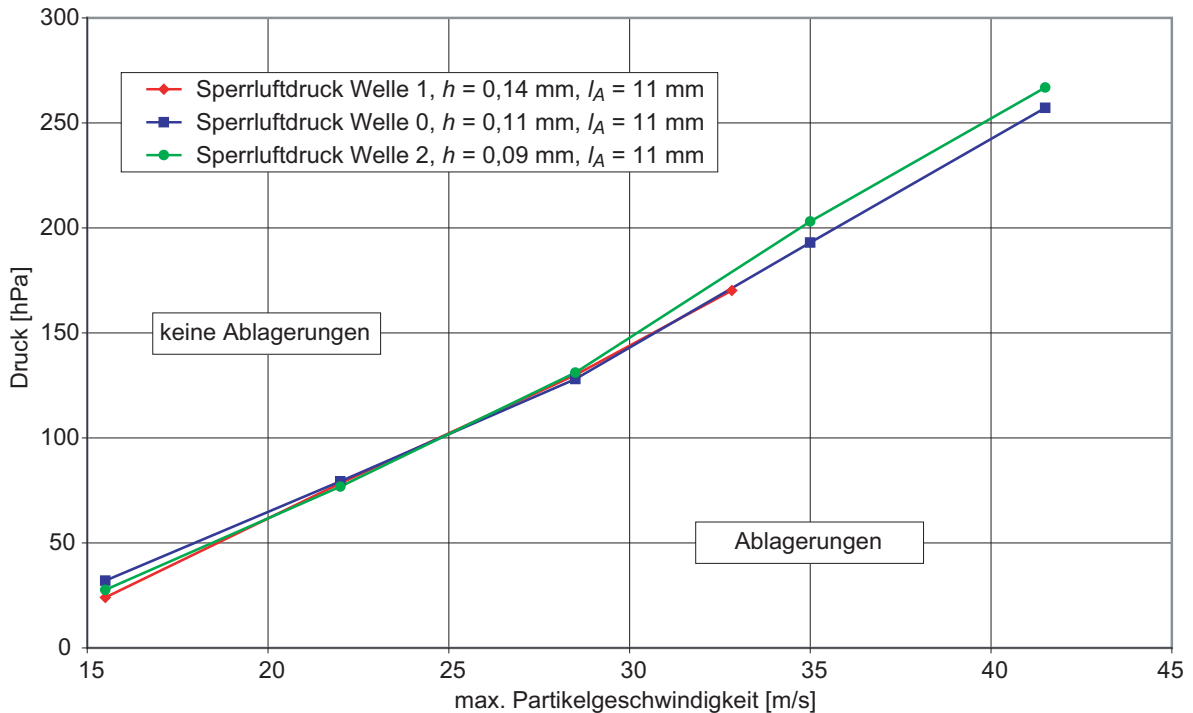


Bild 4.37 Gemessene Sperrluftdrücke bei Erreichen der Ablagerungsgrenze über der max. Partikelgeschwindigkeit

Der Sperrluftdruck, der in der Sperrlufteinleitungsnut notwendig ist, ist praktisch unabhängig von der Spalthöhe h . Die leichten Abweichungen der gemessenen Druckkurven voneinander sind vermutlich darin begründet, dass der Volumenstrom durch einen zylindrischen Ringspalt stark von der Exzentrizität des Spaltes abhängt. So kann der Volumenstrom bei maximaler Exzentrizität bis auf den 2,5-fachen Wert ansteigen.

Ebenfalls mit dem Sperrluftstrom im Zusammenhang steht die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in den Teilspalten. Der zugeführte Volumenstrom \dot{V} teilt sich zunächst einmal in zwei Teilströme gemäß der folgenden Formel auf:

$$\dot{V} = \dot{V}_A + \dot{V}_L \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Hierbei stehen die Indices A für den arbeitsraumseitigen Spalt und L für den lagerseitigen Spalt. Diese beiden Teilströme sind umgekehrt proportional zum Verhältnis der Drosselspaltlängen l .

$$\frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_L} = \frac{l_L}{l_A} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Aus den so erhaltenen Teilströmen kann nun mit Hilfe der durchströmten Spaltfläche A_{Spalt} die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_A berechnet werden.

$$v_A = \frac{\dot{V}_A}{A_{\text{Spalt}}} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Bei den angegebenen Volumenströmen handelt es sich um Normliter bezogen auf 20°C und 1013 hPa, siehe Kapitel 2.7. Aufgrund der Kompressibilität ist der Volumenstrom in der Sperrlufteinleitungsnut geringer und nimmt mit sinkendem Druck über die Spaltlänge zu, bis am Spaltende Umgebungsdruck erreicht wird. Bei einem Sperrluftdruck in der Einleitungsnut von 120 hPa ist der Volumenstrom lokal um maximal 6 % geringer als bei Umgebungsdruck. Die Angaben des Volumenstroms in Normliter entsprechen demnach den Verhältnissen am Spaltende. Die Strömungsgeschwindigkeit verhält sich entsprechend. Sie ist im Bereich der Einleitungsnut am kleinsten und nimmt über der Drosselspaltlänge mit steigendem Volumenstrom zu. Die hier angegebenen Werte entsprechen den maximalen Werten für den Volumenstrom und die Strömungsgeschwindigkeit jeweils am Spaltende.

Die beim Erreichen der Ablagerungsgrenze berechneten Strömungsgeschwindigkeiten am Spaltende des arbeitsraumseitigen Drosselspaltes sind in Bild 4.38 aufgetragen.

Es wurden hier nur die Strömungsgeschwindigkeiten der arbeitsraumseitigen Spalte aufgetragen, da nur dieser Teilspalt zur Beurteilung herangezogen wurde. Um Partikel mit einer bestimmten kinetischen Energie mit Hilfe eines zylindrischen Ringspaltes am Ablagern auf den Spaltwänden zu hindern, ist der Sperrluftstrom so einzustellen, dass sich in der Einleitungsnut ein bestimmter Druck aufbaut und damit verbunden eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit im Spalt erreicht wird.

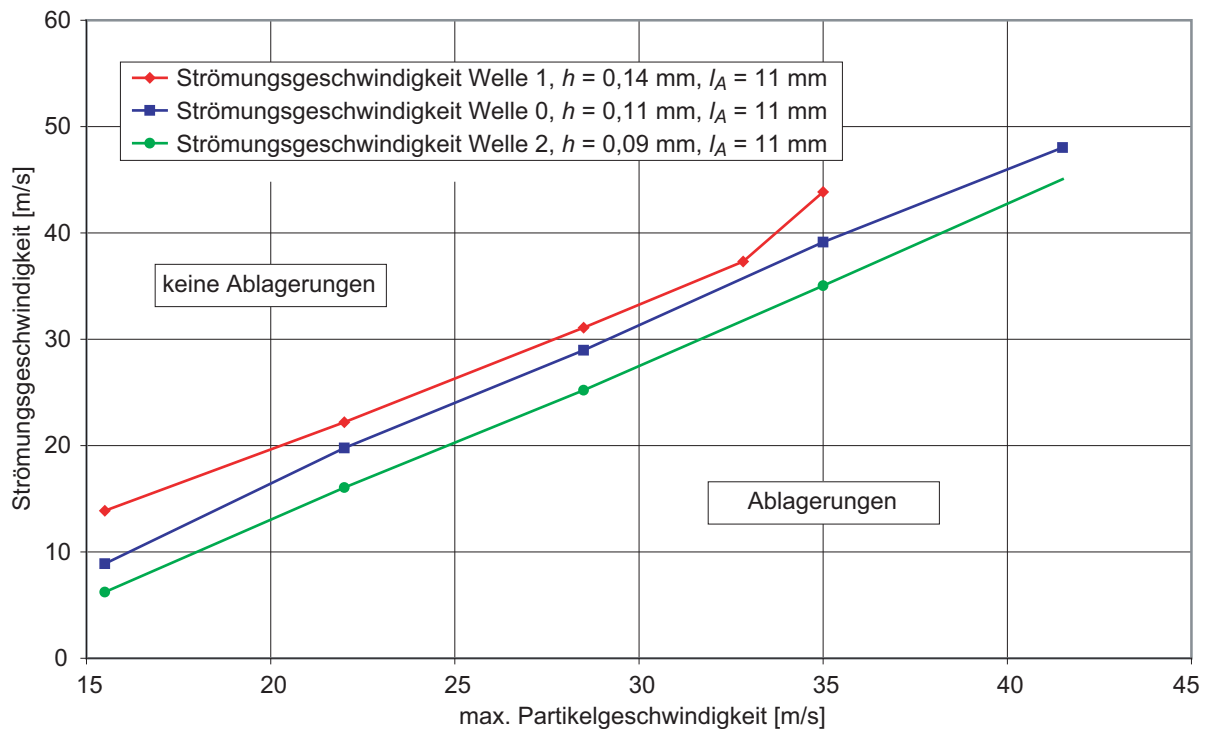


Bild 4.38 Strömungsgeschwindigkeiten im arbeitsraumseitigen Drosselspalt beim Erreichen der Ablagerungsgrenze in Abhängigkeit von der max. Partikelgeschwindigkeit

Betrachtet man hierzu die Formel zur Berechnung des Volumenstromes \dot{V} durch einen zylindrischen Ringspalt ohne die Kompressibilität der Luft zu berücksichtigen (alle Angaben in Normliter), erhält man als Zusammenhang zwischen Volumenstrom \dot{V} und Druckdifferenz Δp eine Proportionalität:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta p \cdot h_0^3}{12 \cdot \eta \cdot l} \Rightarrow \Delta p \propto \frac{\dot{V}}{h_0^3} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

In der Formel sind, für die hier betrachteten Versuche, der Durchmesser D der Statorteile, die Spalllänge l und die Viskosität η der Luft als Konstanten zu betrachten. Aus (4.4) folgt dann die direkte Proportionalität zwischen Druckdifferenz Δp und Volumenstrom \dot{V} dividiert durch die Spalthöhe h_0^3 .

Einschränkend ist hier noch zu erwähnen, dass die Formel zur Volumenstromberechnung nur bei laminaren Strömungen anwendbar ist. Entscheidend ist hierfür die Reynoldszahl Re :

$$Re = \frac{v \cdot 2h \cdot \rho}{\eta} \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Laminare Strömung herrscht, solange die Reynoldszahl kleiner als die kritische Reynoldszahl mit $Re_{krit} = 2000 \dots 4000$ ist. Bei den hier durchgeführten Versuchen lag die Reynoldszahl

maximal bei $Re = 925$, also noch deutlich im Bereich der laminaren Strömung und damit im Gültigkeitsbereich der Formel.

Eine weitere Größe, die den Drosselspalt festlegt, ist die Länge des Spaltes, deren Einfluss in einer anschließenden Versuchsreihe ermittelt wurde.

Zusammenfassung der Versuche mit unterschiedlichen Drosselspalthöhen

Mit sinkender Drosselspalthöhe sinkt der Sperrluftbedarf und somit die Strömungsgeschwindigkeit, die notwendig ist um den Betriebszustand der Ablagerungsgrenze zu erreichen.

4.3.4 Einfluss der Drosselspaltlänge

Um den Einfluss der Drosselspaltlänge zu untersuchen, wurden Versuche mit zwei unterschiedlichen arbeitsraumseitigen Drosselspaltlängen durchgeführt. Hierbei wurden die Sperrluftparameter so gewählt, dass sich jeweils der gleiche lagerraumseitige Sperrluftvolumenstrom \dot{V}_L einstellte. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

TABELLE 4.2 Aufteilung der Sperrluftvolumenströme bei Erreichen der Ablagerungsgrenze bei einer Drosselspalthöhe $h = 0,14$ mm mit $l_A = 11$ bzw. 8 mm arbeitsraumseitigem Drosselspalt

	max. Partikelgeschw. v_{max} [m/s]	Sperrluftstrom gesamt \dot{V} [l/min]	Sperrluftstrom lagers. \dot{V}_L [l/min]	Sperrluftstrom arbeitsr. \dot{V}_A [l/min]
Drosselspaltlänge $l_A = 11$ mm	15,5	125	51	74
	22,0	225	92	133
	28,5	300	122	177
	35,0	395	161	234
	41,5	480	196	284
Drosselspaltlänge $l_A = 8$ mm	15,5	153	51	102
	22,0	275	92	183
	28,5	367	122	245
	35,0	483	161	322

Die Aufteilung des zugeführten Sperrluftstroms \dot{V} auf den lagerraumseitigen Drosselspaltstrom \dot{V}_L und den arbeitsraumseitigen Drosselspaltstrom \dot{V}_A erfolgt gemäß (4.2) umgekehrt proportional zu den Spaltlängen. Der für die Ablagerungsgrenze benötigte Sperrluftstrom im arbeitsraumseitigen Drosselspalt bei einer Spaltlänge von $l_A = 8$ mm stieg gegenüber der Spaltlänge $l_A = 11$ mm um $3/8$ auf $11/8$ an, also ebenfalls umgekehrt proportional zur arbeitsraumseitigen Spaltlänge l_A ; die lagerraumseitige Spaltlänge l_L von 16 mm wurde konstant gehalten, Bild 4.39.

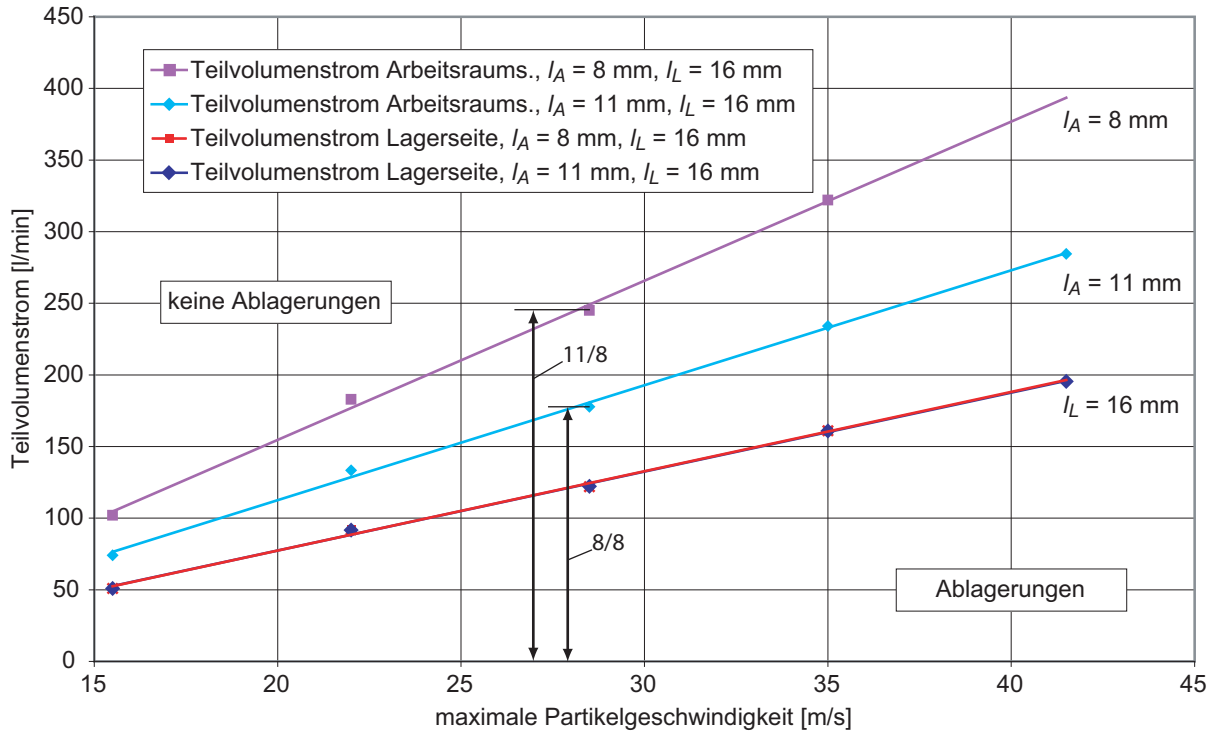


Bild 4.39 Aufteilung der Sperrluftströme in den einzelnen Teilspalten bei Erreichen der Ablagerungsgrenze in Abhängigkeit von der arbeitsraumseitigen Drosselspaltlänge über der maximalen Partikelgeschwindigkeit.

Ein Kontrollversuch mit einer Drosselspalthöhe $h = 0,11$ mm und einer arbeitsraumseitigen Drosselspaltlänge von $l_A = 8$ mm liefert folgende Ergebnisse, wie in Tabelle 4.3 dargestellt.

TABELLE 4.3 Aufteilung der Sperrluftvolumenströme bei Erreichen der Ablagerungsgrenze bei einer Drosselspalthöhe $h = 0,11$ mm mit $l_A = 11$ bzw. 8 mm arbeitsraumseitigem Drosselspalt

	max. Partikelgeschw. v_{max} [m/s]	Sperrluftstrom gesamt \dot{V} [l/min]	Sperrluftstrom lagers. \dot{V}_L [l/min]	Sperrluftstrom arbeitsr. \dot{V}_A [l/min]
Drosselspaltlänge $l_A = 11$ mm	15,5	63	26	37
	22,0	140	57	83
	28,5	205	84	121
	35,0	277	113	164
	41,5	340	139	201
Drosselspaltlänge $l_A = 8$ mm	15,5	111	37	74
	22,0	200	67	133
	28,5	267	89	178
	35,0	351	117	234
	41,5	427	142	285

Werden die Versuchsergebnisse in einem Diagramm aufgetragen, Bild 4.40, so zeigen sich ähnliche Verläufe wie bei den Versuchen mit einer Drosselspalthöhe von $h = 0,14$ mm.

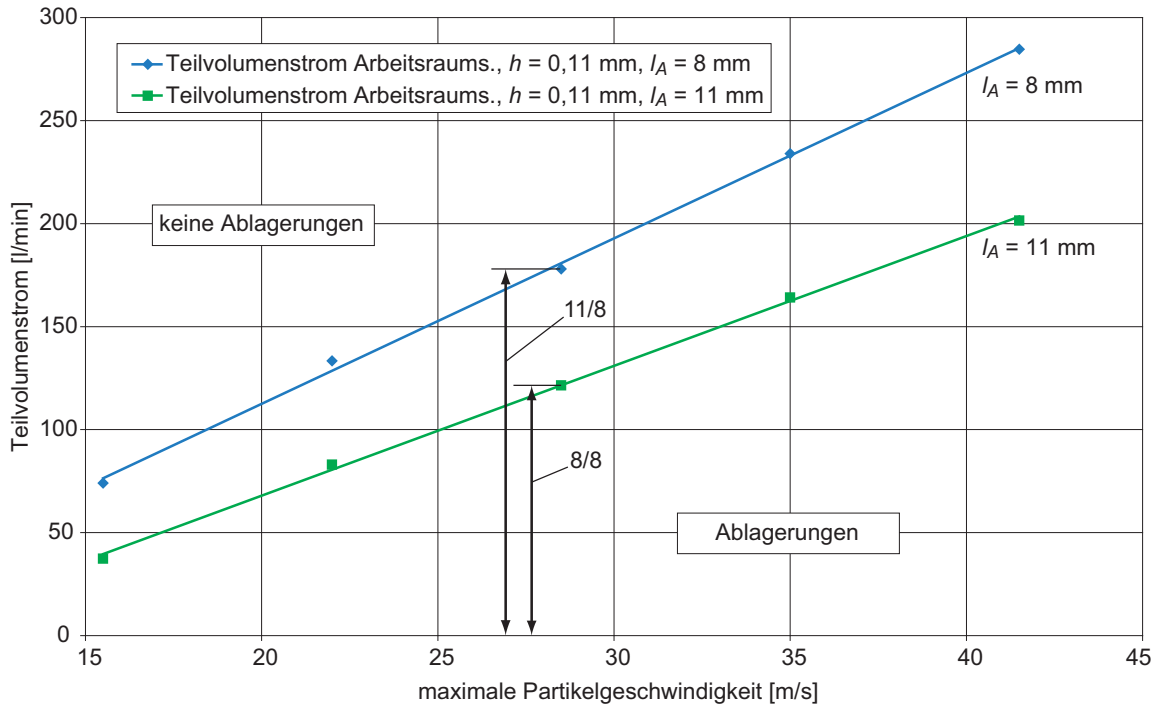


Bild 4.40 Benötigter Sperrluftstrom in Abhängigkeit von der arbeitsraumseitigen Drosselspaltlänge über der max. Partikelgeschwindigkeit

Die Ablagerungsgrenze liegt für den kurzen Drosselspalt mit $l_A = 8$ mm auch wieder um ca. $3/8$ über der des längeren Drosselspaltes mit $l_A = 11$ mm.

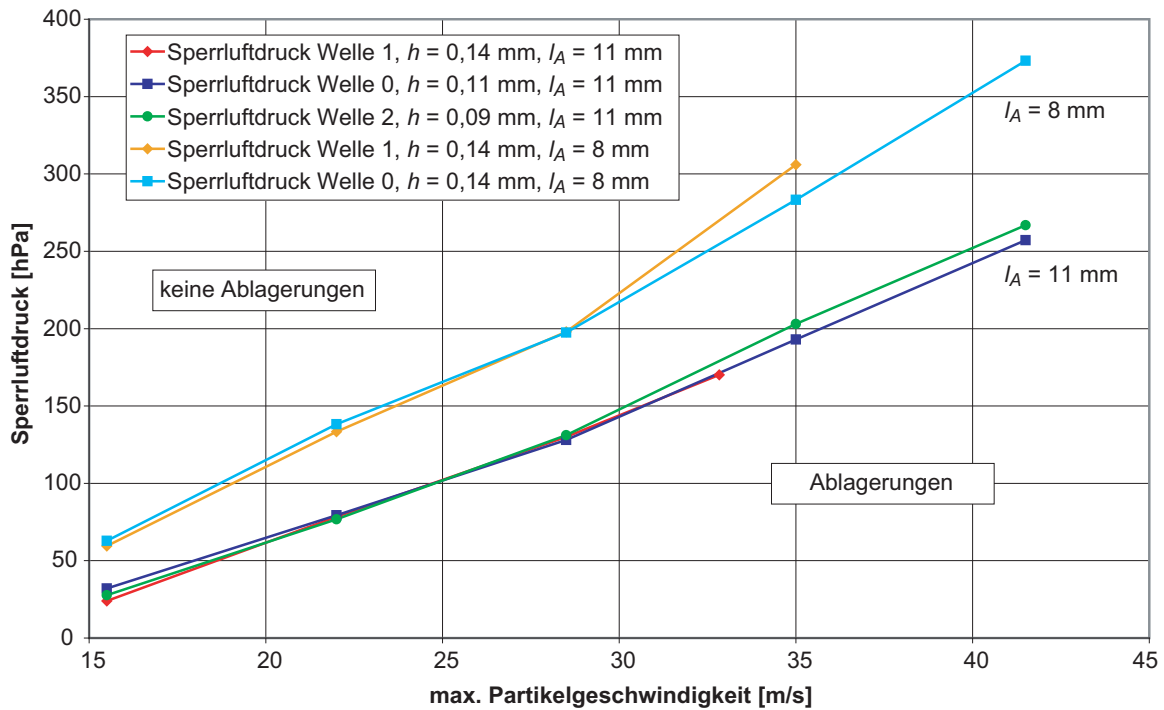


Bild 4.41 Gemessene Sperrluftdrücke bei der Ablagerungsgrenze über der max. Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der arbeitsraumseitigen Drosselspaltlänge $l_A = 8$ mm bzw. $l_A = 11$ mm

Bei den gemessenen Sperrluftdrücken in der Sperrlufteinleitungsnut ergibt sich kein Einfluss der Drosselspaltheöhe auf den Sperrluftdruckbedarf, vgl. Bild 4.41. Die beiden Kurven aus den Versuchen mit den kurzen Drosselspalten liegen, wie die der längeren Drosselspalte, auf einer Geraden. Der Druck, der in der Einleitungsnut zum Erreichen der Ablagerungsgrenze herrschen muss, liegt jedoch beim kurzen Drosselspalt höher. Die Steigung der Kurve ist größer als die der Kurve des Drosselspaltes mit $l_A = 11$ mm, d.h. bei kürzeren und höheren Spalten braucht man verhältnismäßig mehr Luft als bei langen und engen Spalten.

Bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten im arbeitsraumseitigen Drosselspalt zeigt sich demnach ein ähnliches Bild, vgl. Bild 4.42.

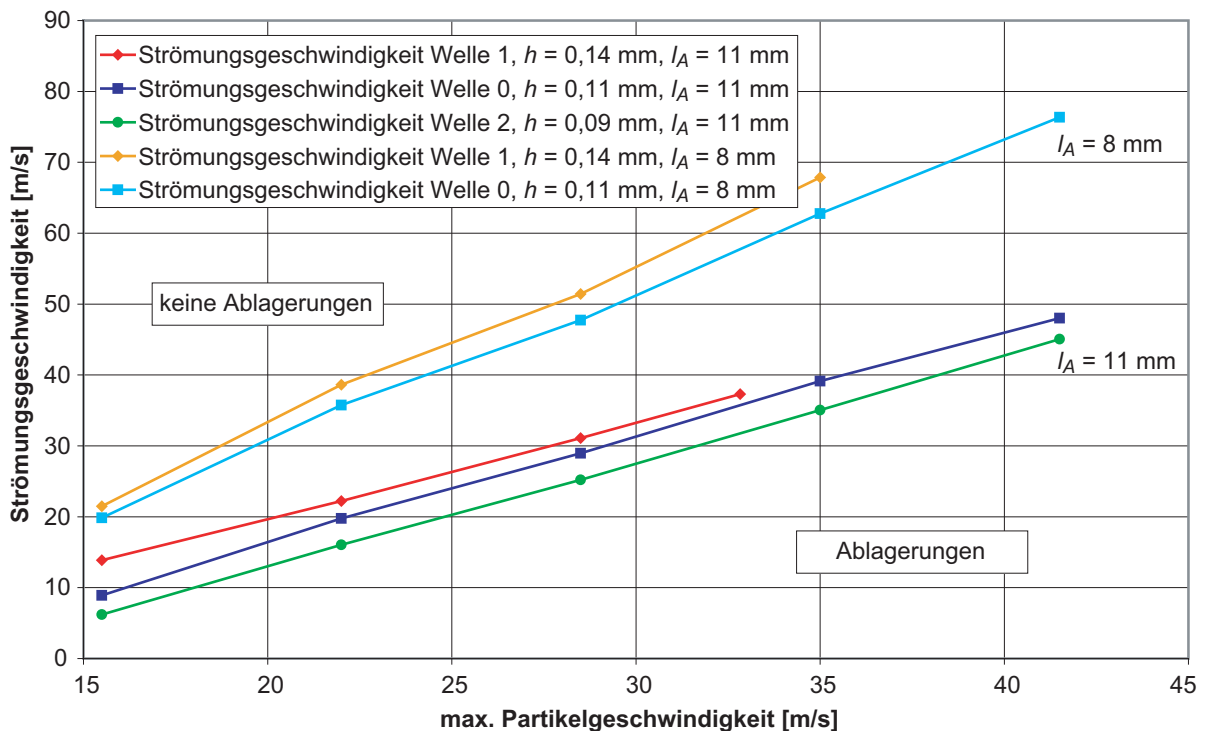


Bild 4.42 Strömungsgeschwindigkeiten im arbeitsraumseitigen Drosselspalt beim Erreichen der Ablagerungsgrenze in Abhängigkeit von der max. Partikelgeschwindigkeit und der Drosselspaltlänge l_A

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zum Einfluss der Drosselspaltlänge

Je länger der arbeitsraumseitige Drosselspalt ausgeführt wird desto weniger Sperrluft wird zum Erreichen der Ablagerungsgrenze benötigt. Ferner ist die benötigte Strömungsgeschwindigkeit bei längeren Spalten kleiner als bei kürzeren Spalten.

Die wesentliche Größe ist hierbei die Strömungsgeschwindigkeit. Eine genauere Betrachtung der Partikelbewegung unter dem Einfluss einer entgegengerichteten Luftströmung wird in

4.3.5 Einfluss der Drehzahl

Die bisher beschriebenen Versuche mit den metallischen Dichtsystemen wurden mit einer Drehzahl von $n = 50 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt. Durch die langsame Rotation der Welle sollte lediglich verhindert werden, dass sich Barrieren in den Spalten bilden können.

Zur Untersuchung des Einflusses der Drehzahl auf das Abdichtverhalten wurden Versuchsreihen mit Drehzahlen bis $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt, was einer Umfangsgeschwindigkeit von bis zu $37,7 \text{ m/s}$ entspricht. Die Aufnahmen des Stators in Bild 4.43 zeigen das Ergebnis eines Referenzversuchs mit langsam rotierender Welle und einem Sperrluftstrom von $\dot{V} = 5 \text{ l/min}$. Bei dem hier dargestellten Dichtsystem kam eine Schleuderscheibe mit einem Stirnflächenspalt von $h_S = 0,5 \text{ mm}$ zum Einsatz, siehe Bild 3.5, Variante C.

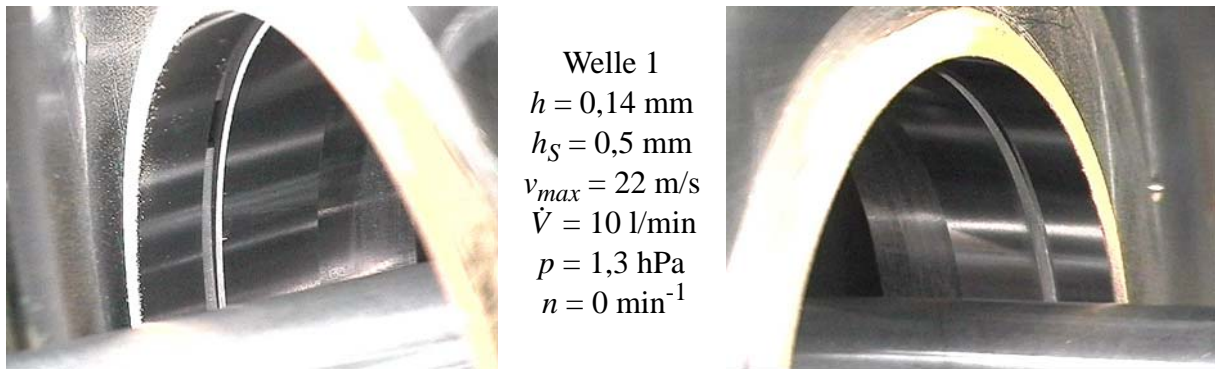


Bild 4.43 Aufnahmen des Stators, $n = 0 \text{ min}^{-1}$, $\dot{V} = 5 \text{ l/min}$

Auf der linken Aufnahme in Bild 4.43 sind einige wenige Partikel am Spalteingang auf der Statorscheibe zu erkennen. Auf der rechten Aufnahme sind keine Partikel im Spalt zu erkennen. Wie bereits bei den Versuchen mit den transparenten Dichtsystemen beschrieben trafen die Partikel aus der Streueinrichtung nur auf den im linken Bild gezeigten Ausschnitt des Dichtsystems in gerader Linie auf. Dies erklärt die ungleichmäßige Verteilung der Partikel im linken und im rechten Bild.

Bild 4.44 zeigt eine Wiederholung des Versuchs mit einer Drehzahl von $n = 6000 \text{ min}^{-1}$.

Es zeigte sich, dass die Anzahl der Partikel, die im Inneren des Dichtsystems gefunden wurden, zugenommen hatte. Ferner ist zu erkennen, dass die Partikel am gesamten Umfang des Dichtspalts zu finden sind.

Aufgrund der schnellen Rotation der Welle bildete sich im Inneren des Dichtspaltes eine Luftströmung aus die mit der Welle mit rotierte. Diese Luftströmung ist so stark gewesen, dass sie in der Lage war Partikel mitzureißen. Ferner deutet die erhöhte Anzahl der Partikel im Spalt drauf hin, dass mit dieser Luftströmung auch Partikel aus dem Stirnflächenspalt mitgerissen wurden. Die Luftströmung in Umfangsrichtung infolge der Rotation sorgte somit dafür, dass einzelne Partikel die Spaltumlenkung um 90° überwinden konnten.

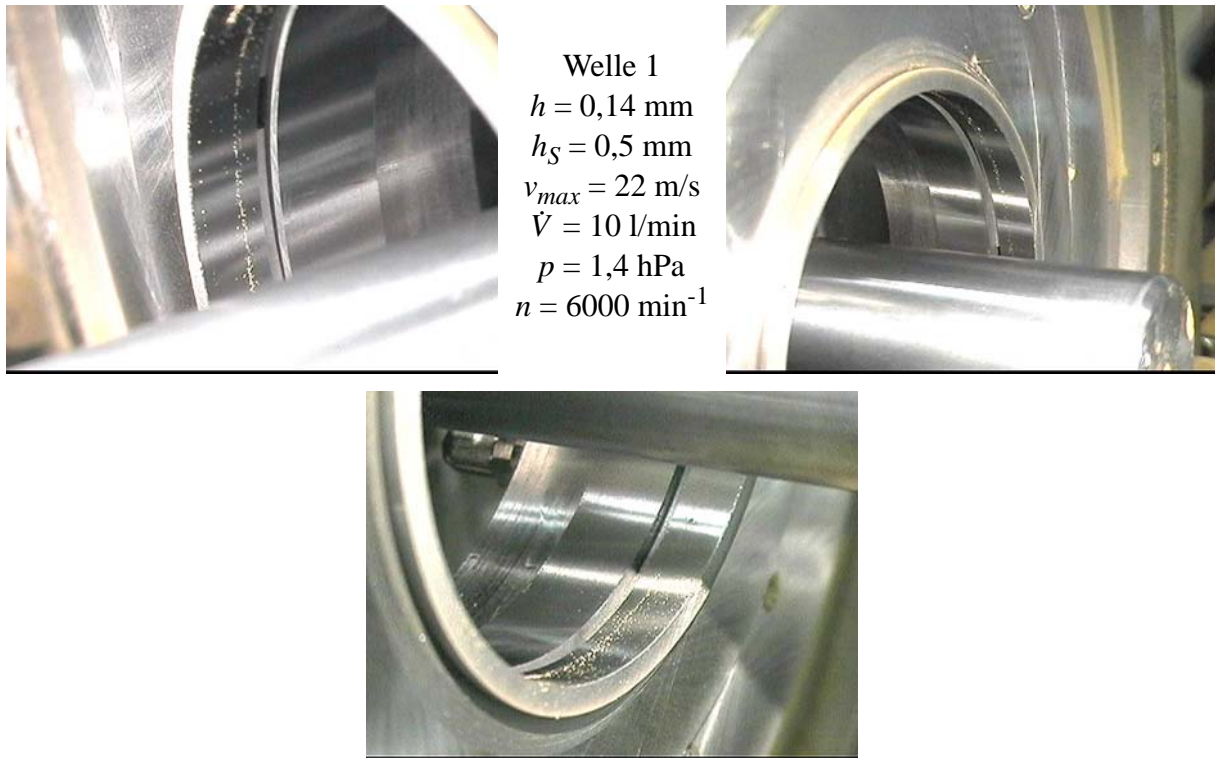


Bild 4.44 Aufnahmen des Stators, $n = 6000 \text{ min}^{-1}$, $\dot{V} = 5 \text{ l/min}$

Bei einer weiteren Versuchswiederholung wurde der Sperrluftstrom auf $\dot{V} = 7,5 \text{ l/min}$ erhöht. Bild 4.45 zeigt das Ergebnis dieses Versuches.



Bild 4.45 Aufnahmen des Stators, $n = 6000 \text{ min}^{-1}$, $\dot{V} = 7,5 \text{ l/min}$

Die Anzahl der Partikel im Inneren des Dichtspaltes ist deutlich gesunken. Es finden sich nur noch in dem Bereich vermehrt Partikel, wo diese in gerader Linie auf das Dichtsystem aufgetroffen sind. Die rechte und die untere Hälfte des Dichtsystems sind nahezu partikelfrei. Eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit um 0,3 m/s war demnach ausreichend den Zustand der Ablagerungsgrenze wieder zu erreichen und den Einfluss der Drehzahl zu kompensieren.

Ein Sperrluftstrom von $\dot{V} = 10 \text{ l/min}$ war bei $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ ausreichend um den zylindrischen Drosselspalt im Inneren des Dichtsystems frei von Partikeln zu halten, wie das Bild 4.46 veranschaulicht.

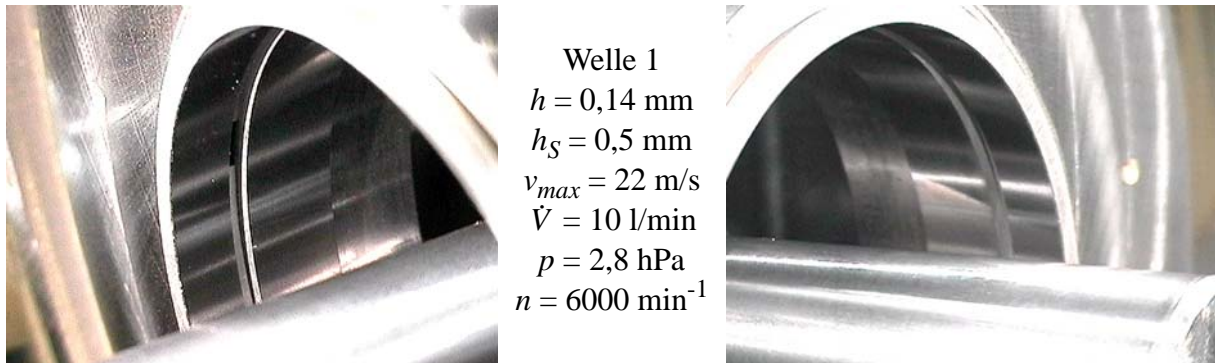


Bild 4.46 Aufnahmen des Stators, $n = 6000 \text{ min}^{-1}$, $\dot{V} = 10 \text{ l/min}$

Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Drehzahl

Die Drehzahl hat einen untergeordneten Einfluss auf die Ablagerungsgrenze. Die Partikel werden im Spalt durch die mitrotierenden Luftströmungen in Umfangsrichtung verteilt und dringen weiter in den Spalt vor. Durch eine Erhöhung des Sperrluftvolumenstroms und damit der Strömungsgeschwindigkeit kann dies ausgeglichen werden. Bei den hier betrachteten Versuchen war eine Erhöhung der Sperrluftgeschwindigkeit um 0,3 m/s ausreichend um den Einfluss der Drehzahl zu kompensieren.

Ergebnis

Anhand von Versuchsreihen mit offenen achsparallelen Drosselspalten bei ebenfalls achsparalleler Beaufschlagung konnte gezeigt werden, dass für das Erreichen der Ablagerungsgrenze ein bestimmter minimaler Sperrluftstrom und damit eine minimale Strömungsgeschwindigkeit eingehalten werden muss. Die Spalte müssen möglichst eng und lang ausgeführt werden um mit einem möglichst geringen Sperrluftbedarf ein Ablagern von größeren Mengen an Partikeln im arbeitsraumseitigen Drosselspalt und somit ein Fressen des Dichtsystems zu verhindern.

Die Drehzahl hat einen untergeordneten Einfluss auf den Partikeltransport in Spaltlängsrichtung, die Partikel verteilen sich lediglich gleichmäßiger am Umfang. Dies kann durch eine leichte Erhöhung der Sperrluftgeschwindigkeit kompensiert werden.

Eine Aussage über die Partikeldichtheit eines solchen Dichtsystems ist aber bisher noch nicht möglich.

4.4 Versuche mit metallischen Dichtsystemen und Partikelzähler

Um eine quantitative Aussage über die Anzahl der Partikel treffen zu können, die ein Dichtsystem überwunden haben, wurden Untersuchungen mit einem Partikelzähler durchgeführt, vgl. Kapitel 2.5.

4.4.1 Versuchsaufbau und Auswertung

Partikel die das Dichtsystem überwinden konnten, so genannte Leckagepartikel, wurden über einen Schlauch direkt hinter dem lagerraumseitigen Dichtspalt abgesaugt. Die Position des Schlauches zum Dichtsystem ist in Bild 4.47 dargestellt.

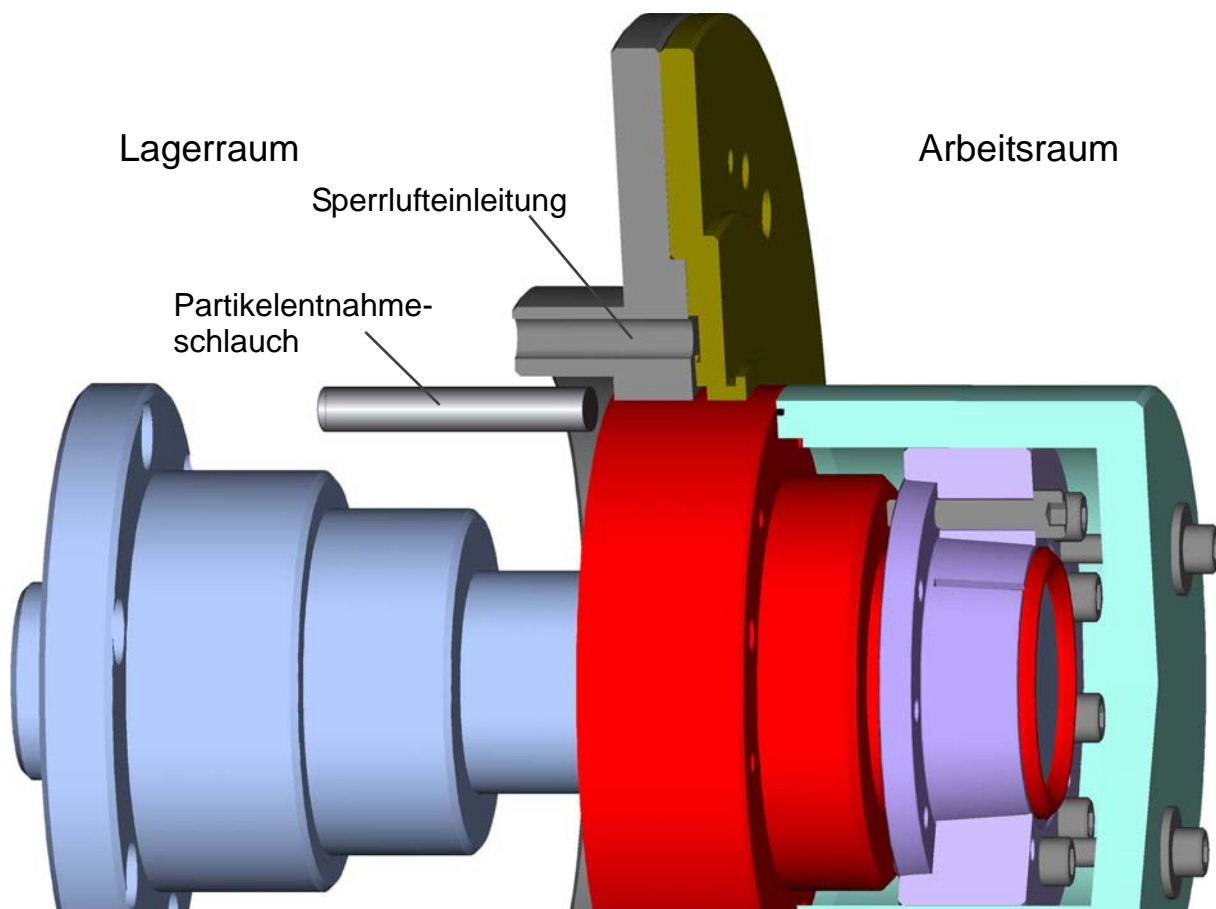


Bild 4.47 Dichtsystem mit Partikelentnahmeschlauch

Die Mehrzahl der Versuchsreihen wurde, wenn nicht anders angegeben, mit einem Sperrluftvolumenstrom von 500 l/min gestartet. Das Dichtsystem wurde mit Partikeln beaufschlagt, und nach 2 Minuten wurde der Partikelzähler gestartet und zählte 3 Minuten lang die Leckagepartikel in 6 Größenklassen, vgl. Kapitel 2.5. Anschließend wurde der Volumenstrom um 50 l/min gedrosselt, und nach weiteren 2 Minuten wurde der Partikelzähler erneut für 3 Minuten gestartet. Die max. Partikelgeschwindigkeiten lagen bei allen Versuchen zwischen 13,2 m/s und 39,6 m/s.

Die so erfasste Anzahl und Größe der Leckagepartikel der einzelnen Versuche wurden jeweils in einem Balkendiagramm zusammengefasst. Aufgetragen wurde die Reinheitsklasse über Volumenstrom und Größenklasse. Hierbei sind die verschiedenen Versuchsreihen bei unterschiedlichen Sperrluftströmen nebeneinander, von links nach rechts abnehmend, dargestellt. Die 6 Größenklassen der Partikel sind jeweils hintereinander dargestellt, die großen Klassen vorne und die kleinen Klassen hinten. Die Anzahl der Leckagepartikel der einzelnen Größenklassen wurde entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3 auf Seite 28 in Anlehnung an die ISO 4406 in die jeweiligen Reinheitsklassen umgerechnet, wobei sich, ausgehend von 0 bis 1 Partikel in Klasse 1, die Anzahl der Partikel in jeder weiteren Klasse verdoppelt. In den Diagrammen ist ferner die Reinheitsklasse 8 besonders hervorgehoben. Ab dieser Reinheitsklasse für Partikel größer 15 μm wird bei der erweiterten Lagerlebensdauerberechnung nach FAG bzw. nach DIN 281 mit einer verschmutzungsbedingten Lebensdauererminderung für Wälzlager gerechnet. Es ist im Umkehrschluss davon auszugehen, dass Reinheitsklassen unter 8 und diese auch noch für kleinere Partikel als 15 μm als vergleichsweise unkritisch angesehen werden können, vgl. Kapitel 3.3 auf Seite 28.

4.4.2 Versuchsergebnisse mit offenem Drosselspalt

Die ersten Versuche wurden mit einem glatten Drosselspalt, gemäß Variante A in Bild 3.5 auf Seite 27, durchgeführt.

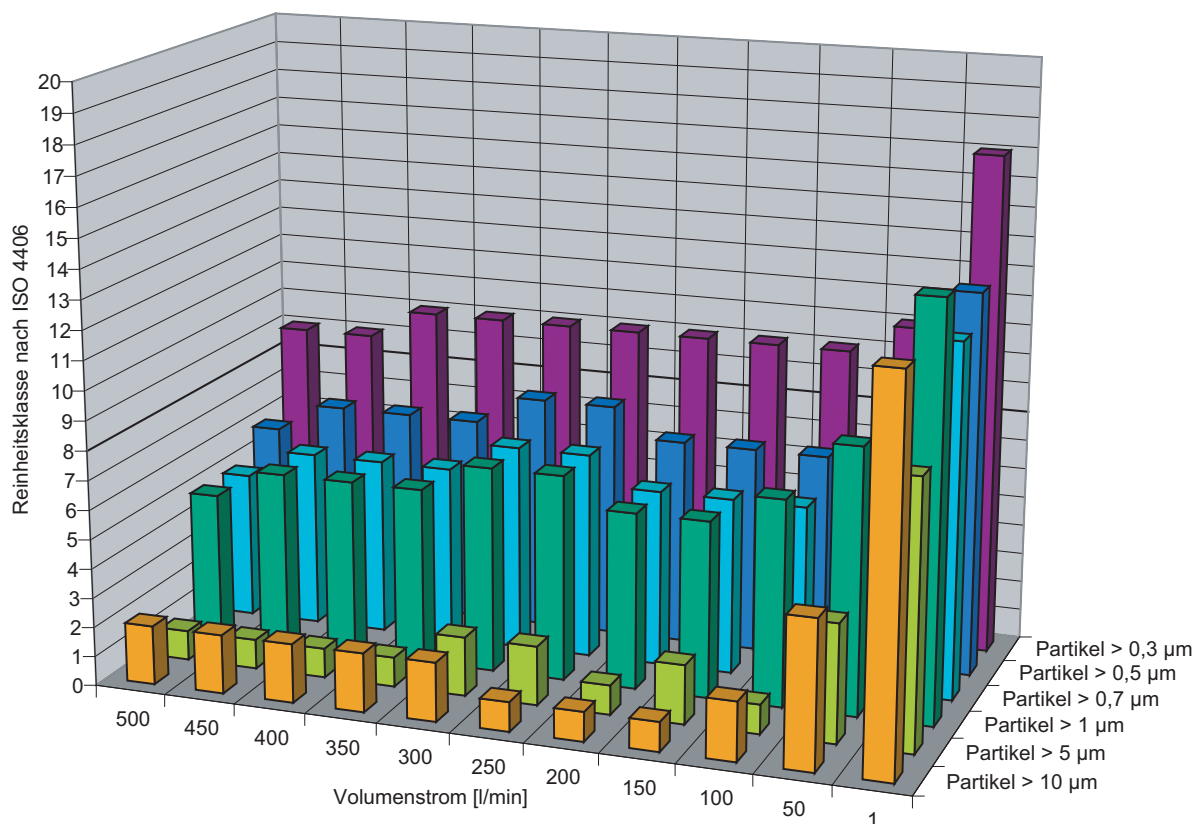


Bild 4.48 Ergebnisse Drosselspalthöhe $h = 0,14$ mm, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 30,8$ m/s

Im Diagramm in Bild 4.48 ist das Ergebnis einer Versuchsreihe dargestellt, die mit einer maximalen Partikelgeschwindigkeit von $v_{max} = 30,8$ m/s durchgeführt wurde.

Hierbei ist zu erkennen, dass die Menge der erfassten Partikel mit zunehmender Partikelgröße im Allgemeinen geringer ist. Das heißt, es passieren wesentlich mehr kleine Partikel das Dichtsystem als große. Dies ist ein positiver Effekt, da die Gefährdung von Lagerstellen, Zahnflankenkontaktflächen oder dergleichen mit zunehmender Partikelgröße ansteigt, vgl. Kapitel 3.3 auf Seite 28.

Ferner ist zu erkennen, dass die Partikelmengen bzw. die Reinheitsklassen bei Volumenströmen im Bereich zwischen $\dot{V} = 500$ und 100 l/min annähernd konstant sind. Es ist lediglich die Tendenz zu erkennen, dass mit geringeren Sperrluftvolumenströmen auch mehr Leckagepartikel auftreten. Bei $\dot{V} = 50$ l/min Sperrluft ist eine Zunahme der Leckagepartikel zu verzeichnen. Die Reinheitsklassen erhöhen sich jeweils bis zu zwei Stufen, was einer Vervielfachung der Partikelanzahl entspricht. Wird der Sperrluftstrom auf $\dot{V} = 1$ l/min gedrosselt, ist ein sprunghafter Anstieg der Reinheitsklassen zu verzeichnen. Die Partikelanzahl bei den $10 \mu\text{m}$ Partikeln hat sich im Vergleich zum Versuch mit $\dot{V} = 100$ l/min von 2,2 Partikel/100 ml auf 4980 Partikel/100 ml erhöht.

Berechnet man hingegen die Absolutzahl der Partikel, die in einer Minute das Dichtsystem passiert haben, so erhält man bei dem Versuch mit $\dot{V} = 100$ l/min Sperrluft 2150 Partikel/min und bei dem Versuch mit $\dot{V} = 1$ l/min Sperrluft 49800 Partikel/min. Das heißt, es passieren bei dem geringeren Sperrluftstrom 23-mal so viele Partikel das Lager wie beim höheren. Diese Vervielfachung der Partikelanzahl ist kritisch zu betrachten, da sich die Partikel aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeit länger im Lager aufhalten als bei einem höheren Volumenstrom. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel in den Wälzkontakt zwischen Lager- schale und Wälzkörper gerät ist bei einer um den Faktor 23 größeren Partikelanzahl bei einem um den Faktor 100 geringeren Volumenstrom sehr viel größer.

Versuche mit gleicher Drosselstahlhöhe h und mit unterschiedlichen max. Partikelgeschwindigkeiten v_{max} haben gezeigt, dass die Menge an Leckagepartikeln mit steigender Partikelgeschwindigkeit bei gleichem Sperrluftstrom \dot{V} zunimmt und somit die Reinheitsklasse erhöht wird. In Bild 4.49 und Bild 4.50 sind die Ergebnisse für die $0,3 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ Partikelgrößenklasse für vier unterschiedliche Partikelgeschwindigkeiten exemplarisch dargestellt.

Die Ergebnisse der anderen Größenklassen sind nur als kleine Piktogramme dargestellt, um den tendenziell gleichen Charakter darzustellen. Auf eine große Darstellung der Versuchsergebnisse wurde aus Platzgründen verzichtet, zumal sich daraus keine weiteren Erkenntnisse ableiten lassen.

4 Experimenteller Teil

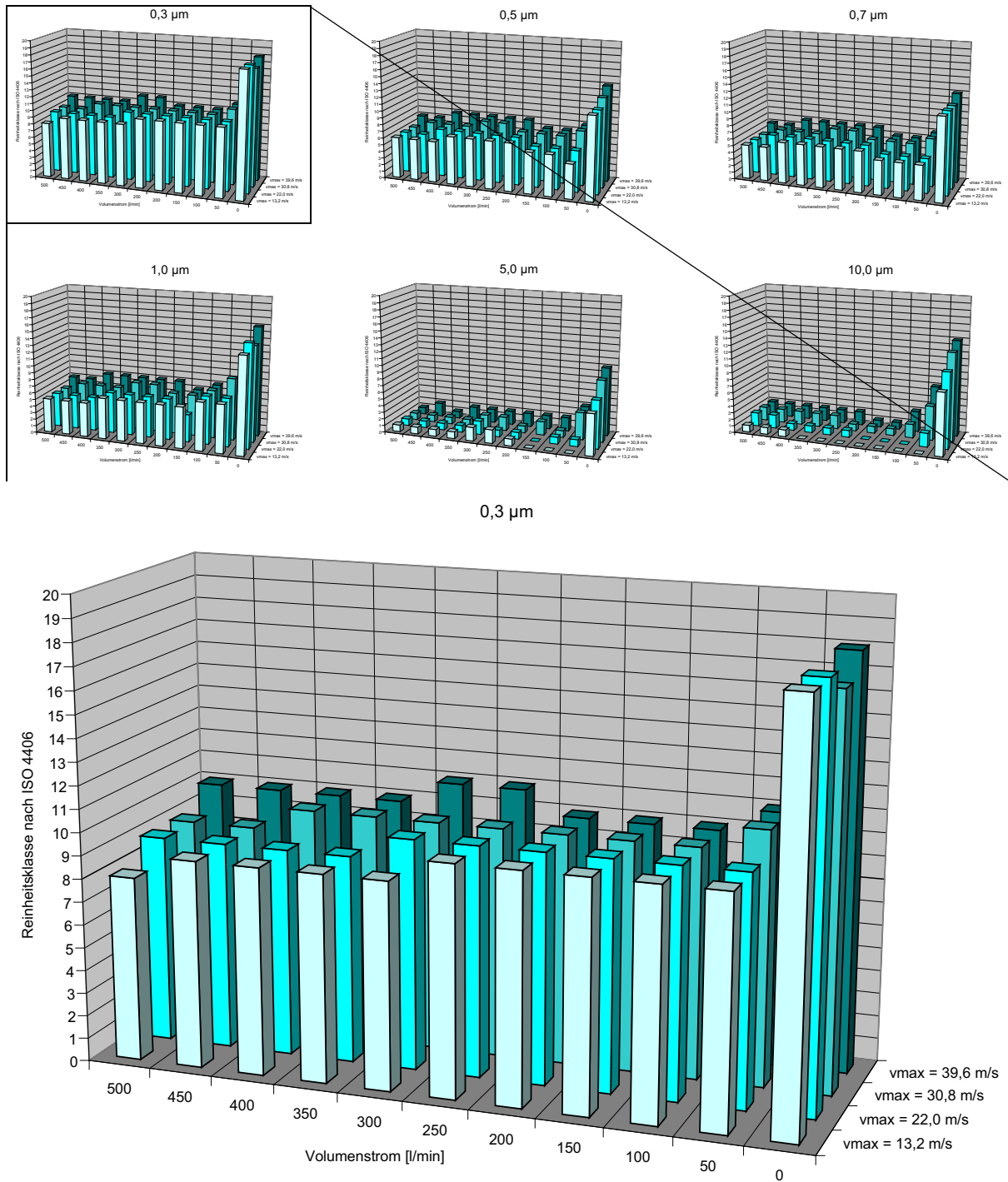


Bild 4.49 Ergebnisse Drosselpalhöhe 0,14 mm, 0,3 μm Partikelklasse

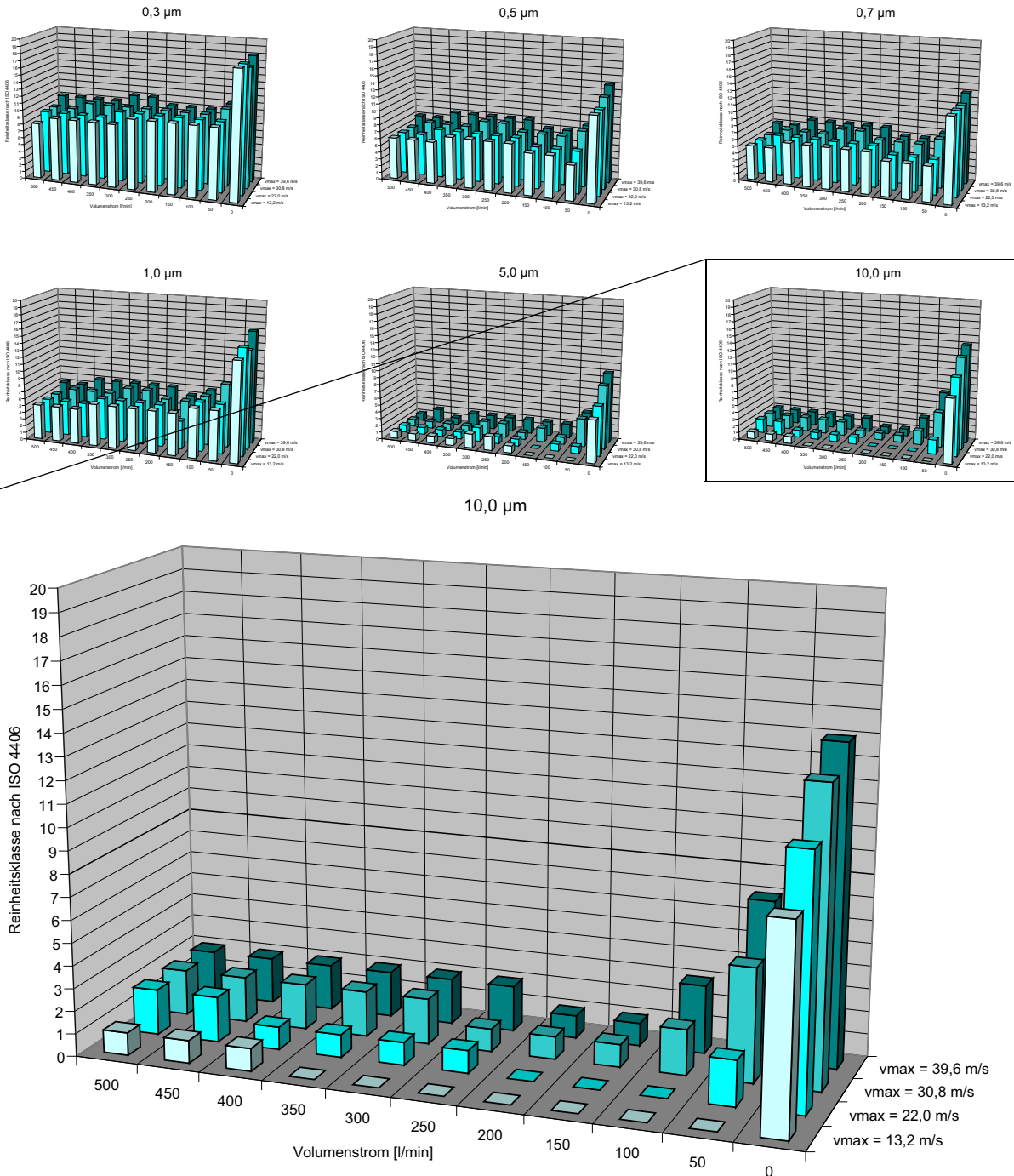


Bild 4.50 Ergebnisse Drosselpalthöhe 0,14 mm, 10 μm Partikelklasse

Der Effekt, dass mit höherer Partikelgeschwindigkeit mehr Partikel das Dichtsystem passieren, ist durchgehend bei allen Größenklassen auch bei unterschiedlichen Drosselpalthöhen zu beobachten.

Zusammenfassung der Ergebnisse mit unterschiedlichen Partikelgeschwindigkeiten

Es passieren in allen Versuchen mehr kleine Partikel als große das Dichtsystem. Unabhängig von der Partikelgröße passieren bei höheren max. Partikelgeschwindigkeiten mehr Partikel das Dichtsystem.

4.4.3 Einfluss der Drosselpalthöhen

Eine weitere Größe, die auf die Anzahl der Leckagepartikel einen entscheidenden Einfluss hat, ist die Drosselpalthöhe. Es wurden Versuche mit drei unterschiedlichen Drosselpalthöhen durchgeführt, $h = 0,14$ mm, $h = 0,11$ mm und $h = 0,09$ mm. In Bild 4.51 sind exemplarisch die Ergebnisse für die $10\ \mu\text{m}$ Klasse dargestellt, die mit offenen Drosselspalten bei gleicher max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 39,6$ m/s und unterschiedlich hohen Drosselspalten gemessen wurden. Die Ergebnisse der anderen Größenklassen sind wieder als Piktogramme mit dargestellt.

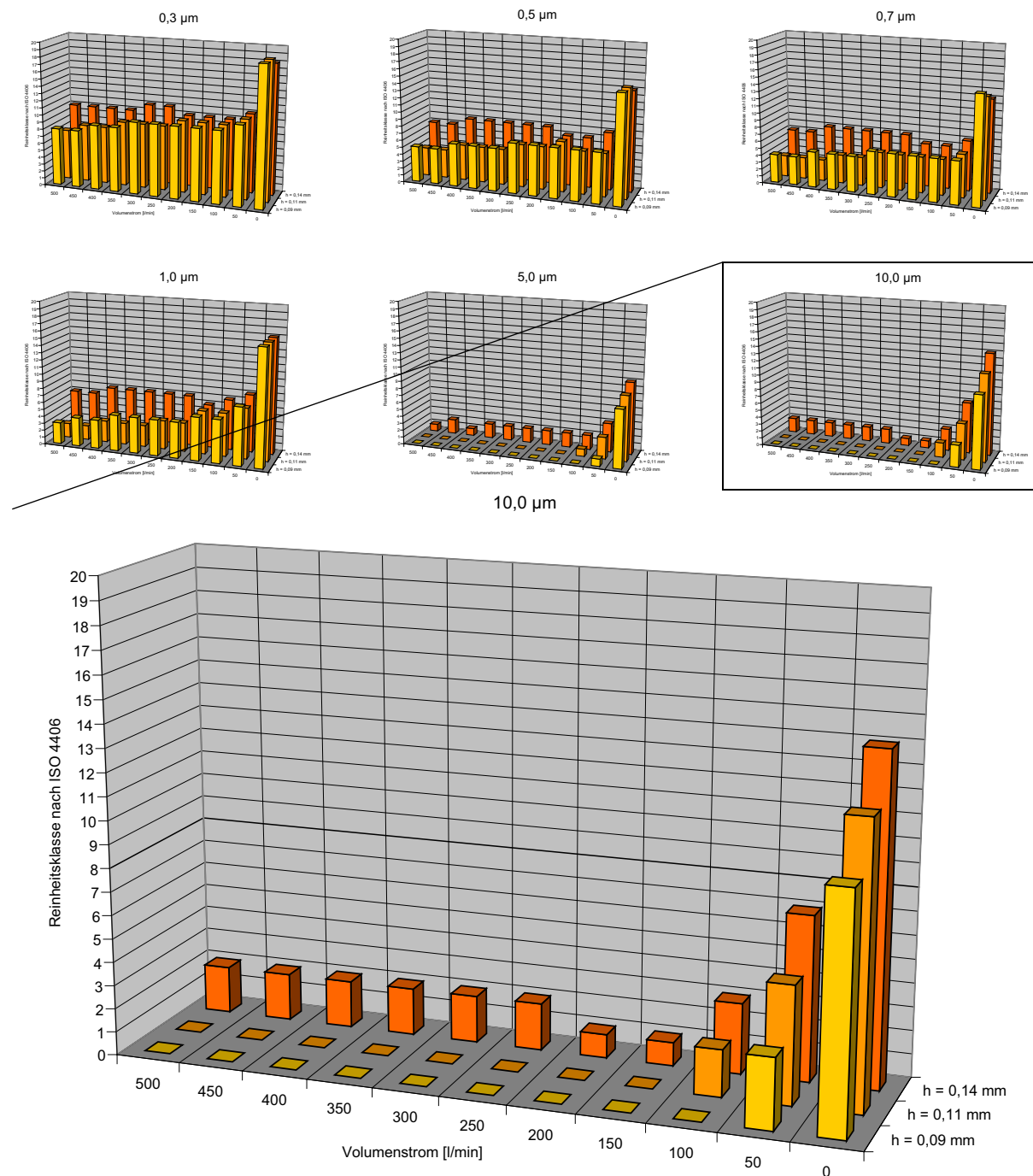


Bild 4.51 Ergebnisse: maximale Partikelgeschwindigkeit 39,6 m/s, 10,0 μm Partikelklasse

Es ist zu erkennen, dass mit sinkender Spalthöhe auch die Anzahl der Leckagepartikel tendenziell abnimmt.

Zusammenfassung der Versuche mit unterschiedlichen Drosselspalthöhen

Mit geringer werdender Drosselspalthöhe nimmt bei gleichem Sperrluftstrom auch die Anzahl der Leckagepartikel ab.

4.4.4 Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Eingangsbereichen

Der Einfluss der Geometrie des Eingangsbereiches wurde schon bei den Versuchen mit transparenten Dichtsystemen Kapitel 4.2.4 auf Seite 58 deutlich. Dies konnte auch bei den Versuchen mit dem Partikelzähler quantitativ bestätigt werden. Untersucht wurde zunächst das in Bild 4.52 dargestellte System mit einem Stirnflächenspalt (Variante C, siehe Bild 3.5 auf Seite 27).

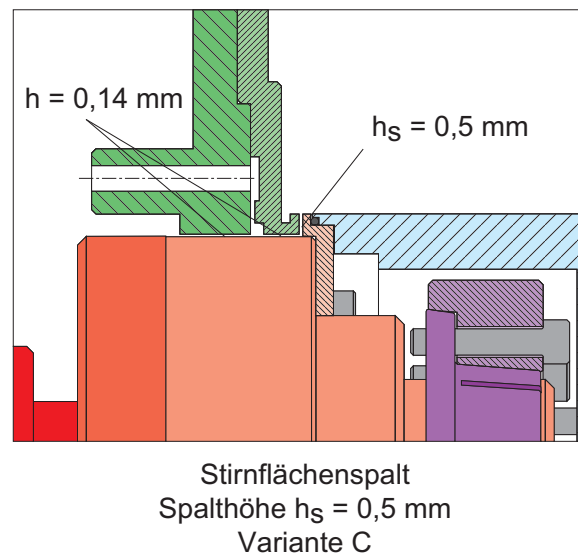


Bild 4.52 Dichtsystem mit Stirnflächenspalt (Variante C)

Die Versuche mit dem Dichtsystem der Variante C wurden mit den gleichen maximalen Partikelgeschwindigkeiten von $v_{max} = 30,8$ m/s durchgeführt, wie zuvor die Versuche mit offenen Drosselspalten. Bild 4.53 zeigt das Ergebnis.

Es zeigte sich, dass der prinzipielle Verlauf der Partikelkurven gleich ist wie bei den Versuchen ohne Stirnflächenspalt gemäß Variante A. Die absolute Anzahl der Partikel ist jedoch geringer, wie nachfolgend noch gezeigt wird.

4 Experimenteller Teil

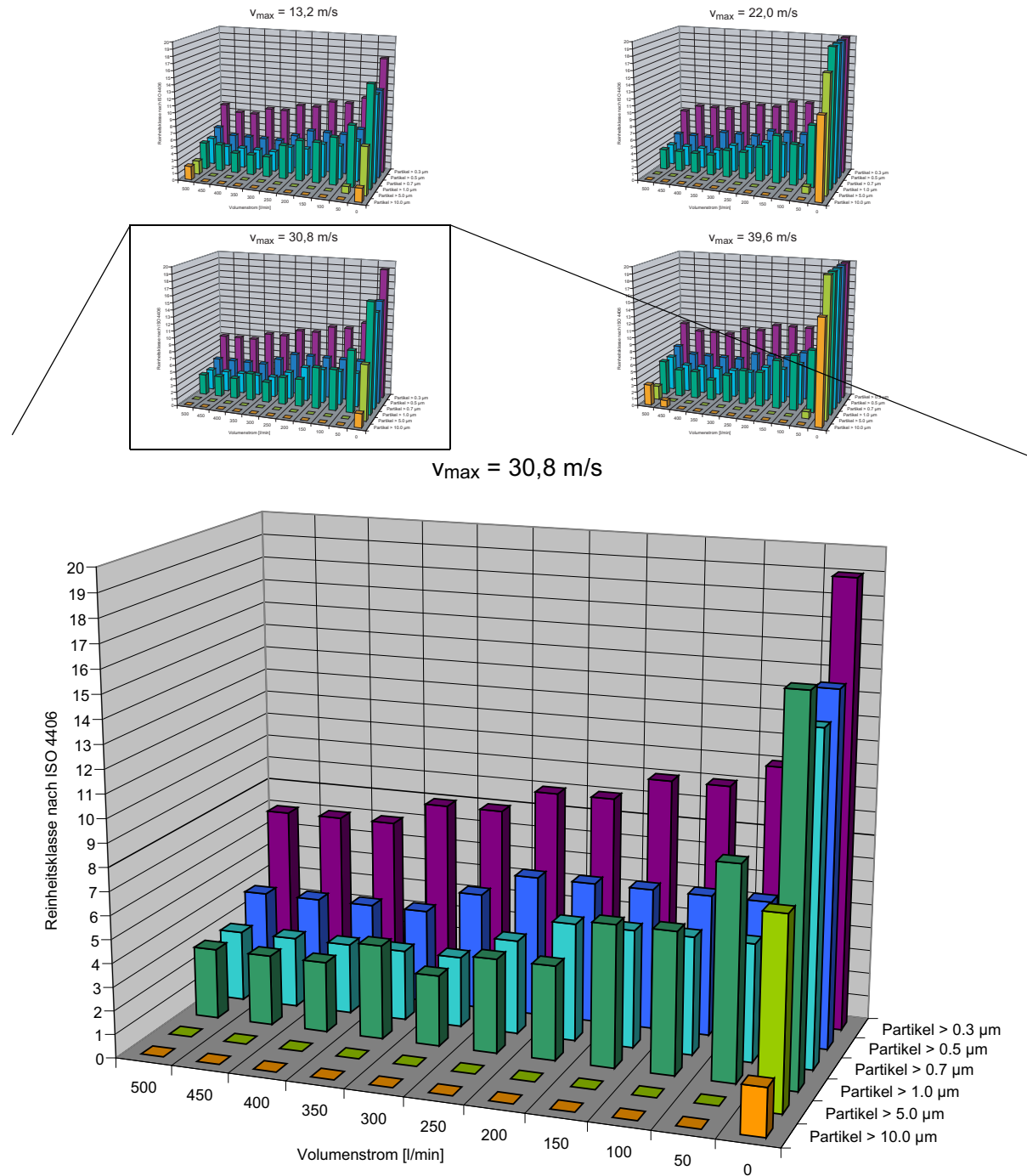


Bild 4.53 Ergebnisse: Variante C, Stirnflächenspalt $h_s = 0,5 \text{ mm}$, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 30,8 \text{ m/s}$

Die zweite Variante des Eingangsbereichs, die untersucht wurde, ist in Bild 4.54 gezeigt (Variante E vgl. Seite 27).

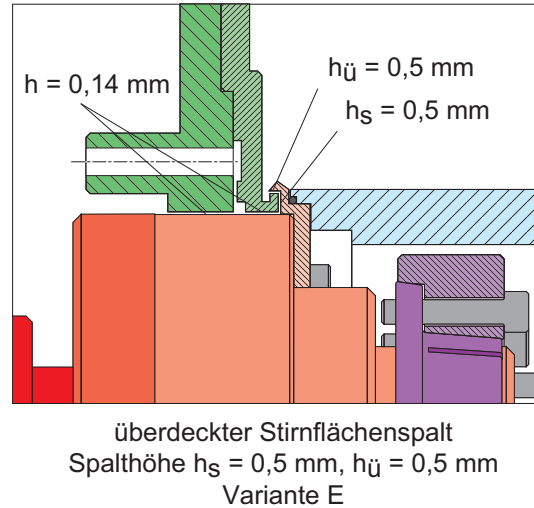


Bild 4.54 Dichtsystem mit überdecktem Stirnflächenspalt, Variante E

Der Versuch wurde analog zu den bereits beschriebenen Versuchen mit einer max. Partikelgeschwindigkeit von $v_{max} = 30,8 \text{ m/s}$ durchgeführt, siehe Bild 4.55.

Quantitativ kann die Beobachtung von Kapitel 4.2.4 auf Seite 58, transparentes Dichtsystem mit Stirnflächenspalt, bestätigt werden, dass es sich bei dem überdeckten Stirnflächenspalt um die beste Dichtsystemvariante handelt. Es konnten nur äußerst wenige Partikel, insbesondere solche der größeren Klassen, das Dichtsystem passieren. Selbst bei abgeschalteter oder geringer Sperrluft war eine gewisse Dichtigkeit gegeben. Im Bereich von $\dot{V} = 500 - 100 \text{ l/min}$ Sperrluft ist ein deutlicher Anstieg der Leckagepartikelmengen mit sinkendem Sperrluftvolumenstrom zu verzeichnen.

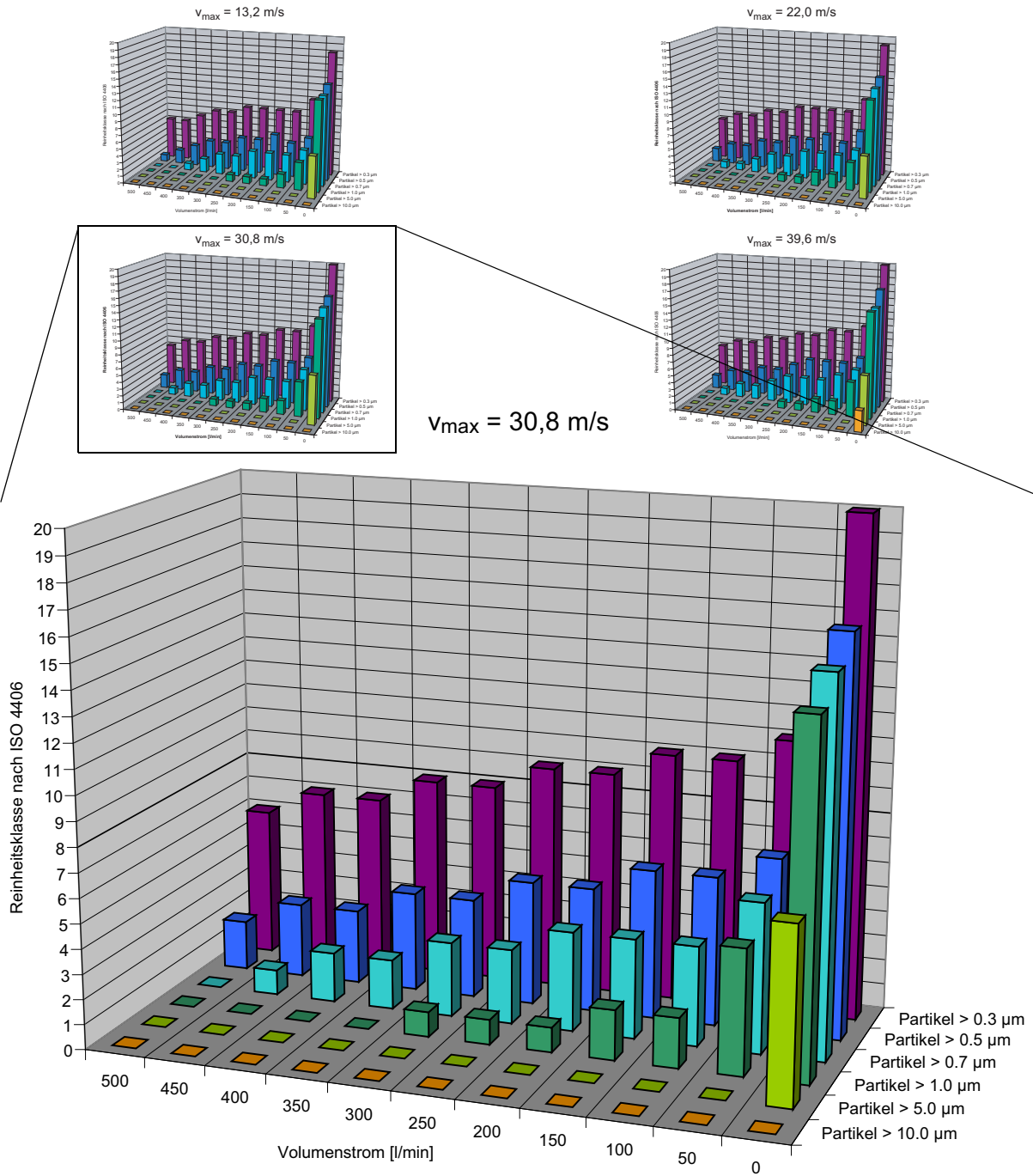


Bild 4.55 Ergebnisse: Variante E, Überdeckung $h_{ij} = 0,5 \text{ mm}$, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 30,8 \text{ m/s}$

Vergleich der Spalte im Eingangsbereich

Um die Effizienz der Eingangsbereiche zeigen zu können, werden die Ergebnisse mit den unterschiedlichen Eingangsförmern direkt miteinander verglichen. Bei dem Vergleich in Bild 4.56 werden nur die Partikel der $5,0 \mu\text{m}$ Klasse bei einer maximalen Partikelgeschwindigkeit von $30,8 \text{ m/s}$ dargestellt. Die Ergebnisse in den anderen Größenklassen zeigen denselben qualitativen Trend.

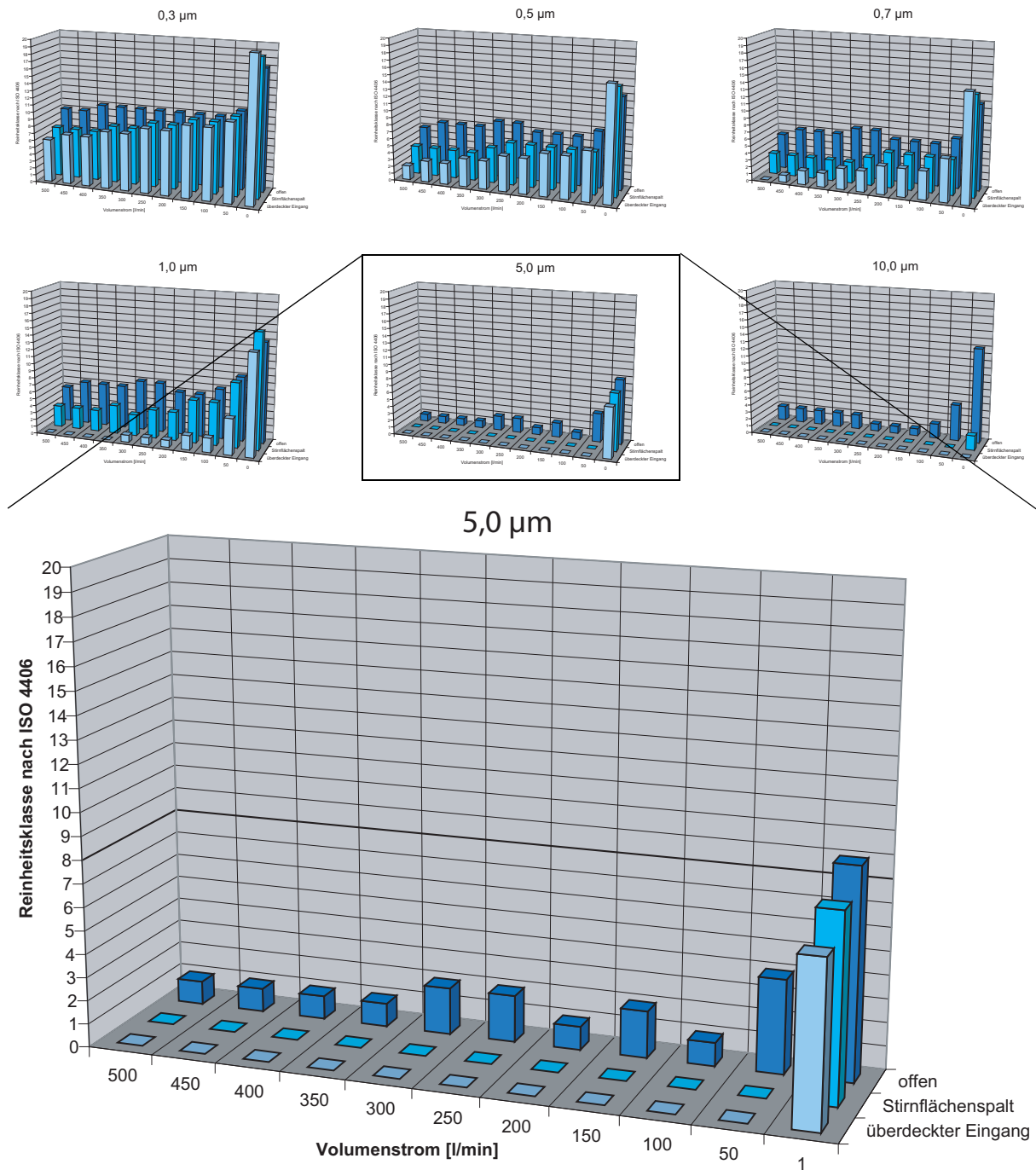


Bild 4.56 Ergebnisse: Eingangsbereiche gemäß Variante A, C, E, maximale Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 30,8$ m/s, Beispiel: Partikelgröße 5,0 μm

Es zeigt sich deutlich der Unterschied im Abdichtvermögen der einzelnen Eingangsvarianten. Bei allen vier untersuchten maximalen Partikelgeschwindigkeiten ist die Reduktion der Leckagepartikel mit zunehmender Anzahl der Spaltumlenkungen zu erkennen. Im Falle des offenen Eingangsbereichs konnten recht viele Partikel das Dichtsystem überwinden. Mit dem Einsatz eines Stirnflächenspaltes, also einer einfachen Richtungsumkehr des Drosselspaltes, konnte die Anzahl der Leckagepartikel um 50 - 90 % reduziert werden. Bei einem überdeckten Stirnflächenspalt konnte die Anzahl gegenüber einer einfachen Umlenkung um weitere 50% bis 100% abgesenkt werden.

Bei diesen Versuchen konnten beim glatten Drosselspalt bis zu 200 Partikel mit einer Größe von $5\ \mu\text{m}$ in 3 min. gezählt werden. Bei zweifacher Drosselspaltumlenkung konnten keine Partikel mehr detektiert werden, zumindest solange ein Sperrluftvolumenstrom größer $\dot{V} = 1\ \text{l/min}$ eingesetzt wurde.

Die Dichtwirkung eines offenen Sperrluftdichtsystems kann demnach mit Hilfe eines Stirnflächenspaltes deutlich verbessert werden. Das Abdichtvermögen eines überdeckten Eingangsbereiches übertrifft das eines Stirnflächenspaltes nochmals um ein Vielfaches.

Zusammenfassung der Ergebnisse mit unterschiedlichen Eingangsbereichen

Spaltumlenkungen haben einen großen Einfluss auf das Abdichtverhalten bei Partikelbeaufschlagung. Mit steigender Anzahl an Umlenkungen sinkt die Leckagepartikelmenge. Eine Spaltumlenkung in Form eines Stirnflächenspaltes liefert gute Ergebnisse, eine doppelte Spaltumlenkung in Form eines überdeckten Eingangsbereiches ist hingegen deutlich effektiver. Auf den Einsatz von Sperrluft kann trotz mehrfacher Spaltumlenkungen nicht verzichtet werden.

4.4.5 Versuche mit zusätzlicher Fangkammer

Wie in den obigen Kapiteln gezeigt, sind Dichtsysteme mit Stirnflächenspalt bzw. überdecktem Stirnflächenspalt gegenüber denen mit offenem Eingangsbereich vorzuziehen. Im Folgenden wurde untersucht, ob durch den Einsatz einer zusätzlichen Fangkammer das Abdichtverhalten noch weiter verbessert werden kann. Fangkammern sind aus dem Bereich der Flüssigkeitsabdichtung bekannt und haben dort die Aufgabe, Flüssigkeiten, die einen ersten Drosselspalt überwinden konnten zu sammeln und anschließend aus dem Inneren des Dichtsystems in den Arbeitsraum zurückzuführen.

Um den Einfluss einer Fangkammer auf das Dichtverhalten untersuchen zu können wurde der bereits verwendete Dichtsystembaukasten um weitere Komponenten ergänzt. Hinzu kam zunächst eine weitere Statorscheibe, die jetzt vor dem bisherigen Drosselspalt eine Fangkammer bildet. Diese Fangkammer wird arbeitsraumseitig durch eine von vier unterschiedlichen Schleuderscheiben abgeschlossen. Die Schleuderscheiben bieten so die Möglichkeit den Eingangsbereich der Fangkammer zu variieren.

Die untersuchten Varianten sind in Bild 4.57 im Schnitt gezeigt. Bei den Überdeckungs- bzw. Stirnflächenspalten beträgt die Spalthöhe jeweils $h_S = 0,5\ \text{mm}$ bzw. $h_U = 0,5\ \text{mm}$, bei einer Drosselspalthöhe von $h = 0,14\ \text{mm}$.

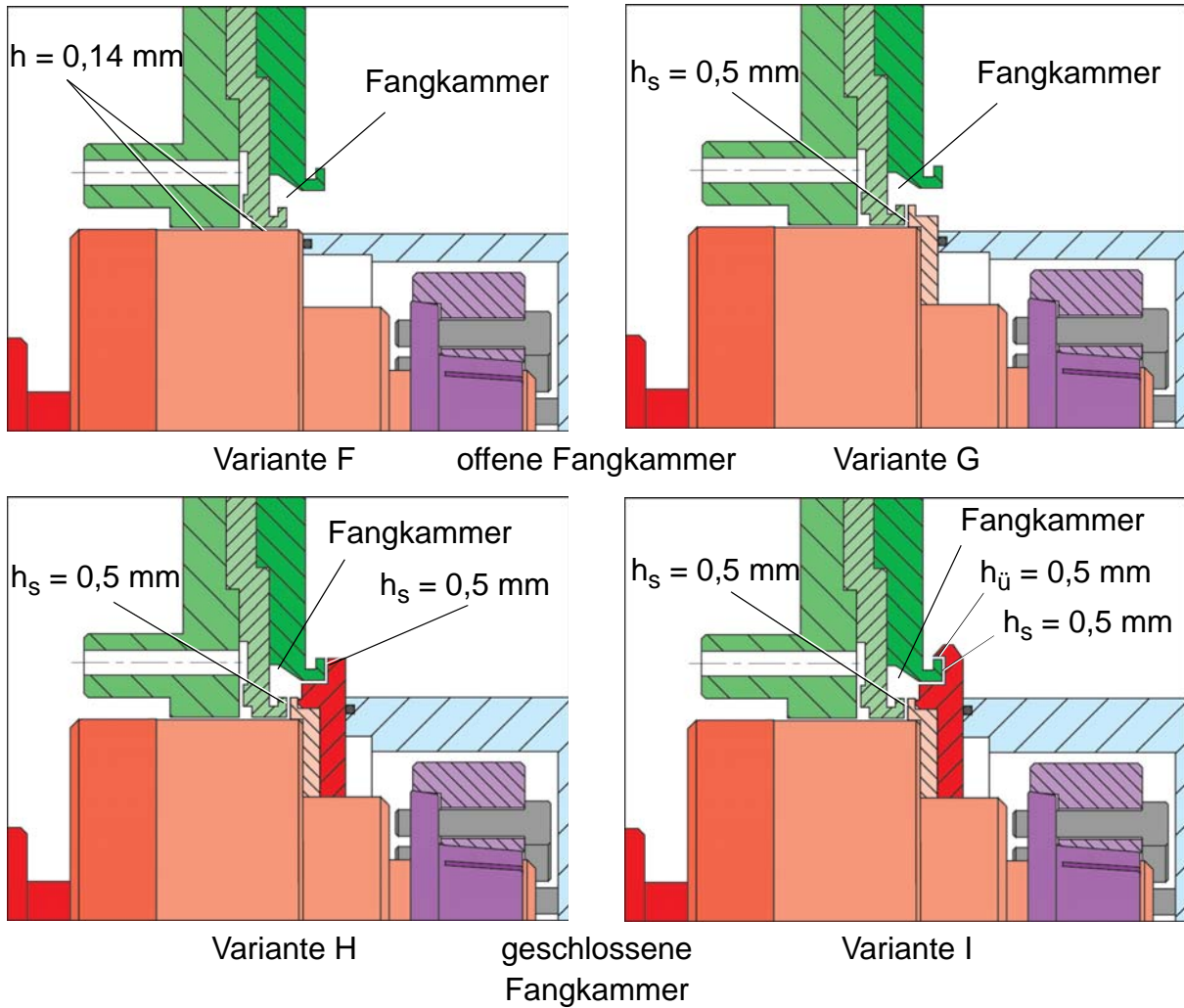


Bild 4.57 Untersuchte Dichtsystemvarianten mit Fangkammer

Bei den ersten Varianten F und G ist die eigentliche Fangkammer in Richtung Staubraum nicht mit einer Schleuderscheibe versehen. Diese Varianten werden als offen bezeichnet. Diese Varianten dienten nur als Vergleichsbasis. Die Ergebnisse der bisherigen Versuche sind quantitativ nicht direkt mit den nachfolgenden vergleichbar. Auf Grund eines irreparablen Defekts musste ein anderes Partikelzählgerät verwendet werden. Das Ersatzgerät vom Typ LASAir 510 erfasste die Größenklassen 10; 5; 2; 1; 0,7; 0,5 μm statt der Größenklassen 10; 5; 1; 0,7; 0,5; 0,3 μm des ersten Gerätes vom Typ LASAir 310. Des Weiteren wurde die Sauberkeit der zugeführten Sperrluft und die Spülluft des Lagerraums durch einen zusätzlichen Feinfilter weiter verbessert, was die Anzahl kleinerer Partikel in der Luftversorgung reduzierte, siehe Bild 4.58.

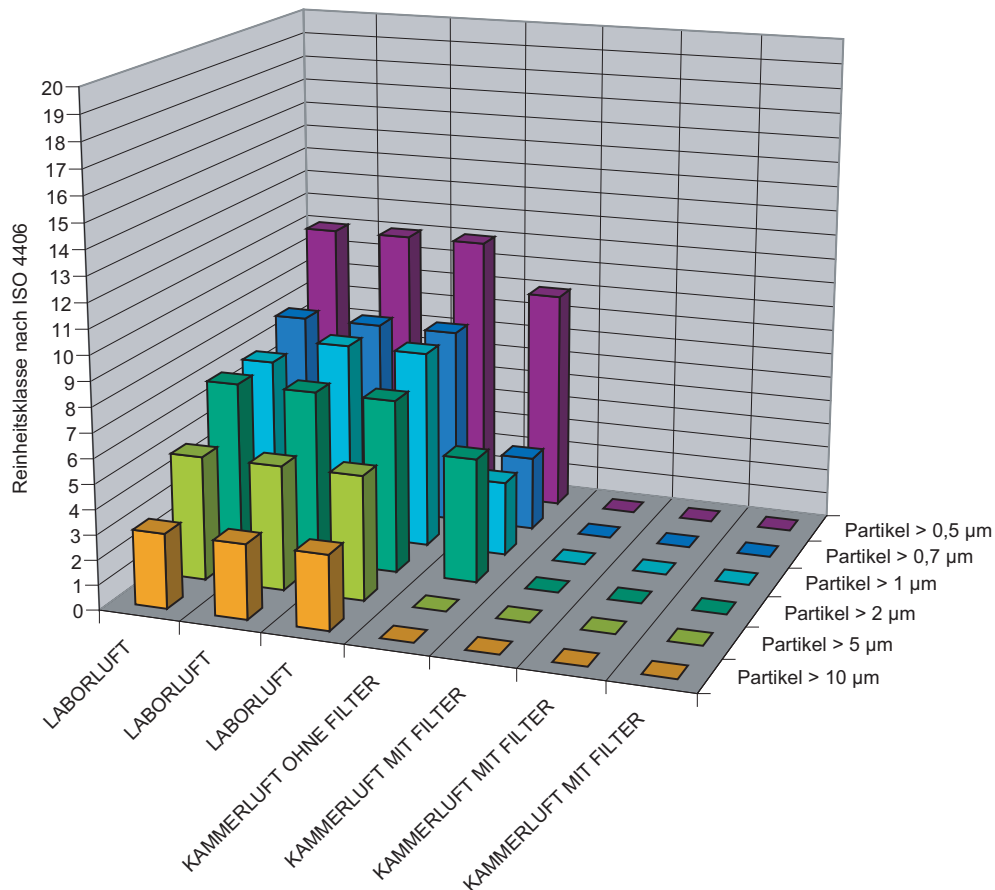


Bild 4.58 Vergleich der Laborluft mit der Luft im Lagerraum mit und ohne neuem Filter

Referenzversuch mit offener Fangkammer - Typ F

Die erste Versuchsreihe mit der zusätzlichen Statorscheibe wurde mit dem Dichtsystem der Variante F durchgeführt. Hierbei war die eigentliche Fangkammer zum Arbeitsraum hin nicht verschlossen. Sie entspricht nahezu Variante A in Bild 3.5. Die Versuche wurden, wie im Kapitel 4.4 beschrieben, durchgeführt.

Es zeigte sich das bekannte Verhalten allerdings auf einem niedrigeren Niveau als bei Variante A (maximal 900 Partikel anstatt ca. 5000 Partikel), Bild 4.59. Die Maßnahmen für eine reinere Sperrluft und die bessere Kapselung des Lagerraums hatten auf das prinzipielle Verhalten keinen Einfluss.

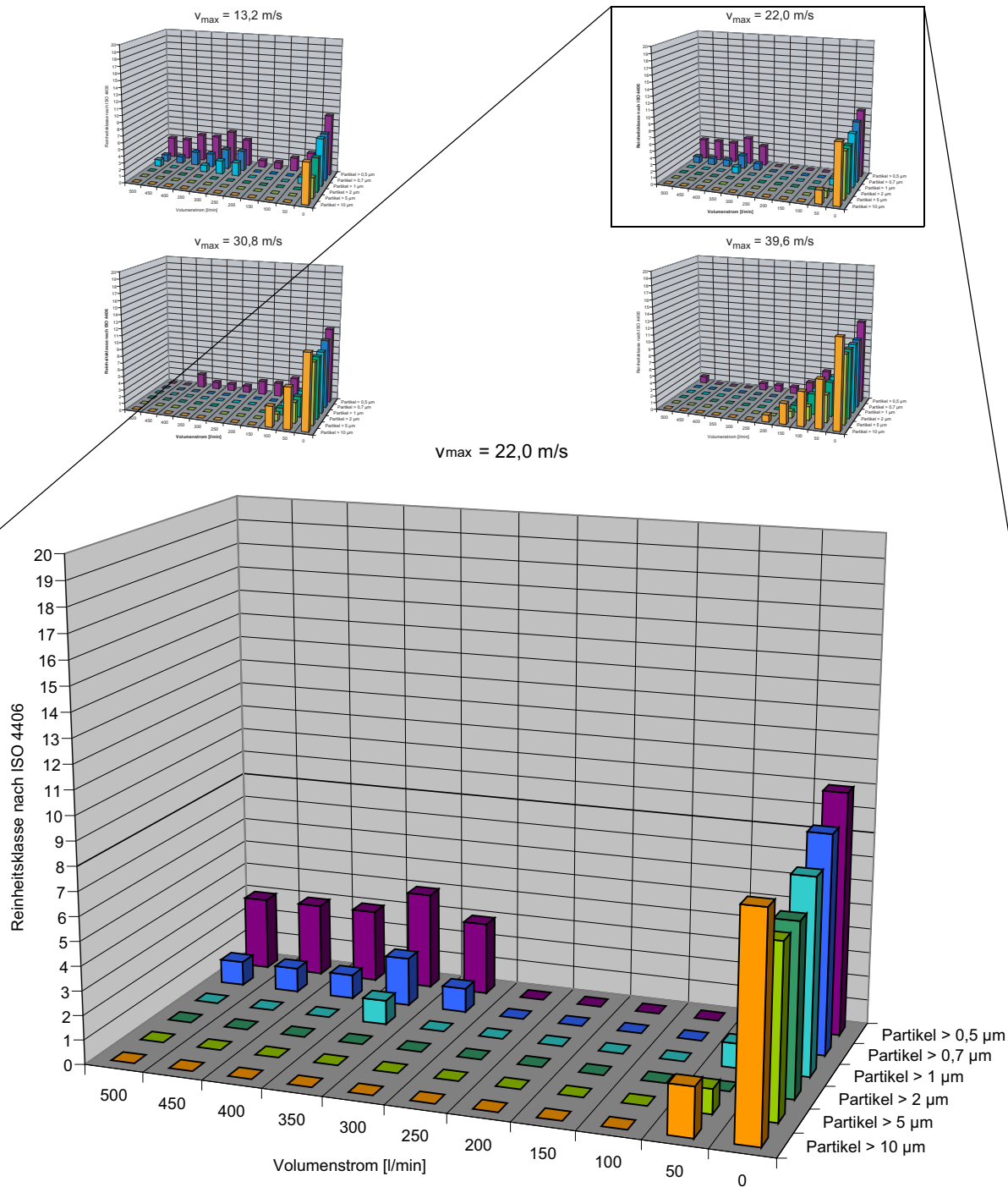


Bild 4.59 Ergebnisse: Fangkammer offen, Typ F, $h = 0,14 \text{ mm}$, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 22,0 \text{ m/s}$

Drosselspalt mit Stirnflächenspalt und offener Fangkammer, Typ G

Bei dem Dichtsystem vom Typ G gemäß Bild 4.57 wurde der Drosselspalt mit immer noch offener Fangkammer um einen vorgeschalteten Stirnflächenspalt erweitert. Gleichzeitig wurde die maximale Partikelgeschwindigkeit auf 39,6 m/s erhöht. Die Anzahl der Leckagepartikel ist im Vergleich zum offenen Drosselspalt deutlich geringer, Bild 4.60. Lediglich bei $\dot{V} = 1 \text{ l/min}$

Sperrluft ist die Partikelanzahl in Bild 4.60 größer als in Bild 4.59, was der fast doppelt so hohen Partikelgeschwindigkeit zuzuschreiben ist.

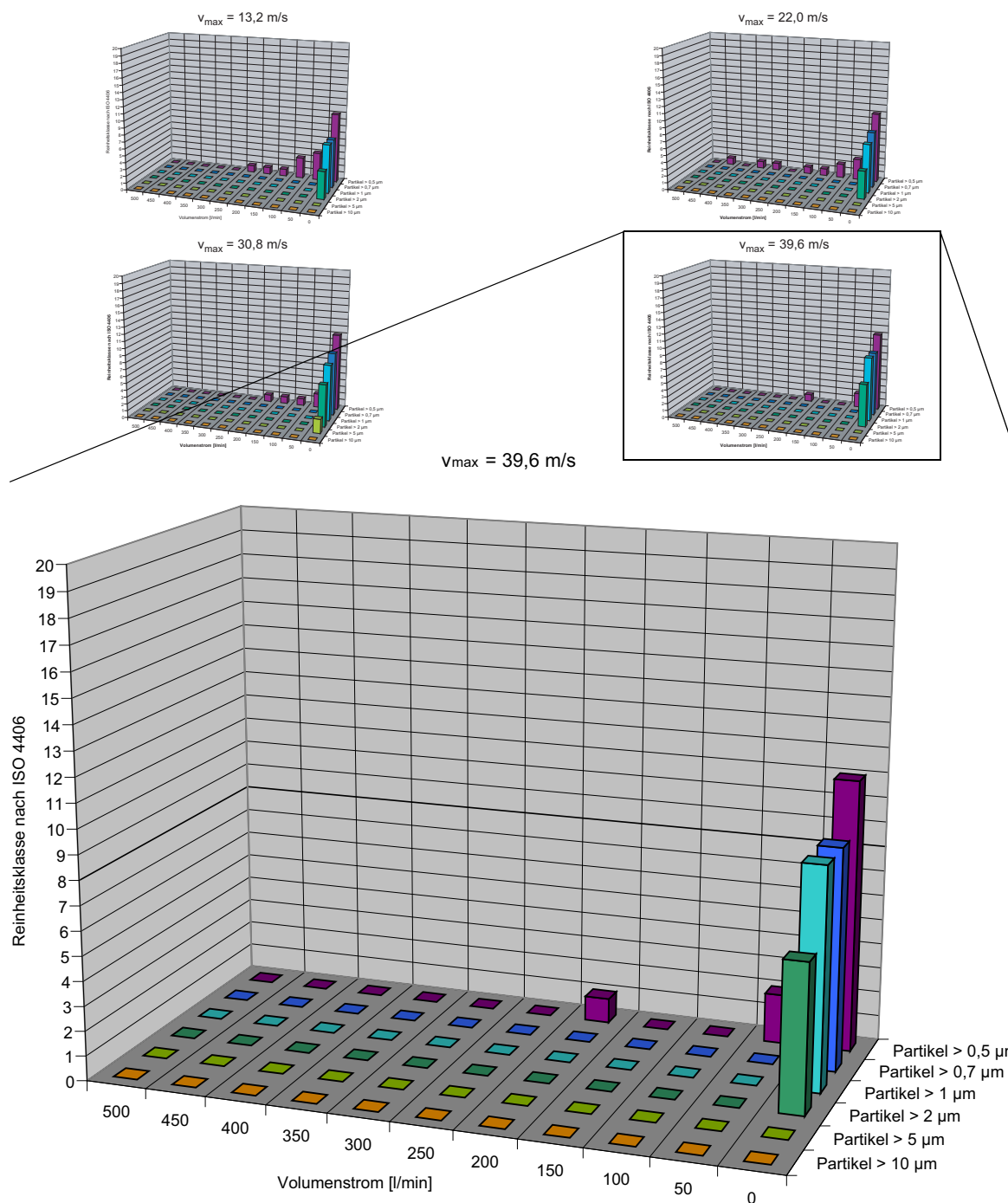


Bild 4.60 Ergebnisse: Fangkammer offen, Typ G, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 39,6 \text{ m/s}$, $h = 0,14 \text{ mm}$, $h_S = 0,5 \text{ mm}$

Versuche mit geschlossener Fangkammer, Typ H und I

Als Varianten mit geschlossener Fangkammer wurden der Typ H mit Stirnflächenspalt und der Typ I mit überdecktem Stirnflächenspalt untersucht, siehe Bild 4.57 auf Seite 91. Die Fangkammer hatte keine spezielle Entlüftung oder Ablauföffnungen. Beide Varianten verhielten

sich ähnlich wie die Variante G. Beispielhaft ist in Bild 4.61 die Variante I bei einer maximalen Partikelgeschwindigkeit von 39,6 m/s dargestellt. Die Anzahl der Leckagepartikel ist in den meisten Fällen kleiner als bei der offenen Variante G mit Stirnflächenspalt.

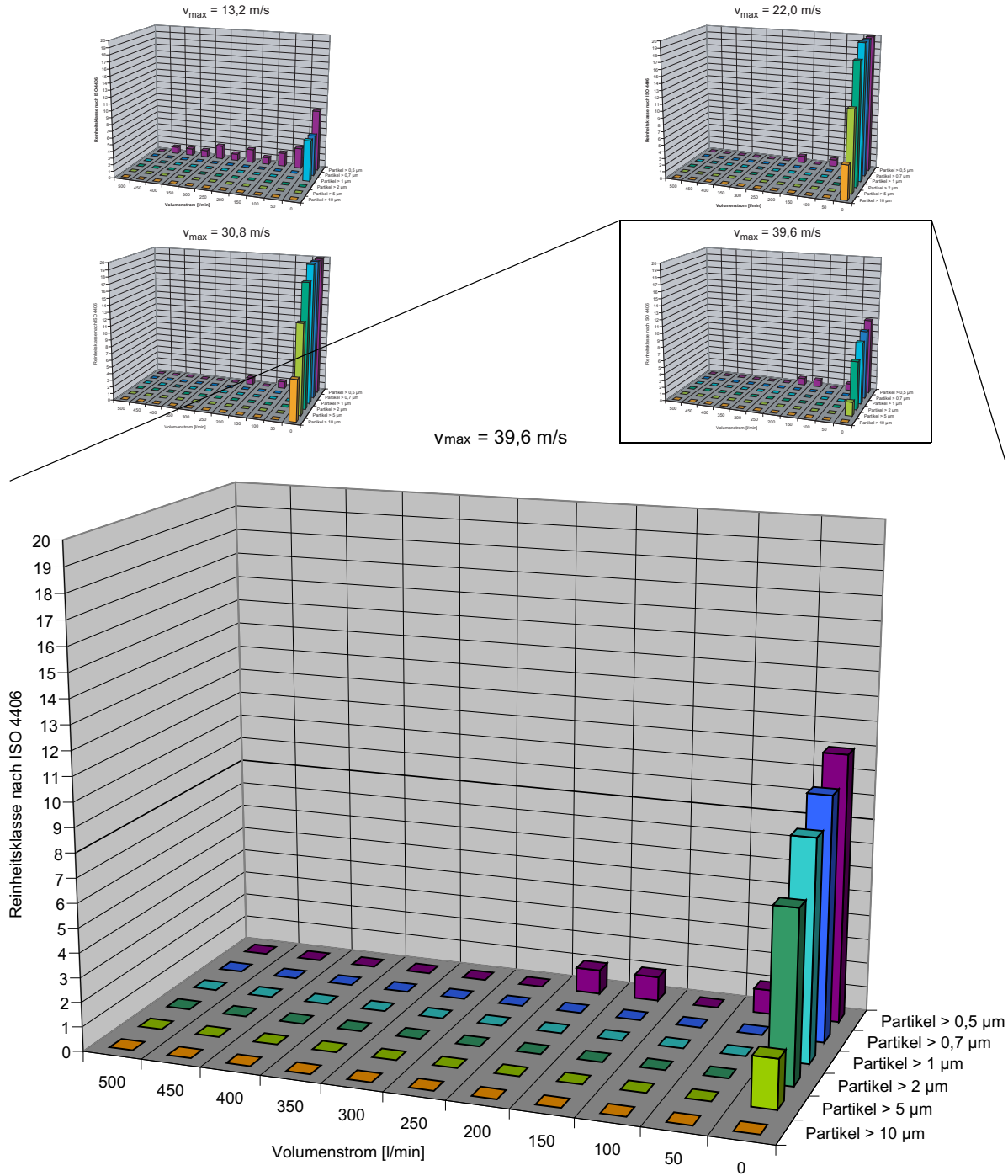


Bild 4.61 Ergebnisse: Fangkammer zwei Stirnflächenspalte mit $h_s = 0,5 \text{ mm}$ und ein überdeckter Eingangsbereich mit $h_{\ddot{u}} = 0,5$, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 39,6 \text{ m/s}$

Versuch mit geschlossener Fangkammer und offener Rücklaufbohrung, Typ H

Im Versuchsaufbau nach Kapitel 4.4.5 auf Seite 90 wurde nun die Fangkammer mit einer Bohrung versehen, die bis in den Staubraum reichte. Derartige Bohrungen werden bei der Flüssigkeitsabdichtung verwendet und dienen dazu in die Fangkammer eingedrungene Flüssigkeit in den Arbeitsraum zurück zu führen. Sie wird als Rücklaufbohrung bezeichnet. Die Sperrluft, die aus dem Drosselspalt in die Fangkammer strömte, konnte teilweise durch den jetzt offenen Rücklauf in den Staubraum ausströmen. Dies brachte nochmals eine deutliche Verringerung der Partikelzahlen, die das Dichtsystem überwinden konnten, Bild 4.62, und somit eine weitere Verbesserung des Dichtsystems.

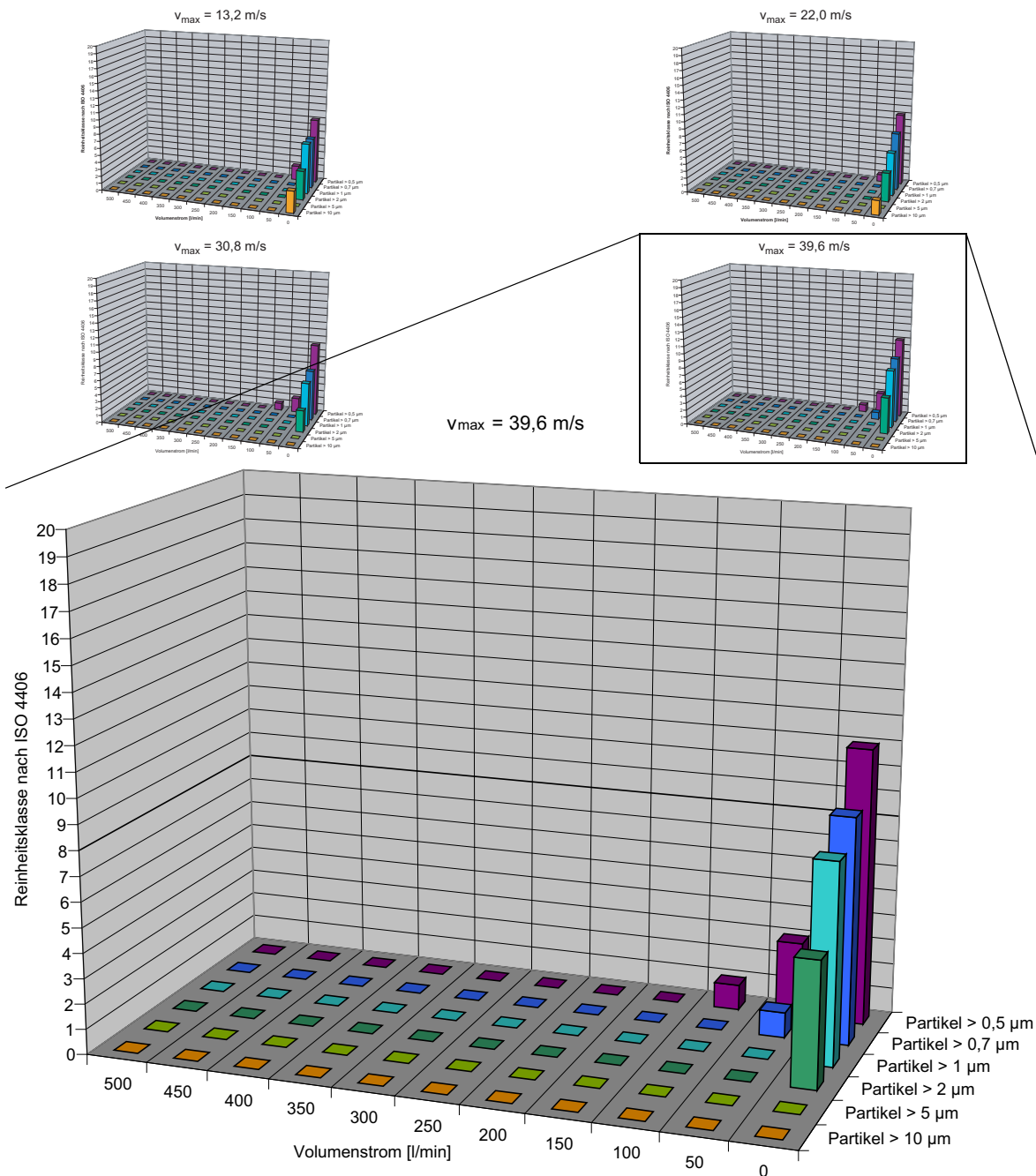


Bild 4.62 Ergebnisse: Fangkammer 2 Stirnflächenspalte mit $h_S = 0,5 \text{ mm}$ und offener Rücklaufbohrung, Typ H, max. Partikelgeschwindigkeit $v_{max} = 39,6 \text{ m/s}$

Zusammenfassung der Ergebnisse mit zusätzlicher Fangkammer

Die Versuchsergebnisse ähneln denen mit den unterschiedlichen Eingangsbereichen, die in Kapitel 4.4.4 vorgestellt wurden. Die Leckagepartikelanzahl ist hier nochmals gesunken. Wenn Sperrluft verwendet wird sind Reinheitsklassen von Null erreichbar, d.h. es befinden sich zwischen 0 und 1 Partikel in 100 ml lagerseitig austretender Sperrluft. Ohne Sperrluft ist ein Betrieb nicht möglich.

Langzeitversuche mit Fangkammerdichtsystemen

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden am Institut für Maschinenelemente von Herrn Würthner erste Langzeitversuche mit Fangkammerdichtsystemen bei Staubbeaufschlagung durchgeführt, /44/.

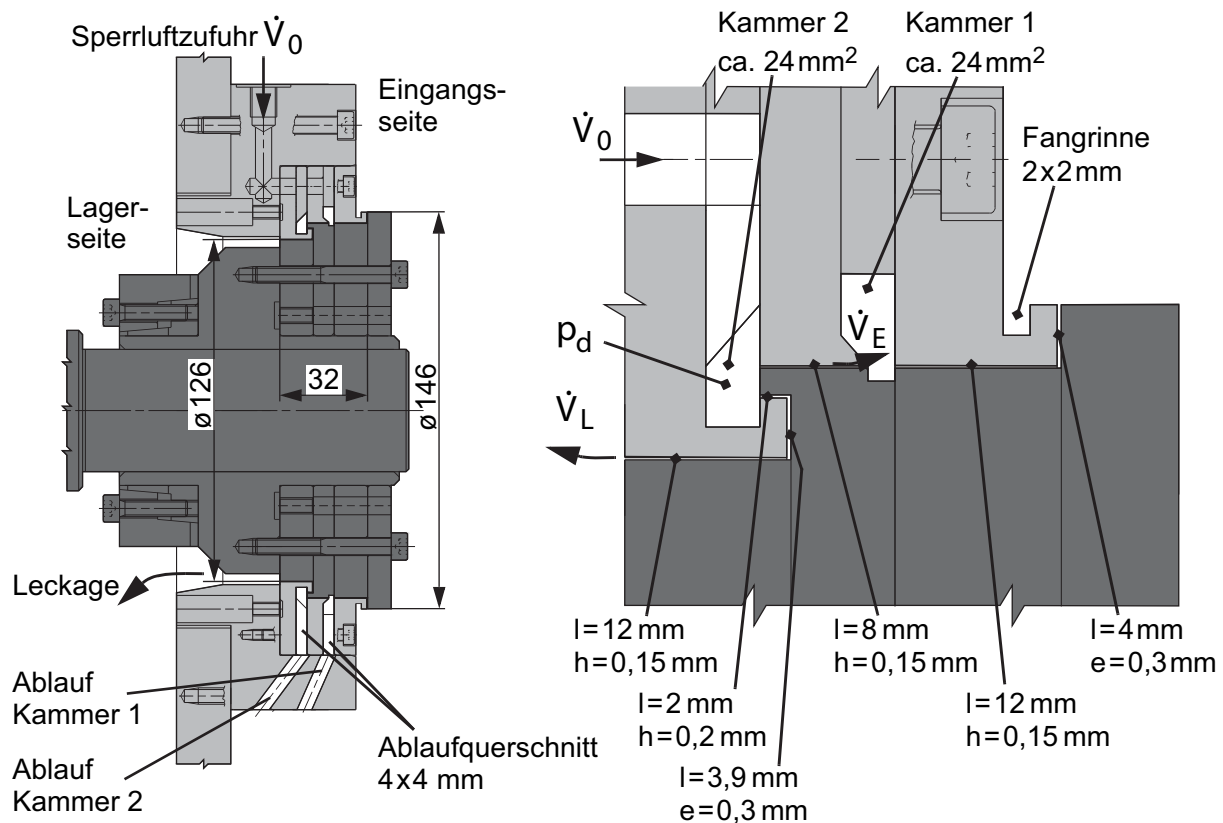


Bild 4.63 Fangkammerdichtsystem aus der Arbeit von Würthner /44/

Hierbei wurde ein Fangkammerdichtsystem, siehe Bild 4.63, mit einem Sperrluftvolumenstrom von $\dot{V} = 10\text{ l/min}$ bei unterschiedlichen Drehzahlen bis zu $n = 6000\text{ min}^{-1}$ untersucht. Die Sperrluftzufuhr erfolgte Hierbei in Kammer 2. Es konnte gezeigt werden, dass ein Zusetzen der Dichtspalte über einen Versuchszeitraum von bis zu 400 h nicht aufgetreten ist. Bei einer anschließenden Demontage der Versuchsteile zeigten sich nur vereinzelt Partikel in den arbeitsraumseitigen Drosselspalten.

Diese Versuche zeigten die prinzipielle Eignung derartiger Dichtsysteme auch für den Dauereinsatz und legten den Grundstein für die vorliegende Arbeit zur prinzipiellen Untersuchung berührungsfreier Dichtsysteme zur Staubabdichtung.

Ergebnis

Bei den Versuchen mit dem Partikelzählgerät konnte die Eignung von berührungsfreien Dichtsystemen zur Staubabdichtung quantitativ nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass mit geeignet gestalteten und betriebenen Dichtsystemen die Menge an Leckagepartikeln so weit reduziert werden kann, dass eine Gefährdung von dahinter liegenden Wälzlagern dauerhaft ausgeschlossen werden kann.

Bei den Versuchen konnte ferner die Wirksamkeit von Spaltumlenkungen im Dichtsystem anhand von quantitativen Messungen nachgewiesen werden. Es ist festzuhalten, dass eine Spaltumlenkung um 90 Grad bereits eine wesentliche Reduzierung der Leckagepartikelanzahl bewirkt. Eine weitere Umlenkung verringert die Leckagemenge nochmals drastisch. Die für die Lagerlebensdauerberechnung als Sauberkeitsgrenze angesehene Reinheitsklasse 8 wurde in Versuchen mit Spaltumlenkungen nicht überschritten.

Bei allen Versuchen zeigte sich aber, unabhängig von der Anzahl der Spaltumlenkungen, dass der Einsatz von Sperrluft unumgänglich ist. Ein Sperrluftstrom muss zu jedem Zeitpunkt in ausreichender Stärke aus dem Dichtsystem in Richtung Arbeitsraum strömen.

4.5 Untersuchungen mittels Endoskopie

Um auch bei Dichtsystemen aus Metall eine gewisse Transparenz zu erzielen, wurden Versuche mit Hilfe eines Endoskops durchgeführt. Ziel war es zu beobachten, wie und wie viele Partikel in den Dichtspalt eindringen. Es wäre dadurch möglich in der Praxis eingesetzte Systeme über eine Bohrung zu untersuchen und so Aussagen über deren Dichtwirkung und deren Verschmutzung zu treffen.



Bild 4.64 Versuchsaufbau beim Einsatz der Endoskopie

Bild 4.64 zeigt ein Foto des Endoskops mit angebauter Digitalkamera adaptiert am Prüfstand. In Bild 4.65 ist der prinzipielle Versuchsaufbau dargestellt.

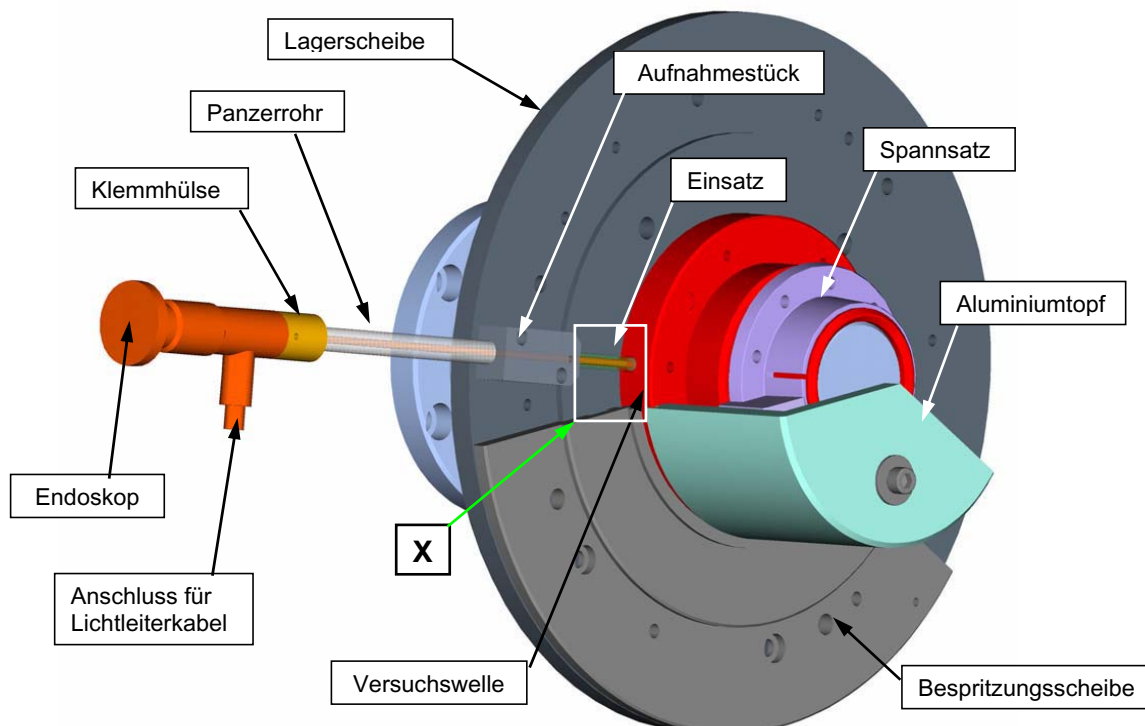


Bild 4.65 Versuchsaufbau mit Endoskop

Mit dieser Anordnung war es möglich, den Spalt des Dichtsystems zu beobachten und auch während der Versuche Aufnahmen von der Wellenoberfläche zu machen. In Bild 4.66 ist eine Aufnahme der Wellenoberfläche abgebildet, links durch das Endoskop ein Ausschnitt mit einem Durchmesser von 2 mm, rechts die ausgebaute Welle. Die gelbfarbenen Messingpartikel sind deutlich zu erkennen.

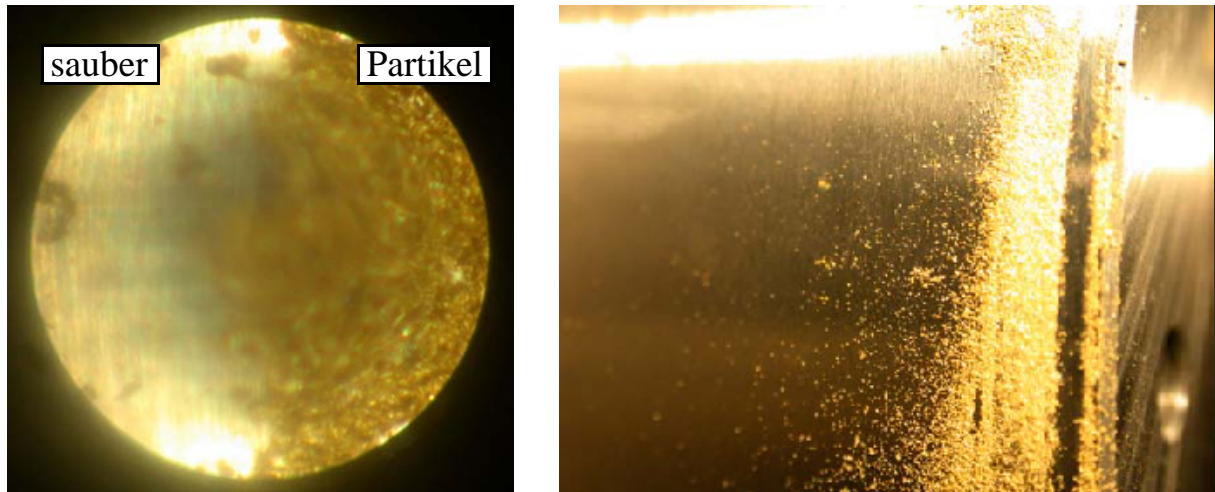


Bild 4.66 Wellenoberfläche mit Partikelablagerung, links durch Endoskop, rechts ausgebaut

Bedingt durch den kleinen Bildausschnitt auf der Welle, der bei den geringen Spalthöhen nicht größer gewählt werden konnte, eignet sich diese Methode nur sehr eingeschränkt, um die bei Partikeleintritt im Spalt ablaufenden Vorgänge zu beobachten. Zudem sind auswertbare Beobachtungen nur bei Wellenstillstand möglich.

Zusammenfassung der Versuche mit Endoskopie

Eine Beobachtung ist mit viel Aufwand zwar möglich aber durch den kleinen Bildausschnitt nur wenig aussagekräftig. Zudem erfordert die Bewertung des Gesehenen viel Erfahrung.

4.6 Untersuchung von Kassettendichtsystemen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von Untersuchungen an verschiedenen, handelsüblichen berührungsfreien Kassettendichtsystemen vorgestellt und diskutiert. Diese Dichtsysteme sind großteils schon längere Zeit auf dem Markt und werden von den Herstellern als sogenannte Schutzdichtungen verkauft. Selbstverständlich kann dies nur eine Auswahl der verfügbaren Dichtsysteme darstellen und erhebt daher auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Dichtsysteme sind laut Hersteller jeweils für den Einsatz bei Flüssigkeitsbeaufschlagung aber auch bei Verschmutzungen geeignet. Beim Einsatz mit Staub bzw. Partikeln werden meist zusätzliche Maßnahmen empfohlen.

Ziel dieser Untersuchungen war es, den aktuellen Stand der Technik mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit gefundenen Ergebnissen zu vergleichen und deren Wirksamkeit zu beurteilen.

4.6.1 GMN Labyrinthdichtung - GMN Typ „L“

Die Firma GMN - Georg Müller Industrie GmbH & Co. KG bietet zwei verschiedene berührungsfreie Dichtsysteme an. Diese lassen sich laut Hersteller in Labyrinthdichtungen und Spaltdichtungen unterscheiden /45/.

GMN Labyrinthdichtungen sind komplett einbaufertige, untrennbare Einheiten aus metallischen Einzelteilen. In der Standardausführung bestehen der Innenring der Dichtung aus Stahl und der Außenring aus Aluminium.

Von den GMN Labyrinthdichtungen existieren zwei Varianten. Der Typ „L“ ist das Basismodell. Dieses Dichtsystem ist laut Herstellerangaben für körnige Verschmutzungen und leichte Flüssigkeitsbeaufschlagung geeignet, Bild 4.67 links. Der Typ „M“, Bild 4.67 rechts, hat am Umfang zusätzliche Nuten, die, laut GMN, das in die Dichtung eingedrungene Medium nach außen abschleudern und über die Nut im Statorteil zurückführen sollen. Die GMN Labyrinthdichtung vom Typ „M“ eignet sich laut Hersteller für die Abdichtung körniger Verschmutzungen und massiver Flüssigkeitsbeaufschlagung der Dichtstelle.

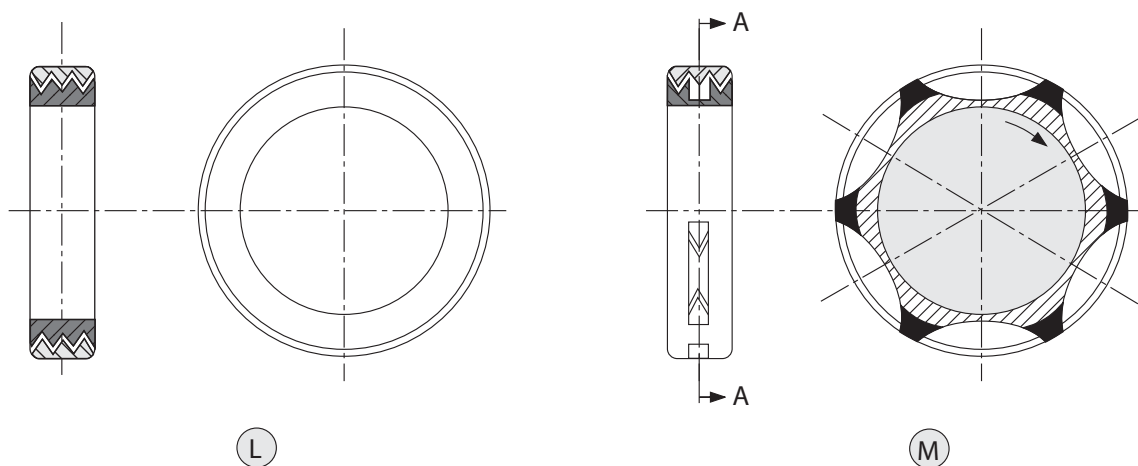


Bild 4.67 GMN Labyrinthdichtung, links Typ „L“, rechts Typ „M“ /45/

Dem Firmenprospekt /45/ ist ferner zu entnehmen, dass die Dichtwirkung der Labyrinthringe durch den Einsatz von Sperrluft mit einem minimalen Sperrluftdruck von 50 hPa gesteigert werden kann. Außerdem soll es möglich sein zwei oder mehr Labyrinthringe hintereinander einzusetzen um dadurch die Dichtwirkung zu erhöhen.

4.6.2 GMN Spaltdichtungen - GMN Typ „S“

Die GMN Spaltdichtungen bestehen aus zwei Kunststoffteilen. Diese bilden einen zackenförmigen, radial ansteigenden Labyrinthspalt. Die GMN Spaltdichtungen sind laut Hersteller bei Spritzwasserbeaufschlagung der Dichtstelle geeignet /45/. Von den GMN Spaltdichtungen existieren drei Varianten, siehe Bild 4.68.

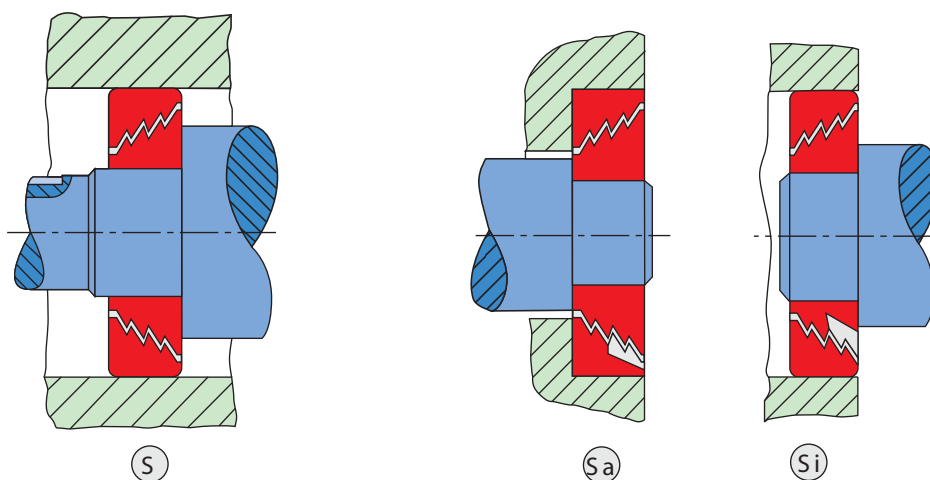


Bild 4.68 Varianten GMN Typ „S“, links Basismodell, rechts Sondertypen „Sa“ und „Si“ /45/

Typ „S“ ist das Basismodell. Die Dichtwirkung beruht zunächst auf der geometrischen Form des Labyrinths, welche das abzudichtende Medium umlenkt. Der ansteigende Spalt soll eingedrungenes Medium bei rotierender Welle oder auch rotierender Nabe durch die Fliehkraft wieder zurück zum größeren Spaltdurchmesser fördern, so der Hersteller /45/.

Die GMN-Spaltdichtung vom Typ „Sa“ besitzt am Außenring zusätzlich eine Rückführnut, siehe Bild 4.68 Mitte. Durch diese Nut wird das in die Dichtung eingedrungene Medium wieder in den abzudichtenden Raum zurückgeführt. Dieser Dichtungstyp ist bei rotierender Welle einzusetzen. Die Spaltdichtung vom Typ „Si“ besitzt die Rückführnut am Innenring, Bild 4.68 rechts. Diese Dichtung ist bei rotierender Nabe geeignet. Um die Dichtwirkung zu erhöhen, können laut GMN auch hier mehrere Dichtungen hintereinander geschaltet werden, /45/.

4.6.3 NILOS LST-O

Von der Firma NILOS Ziller GmbH & Co. KG wird eine Vielzahl von Schutzdichtungen für Wälzlager angeboten. Eine dieser Schutzdichtungen der Firma NILOS ist die Stahlscheibendichtung des Typs „LST-O“. Dabei handelt es sich um eine einbaufertige, fettgefüllte Laby-

rinthdichtung aus Stahllamellen. Sie ist laut Hersteller besonders geeignet, wenn die Lagerstelle starken Verschmutzungen ausgesetzt ist, siehe Bild 4.69 /46/.

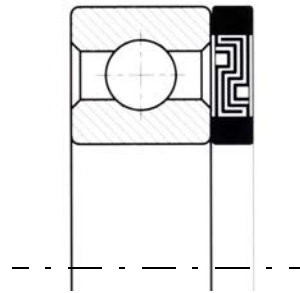


Bild 4.69 NILOS LST-O Dichtsystem für Wälzlager /46/

4.6.4 INPRO Seal Company

Die INPRO Seal Company aus den USA bietet verschiedene einbaufertige Labyrinthdichtungen zur Wälzlagerabdichtung an. Alle Dichtungen bestehen in der Standardausführung aus Bronze. Für Hochgeschwindigkeitsanwendungen und zum Schutz vor Korrosion können sie auch aus Edelstahl gefertigt werden. Alle INPRO Lagerdichtungen bestehen aus einem Stator, der durch einen Presssitz im feststehenden Gehäuse befestigt wird. Der Rotor klemmt mit einem bzw. mehreren O-Ringen auf der Welle, siehe Bild 4.70.

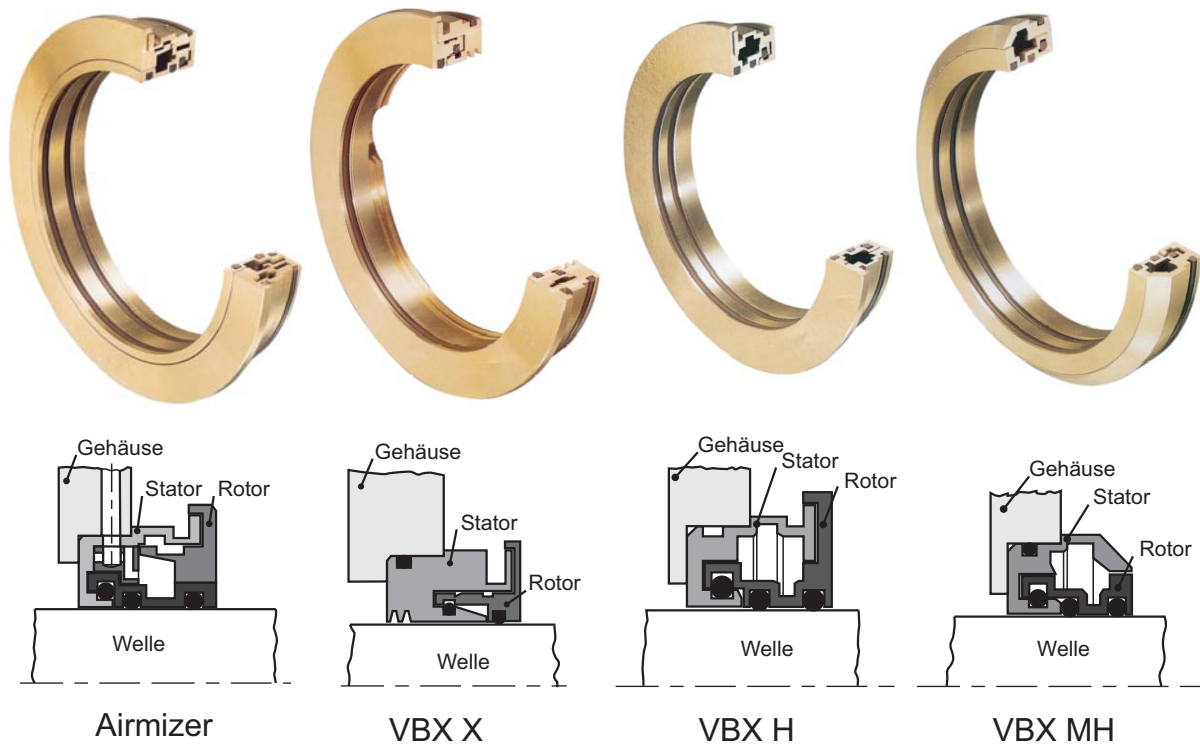


Bild 4.70 Dichtsysteme der Firma INPRO /47/

Eine weitere der angebotenen Dichtungen der INPRO Seal Company ist eine Sperrluftdichtung. Sie wird über einen O-Ring im Stator und über vier O-Ringe auf der Welle geklemmt. Am Stator der Dichtung befinden sich eine Bohrung und eine Sperrlufteinleitungsnut, um die Dichtung mit Sperrluft zu versorgen, Bild 4.71.

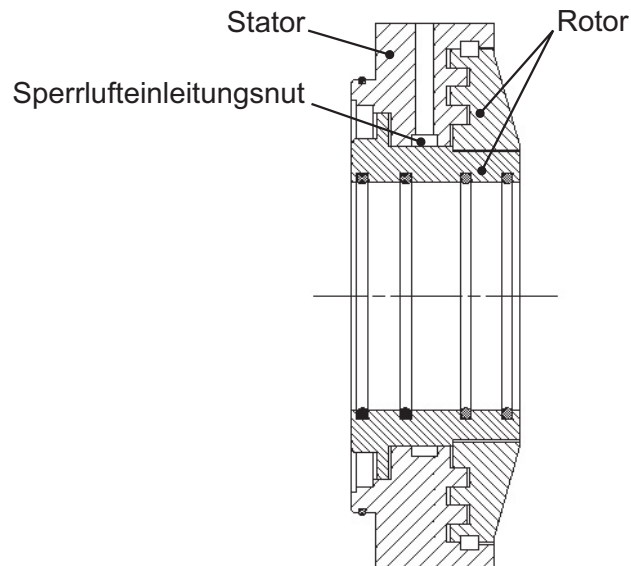


Bild 4.71 Sperrluftdichtsystem der Firma INPRO /47/

4.6.5 Weitere Hersteller berührungsfreier Dichtsysteme

Berührungsfreie Dichtsysteme werden auch von der Firma SKF GmbH angeboten. Das Dichtsystem der Firma SKF besteht im Wesentlichen aus Blechscheiben, die einen L-förmigen Querschnitt besitzen. Diese Scheiben werden wechselseitig montiert und mit Fett gefüllt. Laut SKF können bis zu vier solcher Paare hintereinander montiert werden, /48/.

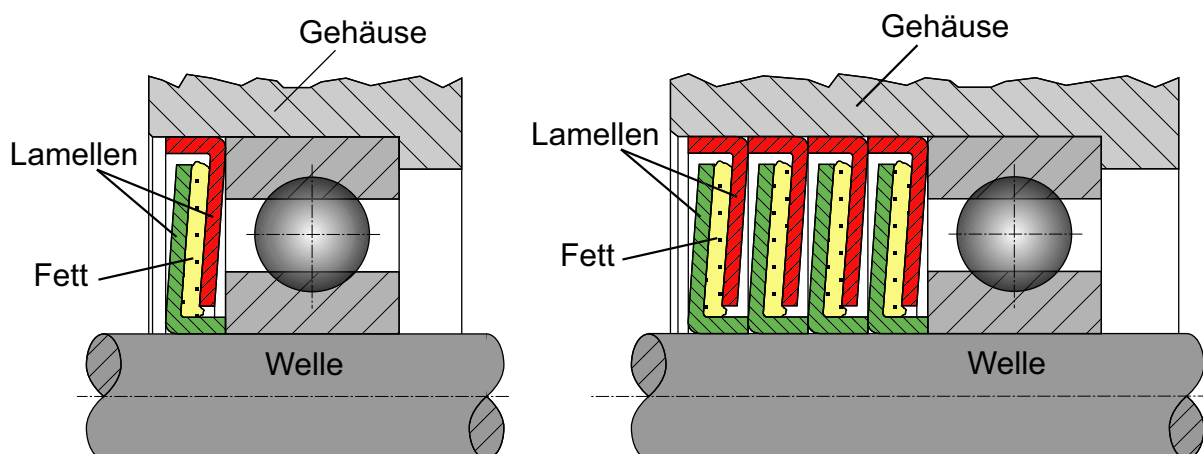


Bild 4.72 Berührungsfreie Dichtsysteme der Firma SKF /48/

Von der Firma Garlock Sealing Technologies existieren die drei Modelle Iso-Gard, Equalizer und Micro-Tech als berührungsfreie Dichtungen. Von den Modellen Iso-Gard und Equalizer

gibt es je nach Anwendungsfall unterschiedliche Varianten. Bei allen berührungsfreien Dichtungen von Garlock sind bei der Montage Rotor und Stator verbunden und die Dichtung kann als ein Teil montiert werden, /49/-/53/.

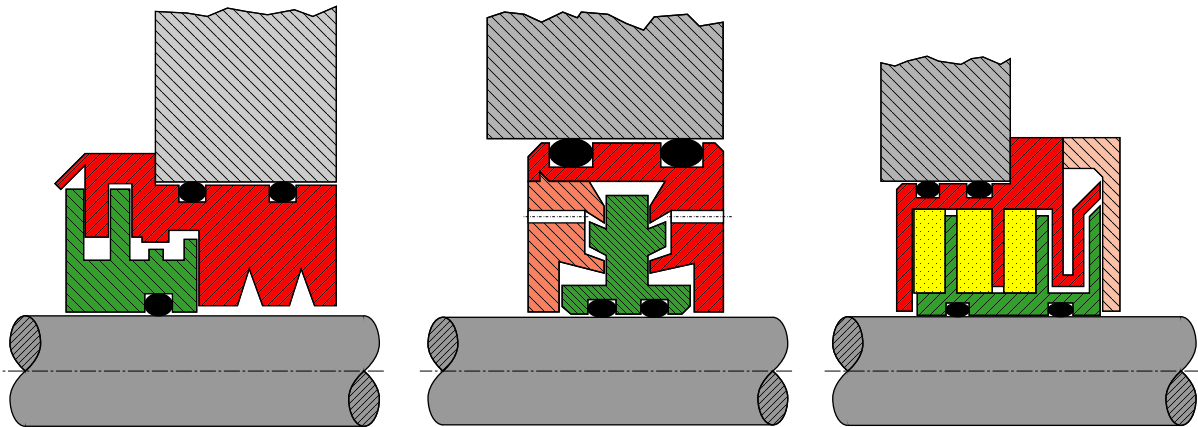


Bild 4.73 Berührungsfreie Dichtsysteme der Firma Garlock - Iso-Gard (links), Equalizer (Mitte), Micro-Tech (rechts), /49/ - /53/

Die berührungsfreien Dichtungen Equalizer und ISO GARD sind Labyrinthdichtungen zur Abdichtung von Flüssigkeiten. Der Garlock Iso-Gard ist eine berührungsfreie Labyrinthdichtung mit je einem Rücklaufkanal für den Schmierstoff und das abzudichtende Medium. Die Dichtung Garlock Micro-Tec ist eine berührungsfreie Labyrinthdichtung aus Aluminium. Bei dieser Dichtung befindet sich zwischen Stator und Rotor ein feinporiges Material, das laut dem Katalog von Garlock, mit dem abzudichtenden Medium reagiert und eine Barriere gegen Leckage und Verschmutzung des Lagers bildet. Diese Dichtung ist angeblich bei stark beanspruchten Dichtstellen besonders geeignet, /49/ - /53/.

Parker bietet unter dem Handelsnamen ProTech berührungsfreie Labyrinthdichtungen an. Diese Dichtsysteme wurden bisher unter dem gleichen Handelsnamen von der Firma John Crane vertrieben. Diese Dichtungen sind für unterschiedliche Einbauverhältnisse und Abdichtaufgaben in zahlreichen Varianten erhältlich. Die ProTech Dichtungen verhindern laut Herstellerangaben eine Leckage des Schmierstoffs aus dem Lagerraum und schützen die Wälzlager vor Verunreinigungen aus dem Arbeitsraum, /54/.

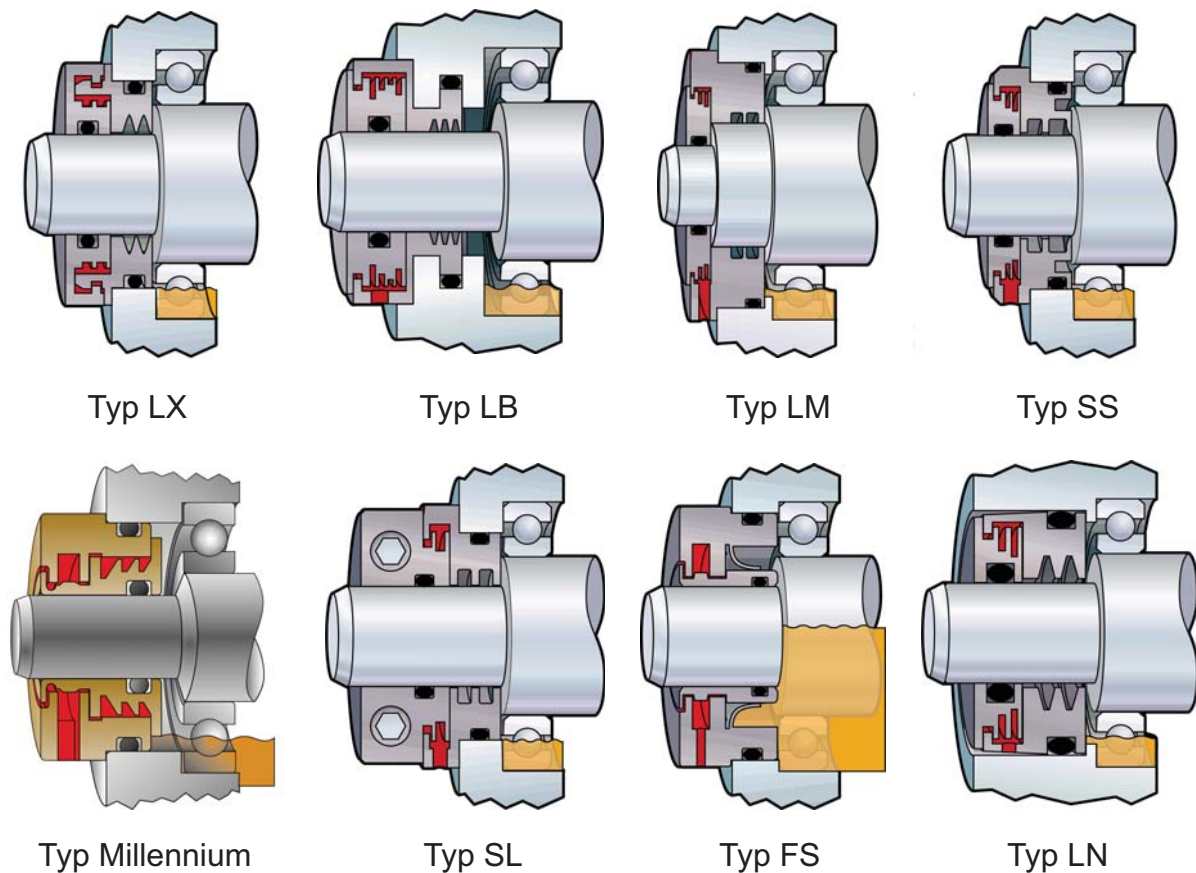


Bild 4.74 Berührungsfreie Dichtsysteme der Firma Parker /54/

Die Firma Flowserve bietet unter dem Handelsnamen Bearing Gard berührungsfreie Labyrinthdichtungen zur Wälzlagerabdichtung an. Die Dichtung schützt das Lager laut Herstellerangaben vor Verschmutzungen von außen und verhindert die Leckage des Lageröls.

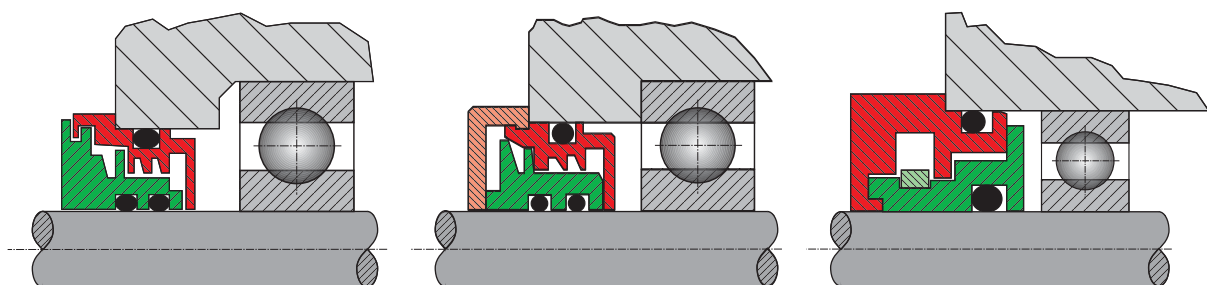





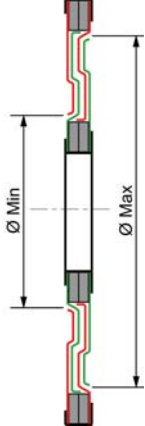
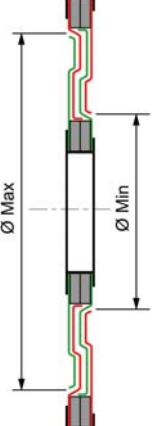
Bild 4.75 Berührungsfreie Dichtsysteme der Firma Flowserve /55/

Die Dichtungen bestehen je nach Anwendungsfall aus Bronze, rostfreiem Stahl oder nichtmetallischen Werkstoffen. Der Rotor und der Stator der Dichtung Bearing Gard werden durch einen Klemmring zusammengehalten. Dadurch werden alle inneren Spalte eingestellt und die Dichtung kann als eine Einheit montiert werden. Die Dichtung besitzt Rückführnuten für das Schmieröl und das abzudichtende Medium, /55/.

4.6.6 Untersuchte Dichtelemente und durchgeführte Untersuchungen

Von den handelsüblichen berührungsfreien Dichtungen wurden die INPRO Sperrluftdichtung, der GMN Labyrinthring vom Typ „L“, die GMN Spaltdichtung des Typs „S“ und die NILOS Labyrinthdichtung vom Typ LST-O untersucht. Tabelle 4.4 zeigt eine Übersicht über die untersuchten Dichtsysteme. Die Größe der Dichtsysteme wurde so ausgewählt, dass der Durchmesser des Spalteingangs des Dichtsystems ca. $D = 120$ mm betrug. Dies ist auch der Durchmesser des Drosselspaltes der bisher beschriebenen Dichtsysteme, die mit dem Dichtsystembaukasten aufgebaut wurden. Die Versuchsergebnisse sind somit untereinander direkt vergleichbar. Auf die Untersuchung weiterer handelsüblicher Dichtsysteme wurde verzichtet da bei ihnen keine neuen Wirkprinzipien verwirklicht waren.

TABELLE 4.4 Versuche mit Kassettendichtsystemen

INPRO Sperrluft	GMN Typ „L“	GMN Typ „S“	NILOS LST-O Ø Max außen	NILOS LST-O Ø Min außen
				

Bei allen Dichtsystemen wurde die Leckage in Abhängigkeit vom Sperrluftstrom mit dem Partikelzähler gemessen, siehe Kapitel 4.4 auf Seite 79. Zusätzlich wurde das Reibmoment der Dichtungen bei unterschiedlichen Sperrluftdrücken bestimmt. Die Drehzahl der Welle betrug hierbei $n = 100 \text{ min}^{-1}$, die maximale Partikelgeschwindigkeit betrug $v_{max} = 22,0 \text{ m/s}$. Bei der Dichtung NILOS LST-O wurde außerdem der Einfluss der Einbaulage auf die Dichtwirkung und das Reibmoment untersucht.

Die Messung des Reibmoments der Dichtung ist ein Maß für die innere Verschmutzung der Dichtsysteme durch Ablagerungen von Partikeln. Solange die Dichtsysteme im Inneren partikelfrei sind ist kein oder nur ein geringes und konstantes Reibmoment zu erwarten. Mit zunehmender Verschmutzung der Dichtsysteme durch Partikelablagerungen kommt es lokal zu Berührungen der Spaltwände über die abgelagerten Partikel. Im Falle einer solchen Berührung läuft das Dichtsystem nicht mehr reibungsfrei. Ein Reibmomentsprung ist die Folge. Derartige verschmutzte Dichtsysteme sind nicht mehr zuverlässig für lange Betriebszeiten geeignet. Ein Fressen des Dichtsystems steht unmittelbar bevor.

Zur Messung des Reibmoments des Dichtsystems wurde die Statorplatte des Prüfstandes um ein aerostatisches Lager ergänzt, siehe Bild 4.76. An dieses aerostatische Lager wurde der Stator des Dichtsystems befestigt. Das entstehende Moment der Dichtung stützte sich über den

Stator am aerostatischen Lager ab. Dieses wiederum übertrug die Stützkraft auf einen Kraftaufnehmer, der mit einem Rechner ausgelesen wurde.

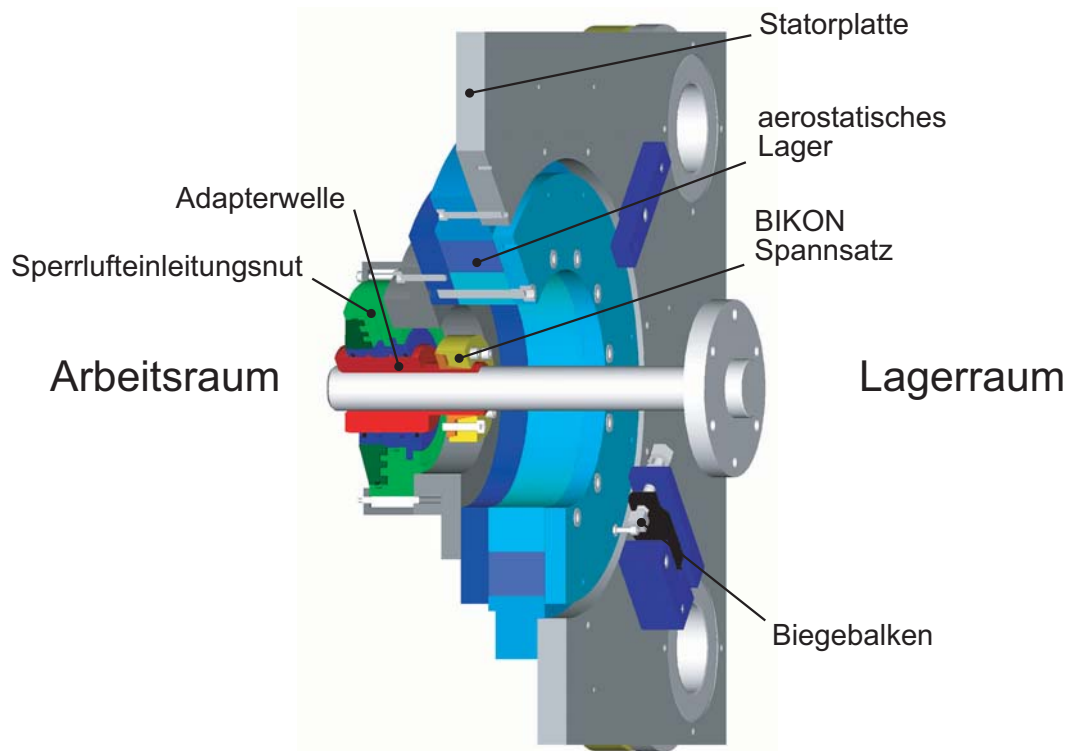


Bild 4.76 Versuchsaufbau zur Reibmomentsmessung mit aerostatischem Lager am Beispiel der Sperrluftdichtung der Fa. INPRO

Versuchsergebnisse mit der INPRO Sperrluftdichtung

Über eine Bohrung im Gehäuse der Dichtung und über die Sperrlufteinleitungsnut wurde die Sperrluft eingeleitet. Um die Leckage in Abhängigkeit vom Sperrluftstrom zu ermitteln, wurde der Sperrluftstrom schrittweise von 100 l/min auf 0 l/min in Stufen von 5 l/min abgesenkt. Bei dieser Dichtung wurden 100 l/min als maximaler Volumenstrom gewählt, da sich durch die engen Spalte in der Dichtung hierbei bereits ein Druck von $p = 500 \text{ hPa}$ aufgebaut hat. Dieser Druck ist somit zehnmal so hoch wie der in DIN 69002 empfohlene Sperrluftdruck in der Einleitungsnut für Sperrluftdichtungen bei Kurzspindeln.

Bild 4.77 zeigt das Diagramm der gefundenen Leckagepartikel. Die Reinheitsklassen der Partikelzahlen bewegen sich insgesamt auf einem sehr geringen Niveau. Um sicher zu gehen, dass sich ohne Sperrluft keine Partikel in der Dichtung ansammeln, die bei der ersten Messung mit 1 l/min Sperrluft nicht registriert wurden, wurde der Sperrluftvolumenstrom alternierend von 1 l/min auf 10 l/min verändert. Auch hierbei trat keine Erhöhung der gemessenen Partikelanzahl auf.

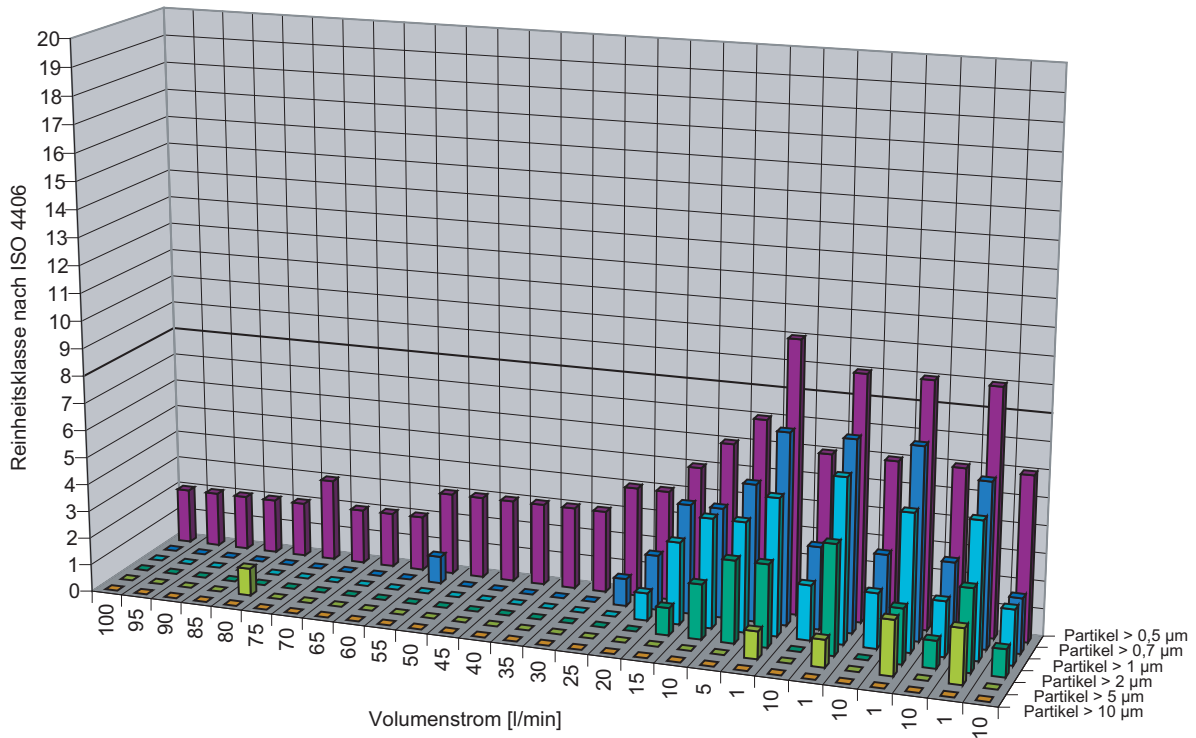


Bild 4.77 Partikelzahlen bei der INPRO Sperrluftdichtung

Das Reibmoment lag bei diesem Versuch mit einem Dichtsystem mit einem Drosselspaltdurchmesser von 120 mm im Bereich zwischen 40 und 50 Nmm und schwankte stark in diesen Grenzen. Ein Anstieg der auf ein Zusetzen des Dichtsystems schließen lassen würde war nicht zu verzeichnen.

Die INPRO Sperrluftdichtung ist demnach zur Staubabdichtung geeignet. Der Sperrluftbedarf, der bei diesem Dichtsystem notwendig ist, ist aufgrund der geringen Spalthöhen des Dichtsystems sehr gering. Bei den Versuchen waren Sperrluftströme größer $\dot{V} = 25$ l/min ausreichend.

Versuchsergebnisse mit der GMN Labyrinthdichtung Typ „L“

Im Gegensatz zu dem recht aufwendigen und teuren Sperrluftdichtsystem der Firma INPRO, das im letzten Kapitel untersucht wurde, handelt es sich bei der Labyrinthdichtung der Firma GMN um einfachere Bauteile, die augenscheinlich eine größere Drosselspalthöhe aufweisen.

Der Dichtungsaufbau auf dem Prüfstand bestand aus zwei GMN Labyrinthringen Typ „L“, zwischen denen Sperrluft eingeleitet werden konnte. Der Stator wurde im aerostatischen Lager befestigt, um das Reibmoment der Dichtringe messen zu können, Bild 4.78.

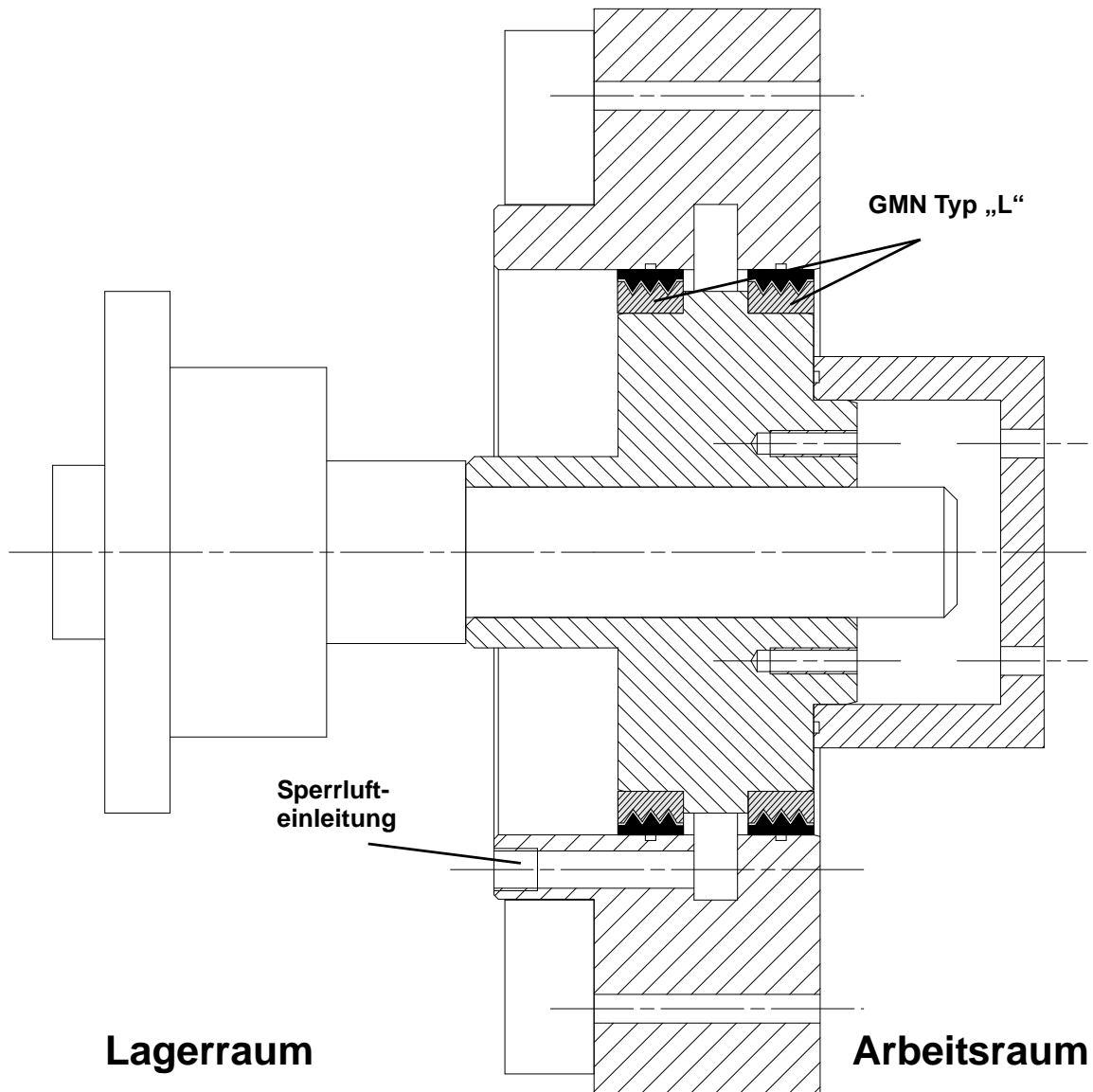


Bild 4.78 Versuchsaufbau mit GMN Typ „L“

Zur Beurteilung des Abdichtverhaltens der GMN Typ „L“ Ringe wurde zunächst der Sperrluftvolumenstrom von 480 l/min in Stufen zu je 25 l/min auf 1 l/min gedrosselt. Der Druck in der Sperrlufteinleitungsnut betrug maximal $p = 75$ hPa bei einem Volumenstrom von 480 l/min. Dieser Druck ist damit 1,5-mal so hoch wie der in DIN 69002 empfohlene Sperrluftdruck. Der hohe Volumenstrom zum Aufbau des Drucks ist in den recht hohen Drosselspalthöhen begründet.

Insgesamt bewegen sich die gemessenen Partikelzahlen auf einem geringen Niveau. Lediglich beim Wechsel zwischen 50 und 1 l/min zeigt sich, dass sich bei 1 l/min Sperrluft Partikel erwartungsgemäß im Dichtsystem ansammeln, die bei einer anschließenden Erhöhung des Volumenstroms ausgeblasen werden können.

Bei der Umrechnung der Partikelzahlen auf die entsprechenden Ölreinheitsklassen ergaben sich bei allen Sperrluftströmen die Reinheitsklassen 0.

Um die Gefahr des Fressens der GMN Labyrinthringe Typ „L“ besser beurteilen zu können, wurde ein Versuch ohne Sperrluft und mit öligem Dichtspalt durchgeführt. Bild 4.79 zeigt das gemessene Reibmoment über der Zeit aufgetragen.

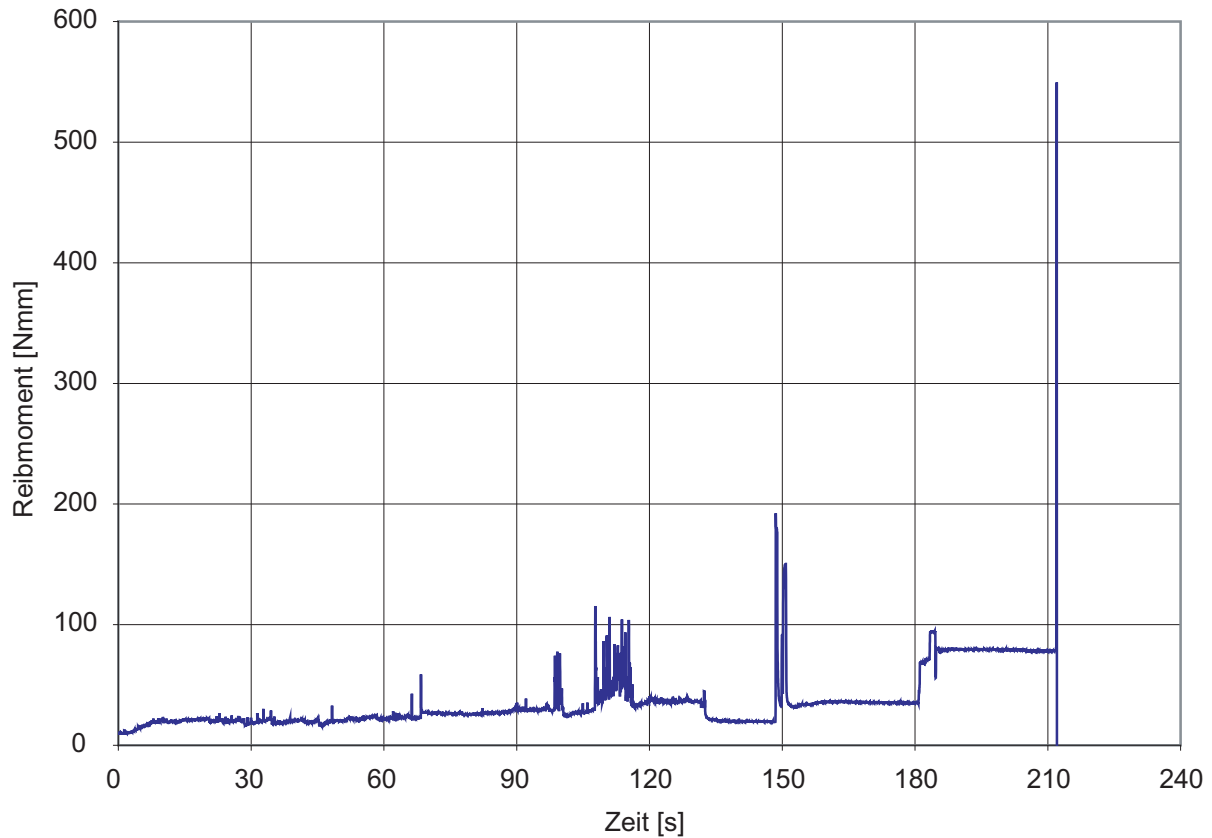


Bild 4.79 Reibmoment GMN Labyrinthring Typ „L“ ohne Sperrluft, öliger Dichtspalt
 $\dot{V} = 0 \text{ l/min}$

Ab einer Versuchszeit von ca. 60 Minuten traten vereinzelte Reibmomentspitzen auf. Die Häufigkeit und die Höhe dieser Spitzen stiegen mit fortlaufender Versuchszeit an. Nach 212 Minuten kam es zu einem Reibmomentsprung, bei dem sich die Versuchseinrichtung, zum Schutz der Messtechnik, selbstständig abgeschaltet hatte. Es ist zum Fressen des Dichtsystems gekommen.

Bild 4.80 links zeigt die Prüfkammer und den arbeitsraumseitigen GMN Labyrinthring nach dem Versuch mit öligem Spalt. Im Bild 4.80 rechts ist gut zu erkennen, dass Partikel in den Dichtspalt eingedrungen sind und den Spalt zwischen Rotor und Stator fast vollständig aufgefüllt haben.

Auch bei den Versuchen mit den GMN Labyrinthringen vom Typ „L“ konnten in Verbindung mit Sperrluft gute Dichtheit erzielt werden. Ohne den Einsatz von Sperrluft kommt es zum Zusetzen der Drosselspalte. Ein Einsatz ohne Sperrluft ist nicht dauerhaft möglich.

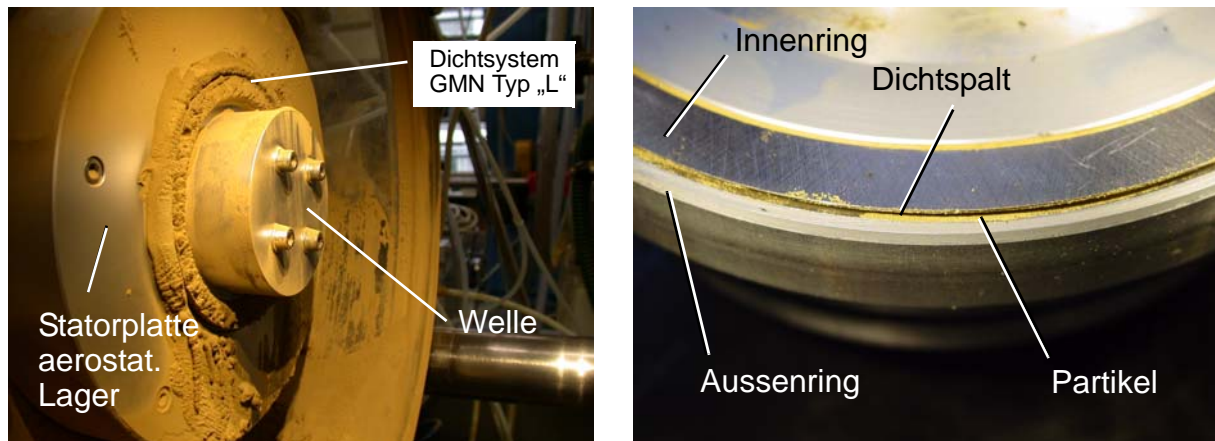


Bild 4.80 GMN Labyrinthring Typ „L“ nach Versuch mit öligem Dichtspalt, links im noch montierten Zustand, rechts Spalt mit eingelagerten Partikeln

Versuchsergebnisse mit der GMN Spaltdichtung Typ „S“

Für die Untersuchungen der GMN Ringe vom Typ „S“ wurden, wie beim Typ „L“ auch, zwei Ringe montiert. Bei der Montage beider Dichtringen wies der große Spaltdurchmesser, gemäß den Einbauhinweisen von GMN, nach außen. Bei der Leckageuntersuchung lagen die Partikelanzahlen durchweg im Bereich der Reinheitsklasse 0.

Um das Reibmoment der Dichtungen genauer untersuchen zu können, wurde der Sperrluftdruck in der Nut zwischen den beiden Dichtungen von $p = 50$ hPa in Stufen auf $p = 25$ hPa und $p = 0$ hPa abgesenkt. Bei jeder Stufe wurde die Dichtung eine Stunde lang mit Partikeln beaufschlagt und das Reibmoment gemessen. Der Verlauf des Reibmoments bei diesem Versuch ist in Bild 4.81 dargestellt.

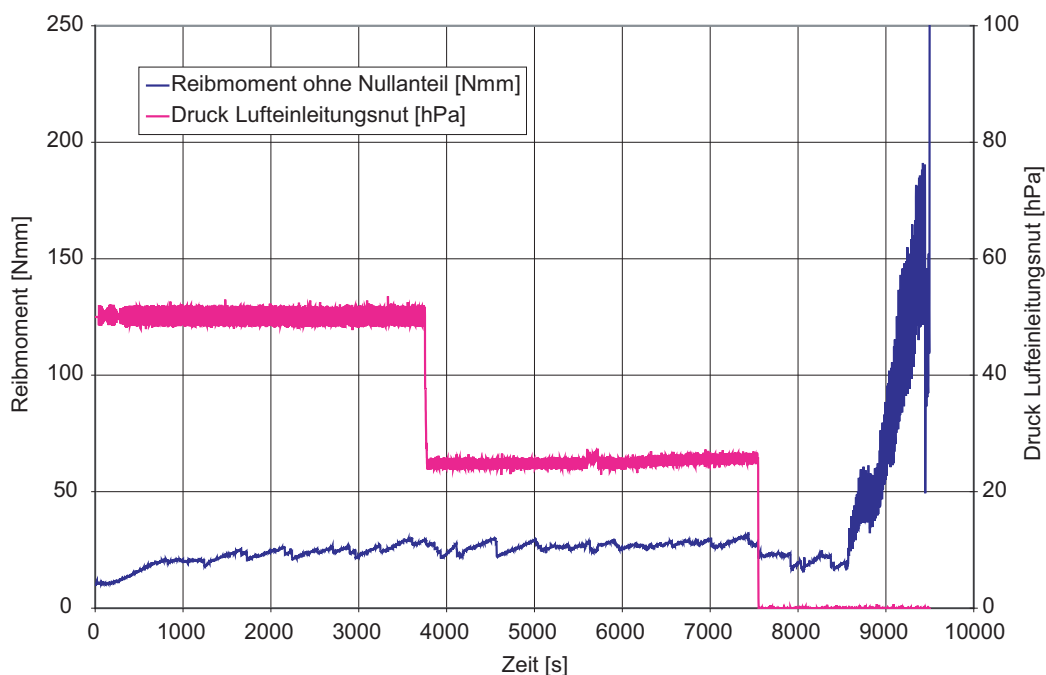


Bild 4.81 Reibmoment GMN Spaltdichtung Typ „S“ bei abgestuftem Sperrluftdruck

Aufgrund des stark schwankenden Reibmoments bei $p = 0$ hPa ist darauf zu schließen, dass Partikel in den Dichtspalt eingedrungen sind und es dort zeitweilig zur Verklebung von Partikeln gekommen ist. Ein sicherer Betrieb der Dichtung GMN Typ „S“ ohne Sperrluft ist daher nicht möglich. Die Dichtung kann nur in Verbindung mit Sperrluft zur Partikelabdichtung eingesetzt werden. Diese Vermutung konnte mit einem Schnitt des Dichtsystems nachgewiesen werden. Das Dichtsystem wurde hierzu nach der Demontage vorsichtig in Gießharz eingebettet und aufgesägt. In Bild 4.82 ist der aufgesägte Dichtring dargestellt.

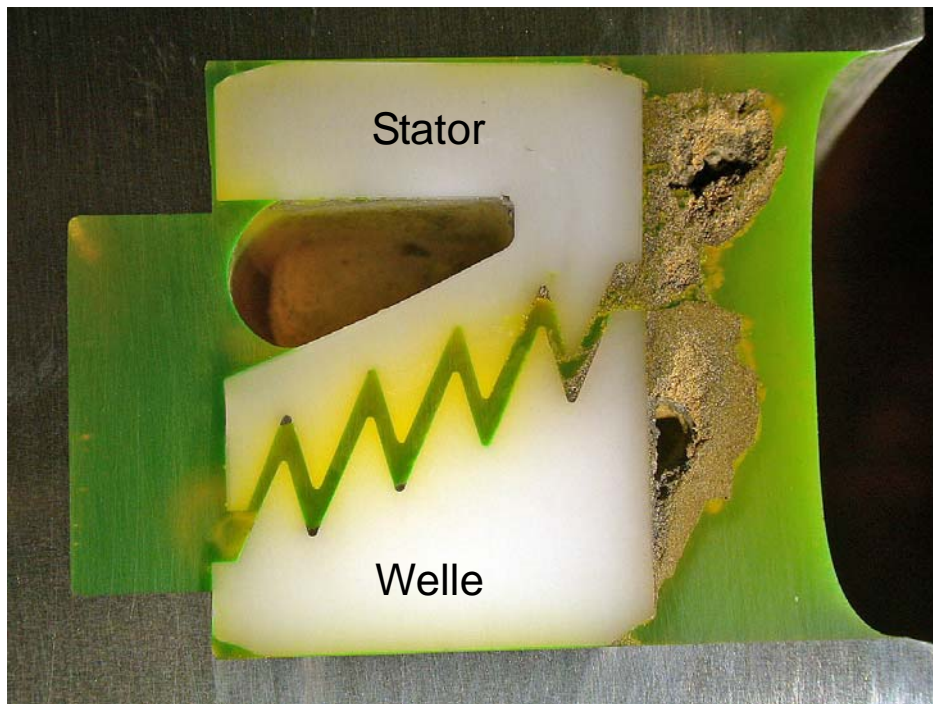


Bild 4.82 GMN Spaltdichtung Typ „S“, Querschnitt der Dichtung nach dem Versuch, in Gießharz eingebettet

Rechts vor dem Dichtring sind noch anhaftende Partikelwülste zu erkennen. Diese Partikel haben den Spalteingang gänzlich zugewandt. Dieser Bereich ist für den oben erwähnten Reibmomentanstieg verantwortlich. Es ist weiter zu erkennen, dass die Partikel nach dem Passieren des Spalteingangs noch bis zur ersten Spaltumlenkung eingedrungen sind. Hier haben sie sich größtenteils wieder abgelagert. Diese erste Spaltumlenkung stellt ein „Tal“ im rotierenden Teil des Dichtsystems dar. Bei der Rotation fallen einzelne Partikel von der Welle ab und können so in den nächsten Spaltteil, ein „Tal“ im Statorteil, fallen. Nach den ersten beiden Spaltumlenkungen finden sich keine weiteren, sichtbaren Partikel im Spalt.

Versuchsergebnisse mit NILOS LST-O Ringen

Da der Hersteller der NILOS LST-O Ringe keine expliziten Angaben über die Einbaulage der Dichtungen macht, wurden die Ringe in beiden Einbaulagen untersucht. Die NILOS LST-O Ringe wurden vor dem Einbau gewaschen, dadurch waren die Ringe fettfrei. Die Ergebnisse waren somit besser mit denen der anderen nicht gefetteten Dichtsysteme vergleichbar.

NILOS LST-O Ring, großer Dichtspaltdurchmesser Richtung Arbeitsraum

Die Einbaulage mit dem großen Dichtspaltdurchmesser in Richtung Arbeitsraum ist die dichtungstechnisch günstigere Lage, da in den Dichtspalt eingedrungene Partikel wieder durch die Rotation nach außen aus dem Spalt heraus geschleudert werden. Der prinzipielle Versuchsaufbau mit zwei Ringen ist analog zu den Versuchen mit den GMN Ringen Typ „S“. Beim Leckagetest mit Sperrluftströmen zwischen 500 l/min und 1 l/min lagen die Partikelzahlen durchweg im Bereich der Reinheitsklasse 0. Nach der Demontage der Dichtung konnten nur im äußersten Dichtspalt auf der Arbeitsraumseite Partikel im Spalt gefunden werden. In allen anderen Dichtspalten waren keine Partikel sichtbar. Beim Reibmomentversuch mit abgestuftem Sperrluftdruck, analog zum Versuch mit den GMN Ringen Typ „S“, zeigte sich ein stark schwankendes Moment, das im Mittel über die Versuchsdauer leicht anstieg. Ein sicherer Betrieb ist auch hier ohne Sperrluft nicht möglich.

NILOS LST-O Ring, kleiner Dichtspaltdurchmesser Richtung Arbeitsraum

Die Einbaulage mit dem kleinen Dichtspaltdurchmesser in Richtung Arbeitsraum ist für die Dichtwirkung der NILOS LST-O Ringe ungünstiger. Bei dieser Einbaulage werden in die Dichtung eingedrungene Partikel durch die Rotation weiter ins Innere des Dichtsystems und somit weiter in Richtung Lagerraum transportiert. Die aus den Partikelzahlen beim Leckageversuch mit Sperrluftströmen zwischen 500 l/min und 1 l/min errechneten Reinheitsklassen lagen im gesamten Volumenstromspektrum im Bereich der Reinheitsklasse 0. Messingpartikel waren nach der Demontage der Dichtungen nur im arbeitsraumseitigen Dichtspalt des äußeren Dichtrings sichtbar.

Auch beim Reibmomentsversuch mit abgestuftem Sperrluftdruck zeigten die Ergebnisse keine Abhängigkeit der Einbaulage der LST-O Ringe. Das Reibmoment stieg bei sehr unruhigem Verlauf stetig an.

Gegendruck bei Versuchen mit NILOS LST-O Ring

Bei einer zweiten Versuchsreihe mit den NILOS LST-O Ringen wurden dieselben Versuche wie oben beschrieben durchgeführt, jetzt mit einem Überdruck im Arbeitsraum von $p_A = 1 \text{ hPa}$ über Umgebungsdruck. Es ließ sich zeigen, dass der Druck im Arbeitsraum einen bedeutenden Einfluss auf die Funktion der berührungsfreien Dichtungen bei niedrigem Sperrluftdruck hat.

Zunächst wurden bei der Einbaulage mit kleinem Dichtspaltdurchmesser nach außen das Dichtverhalten und das Reibmoment bei abgestuftem Druck in der Sperrlufteinleitungsnut bestimmt. Bei nur 1 l/min Sperrluft wurden hinter den beiden Dichtungen sehr viele Partikel gemessen. Bei einem Sperrluftstrom von 50 l/min ging die Partikelanzahl wieder stark zurück, Bild 4.83

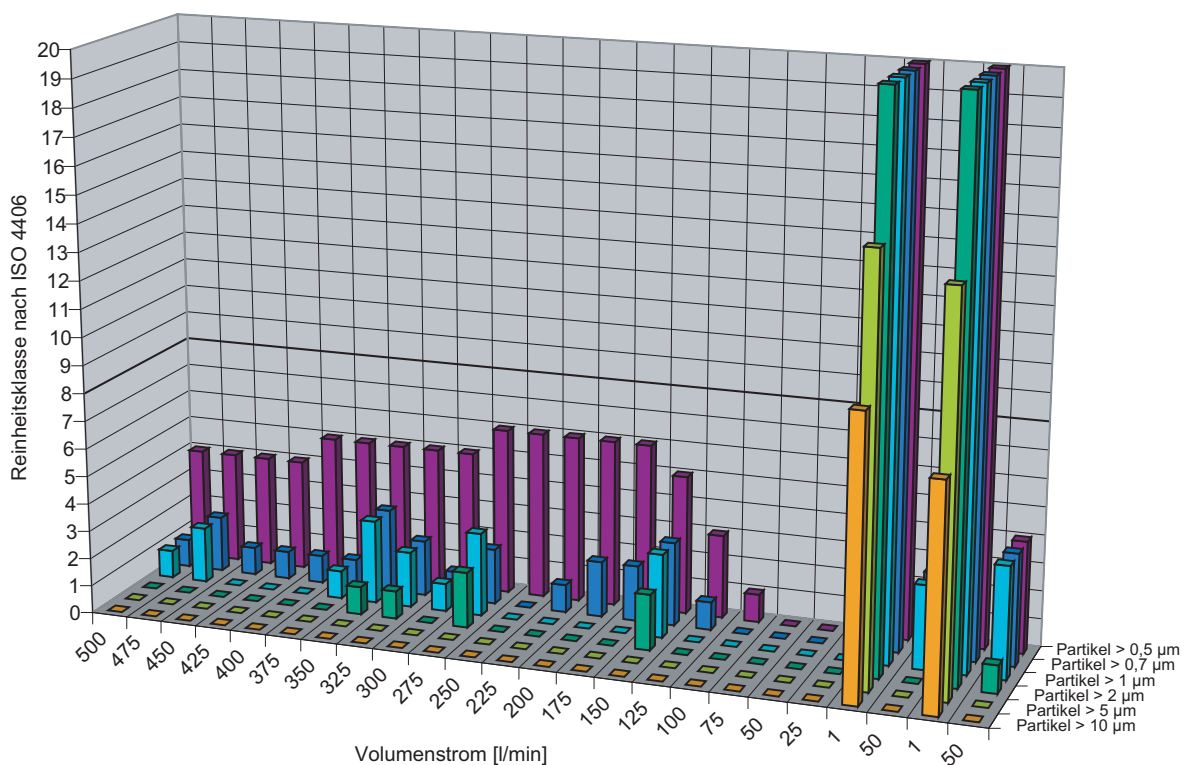


Bild 4.83 Leckagepartikel bei NILOS LST-O mit erhöhtem Druck im Arbeitsraum

Die absolute Anzahl der hier bei 1 l/m Sperrluft gefundenen Leckagepartikel lag aufgrund des Drucks im Arbeitsraum von $p_A = 1 \text{ hPa}$ bei maximal 1.300.000. Ohne erhöhten Druck im Arbeitsraum lagen die maximalen Anzahlen der Partikel unter 1.000. Bei der Umrechnung der Anzahlen auf die Reinheitsklassen ergaben sich ohne Gegendruck für die Partikel $> 5 \mu\text{m}$ die Klassen 3 - 4 statt wie hier, mit Gegendruck 14 - 15 und für die Partikel $> 2 \mu\text{m}$ die Klassen 8 - 10 statt hier 20.

Wie bei den Versuchen zuvor wurde auch bei dieser Versuchsreihe ein Versuch zur Ermittlung des Reibmomentes durchgeführt. Der Sperrluftdruck in der Einleitungsnut wurde von zunächst 50 hPa auf 25 hPa und schließlich auf 0 hPa abgesenkt. Bei der Messung der Reibung war das Reibmoment bei $p = 50 \text{ hPa}$ zunächst konstant, bei $p = 25 \text{ hPa}$ schwankte es stärker um einen konstanten Mittelwert. Als der Druck in der Sperrlufteinleitungsnut von $p = 25 \text{ hPa}$ auf

$p = 0$ hPa abgesenkt wurde, stieg das Reibmoment des Dichtsystems schlagartig sehr stark an und die Versuchswelle wurde zum Schutz der Messeinheit vor Überlast automatisch abgeschaltet, Bild 4.84.

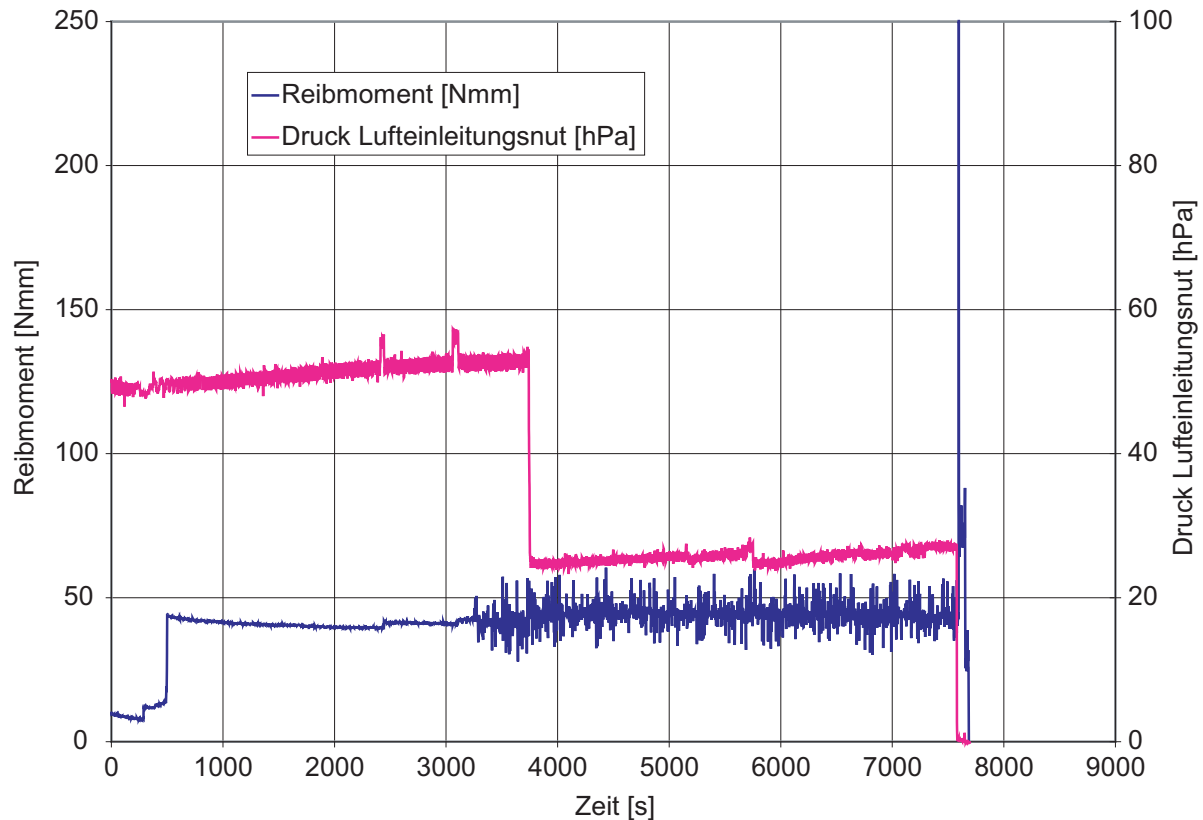


Bild 4.84 Reibmoment bei NILOS LST-O mit erhöhtem Druck im Arbeitsraum, Abschaltung des Versuchs nach Momentsprung

Bei erhöhtem Druck im Arbeitsraum ist demnach ein Betrieb der NILOS LST-O Ringe und auch aller anderen berührungsfreien Dichtsysteme zur Partikelabdichtung ohne Sperrluft, selbst kurzfristig, nicht möglich. Sobald die Sperrluft abgeschaltet wird transportiert der geringe Luftstrom, durch das Dichtsystem aufgrund des erhöhten Drucks im Arbeitsraum durchströmt, schlagartig so viele Partikel in den Dichtspalt, das sich dieser sofort zusetzt.

Bei umgekehrter Einbaulage der Ringe, großer Dichtspaltdurchmesser außen, zeigte sich ein ähnliches Verhalten. Auch bei diesem Versuch kam es bei der Abschaltung der Sperrluft spontan zu einem Sprung im Reibmoment. Anschließend lag das Reibmoment auf einem höheren Niveau als zuvor. Nach ca. 35 Minuten kam es zu einem weiteren plötzlichen Anstieg, bei dem der Prüfstand abgeschaltet wurde. Nach der Demontage der Dichtringe konnten an und zwischen den Dichtringen, den Distanzhülsen und auch in der Sperrlufteinleitungsnut sehr viele Partikel nachgewiesen werden, siehe Bild 4.85 und Bild 4.86.

Der Messingstaub war durch den ersten Dichtring bis zur Sperrlufteinleitungsnut vorgedrungen. Am ersten Ring war der Messingstaub auf beiden Seiten des Rings optisch gut nachweisbar, siehe Aufnahme 1 und 2 in Bild 4.85. Auch am zweiten Ring befanden sich auf der Seite der Sperrlufteinleitungsnut noch sehr viele Messingpartikel (Aufnahme 3 in Bild 4.85). Auf

der Lagerseite des zweiten Rings war kein Messingstaub mehr erkennbar, Aufnahme 4. Es wurden jedoch mit dem Partikelzähler viele, vor allem kleine Partikel registriert.

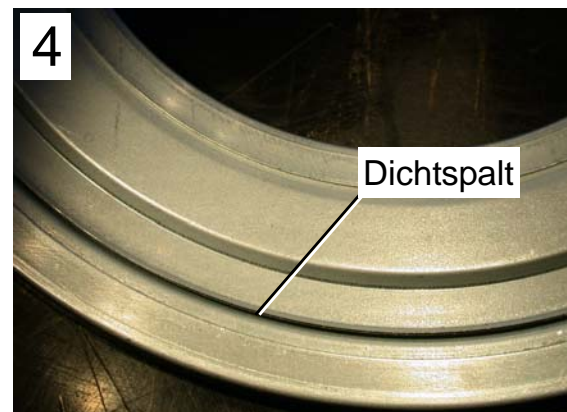
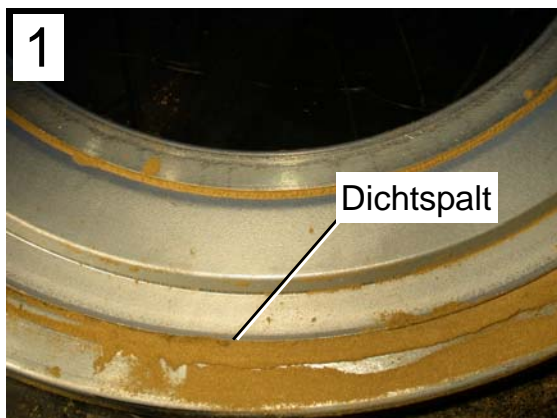
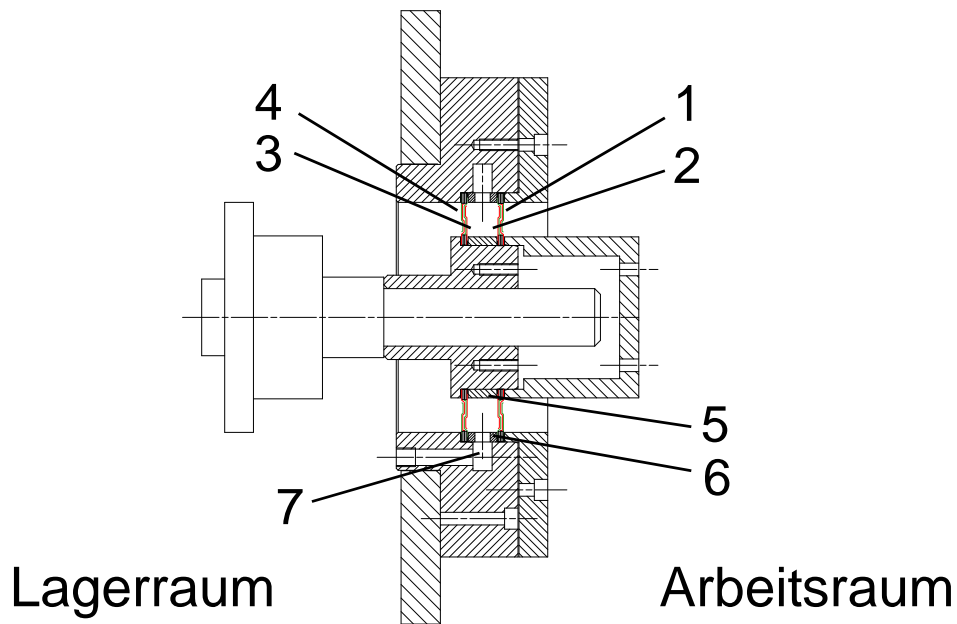


Bild 4.85 NILOS LST-O Ringe nach Versuch mit erhöhtem Druck im Arbeitsraum

Auch an den beiden Distanzhülsen auf der Welle und im Stator, Aufnahmen 5 und 6 in Bild 4.86, und in der Sperrlufteinleitungsnut, Aufnahme 7, befanden sich sehr viele Messingpartikel.

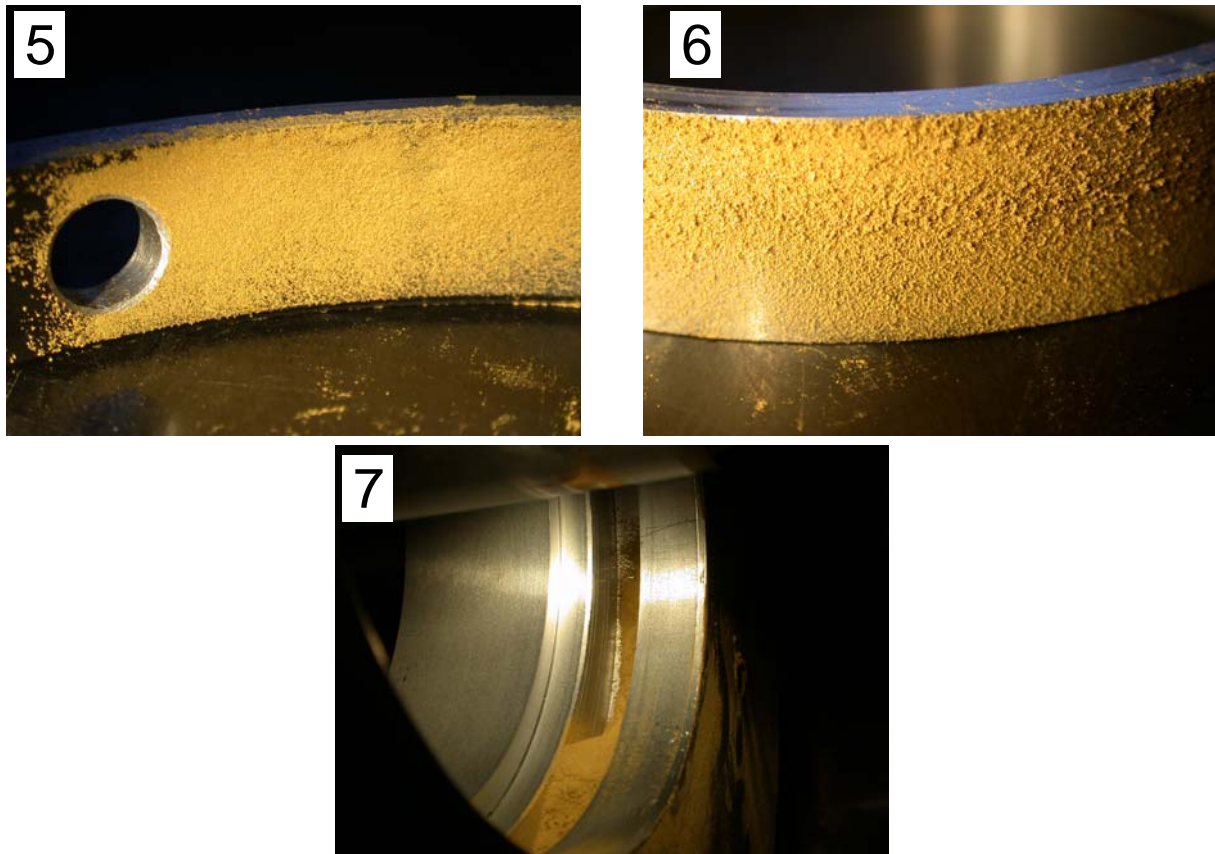


Bild 4.86 Distanzringe und Sperrlufteinleitungsnut nach Versuch mit erhöhtem Druck im Arbeitsraum

Beim Einsatz von berührungsfreien Dichtsystemen zur Spindelabdichtung z.B. im Werkzeugmaschinenbau, muss sichergestellt werden, dass es im Arbeitsraum zu keiner Druckerhöhung kommt, siehe auch Kapitel 4.2.2, Bild 4.18 auf Seite 53. Druckerhöhungen vor dem Dichtsystem der Werkzeugmaschinenspindel können durch schnelle Bewegungen der Spindel entlang der negativen z-Achse auftreten. Druckerhöhungen können auch entstehen, wenn in einer vollständig gekapselten Maschine die Achsen so angeordnet sind, dass beim Verfahren das Volumen des Arbeitsraums verändert wird. Wie hoch ein Überdruck im Arbeitsraum oder ein dynamischer Druck vor der Spindel ausfallen kann, muss durch Messungen im Einzelfall geklärt werden. Der Einfluss von Überdruck auf das berührungsfreie Dichtsystem muss bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen berücksichtigt werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuche mit handelsüblichen Dichtsystemen

In Verbindung mit Sperrluft sind gute Dichtergebnisse erzielbar. Die Anzahl sowie die Art der Spaltumlenkungen der untersuchten Dichtsysteme waren dafür geeignet, die eingedrungenen Partikel wirkungsvoll abzubremesen. Bereits bei geringen Sperrluftdrücken in der Einleitungsnut ist der Sperrluftstrom ausreichend um die Partikel wieder aus dem Spalt auszublasen - ein sicherer Dauerbetrieb ist möglich. Aufgrund der meist recht hohen Spaltweiten ist der Sperrluftbedarf recht hoch. Ein Luftstrom aus dem Arbeitsraum durch das Dichtsystem in Richtung Lagerraum ist unter allen Umständen zu verhindern. Selbst kleinste Druckerhöhungen im Arbeitsraum können zu einem schlagartigen Versagen des Dichtsystems führen.

5 Theoretische Überlegungen zur Sperrluft in Dichtsystemen

In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen, den Einfluss der Sperrluft bei der berührungsfreien Abdichtung von Partikeln zu quantifizieren oder zumindest einzuschätzen. Ziel ist es Sperrluftdichtsysteme zur Partikelabdichtung auslegen und berechnen zu können. Formeln, für den Zusammenhang, beispielsweise zwischen dem benötigten Sperrluftdruck in der Sperrlufteinleitungsnut sowie der Geschwindigkeit der anspritzenden Flüssigkeit p_F , sind aus dem Bereich der Flüssigkeitsabdichtung bereits bekannt und führen dort zu guten Ergebnissen, /13/.

Die Vorgänge die bei der Partikelabdichtung mittels Sperrluft relevant sind, fallen in den Bereich der Mehrphasenströmung. Genauer handelt es sich hierbei um eine Zweiphasenströmung in Form einer Gas-Partikel- oder Gas-Feststoff-Strömung. Die in das Dichtsystem eingeleitete Sperrluft stellt die Gasphase des Systems dar, und die verwendeten Messingpartikel stellen die dispers in der Gasphase verteilten Feststoffe dar. Derartige Strömungsvorgänge treten beispielsweise bei der pneumatischen Förderung pulverförmiger Medien in Rohrleitungen auf. Um diese Strömungsvorgänge berechnen zu können wird meist auf numerische Simulationsmethoden zurückgegriffen /4/.

Eine numerische Simulation der Mehrphasenströmung im Dichtspalt wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt. Es sollen aber dennoch an dieser Stelle die theoretischen Grundlagen zur Berechnung dargestellt werden und anhand daraus abgeleiteter, teilweise empirischer Formeln der Versuch unternommen werden, durch Betrachtung eines einzelnen Partikels weiterführende Erkenntnisse zu erlangen.

5.1 Aerodynamische- und Körperkräfte

Prinzipiell ist die Bewegung eines einzelnen Partikels das Resultat aus den an diesem Partikel angreifenden Kräften und Momenten. Ferner gilt, dass ein Partikel, welches sich in einem Strömungsgebiet bewegt, seinen momentanen Bewegungszustand nur ändert, wenn äußere Kräfte auf dieses einwirken. Diese Kräfte können z.B. aerodynamische Kräfte sein, die das Fluid, hier die Sperrluft, auf das Partikel ausübt. Des Weiteren treten Körperkräfte wie die Gravitationskraft auf. Stöße, die bei einer Kollision des Partikels mit den Spaltwänden oder mit einem anderen Partikel auftreten, haben ebenfalls eine Änderung der Bewegungsrichtung des Partikels zur Folge. Zunächst soll nur der Einfluss der aerodynamischen Kräfte und der Körperkräfte auf die Partikelbewegung betrachtet werden, /56/.

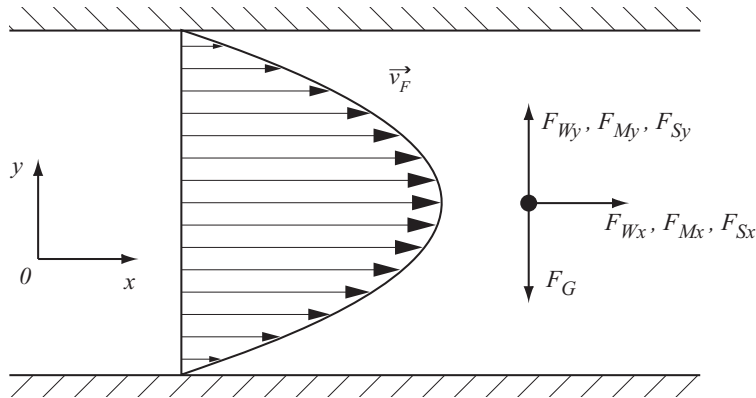


Bild 5.1 Kräftebilanz am Einzelteilchen /57/

Aus einer Kräftebilanz der an einem einzelnen Partikel wirkenden aerodynamischen- und Körperkräfte, gewinnt man die Bewegungsgleichungen, deren Lösung die Partikelgeschwindigkeit und den Partikelort liefert, siehe Bild 5.1.

Die translatorische Bewegung des Partikels wird durch die Impulsgleichung beschrieben. Für ein Partikel mit der Masse m_P lautet die Impulsgleichung, /56/:

$$I_P = m_P \frac{d\vec{v}_P}{dt} = \vec{F}_W + \vec{F}_M + \vec{F}_S + \vec{F}_G \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Hierbei ist \vec{F}_W die Widerstandskraft, \vec{F}_M die Querkraft aufgrund der Partikelrotation (Magnus-Kraft), \vec{F}_S die Querkraft durch eine Scheranströmung des Partikels (Saffman-Kraft) und \vec{F}_G die Gravitationskraft.

5.1.1 Widerstandskraft \vec{F}_W

Die aerodynamische Widerstandskraft \vec{F}_W die auf ein Partikel in einer parallelen Fluidströmung einwirkt, resultiert aus einem Reibungs- und einem Druckwiderstand. Der Reibungswiderstand wird durch die Haftbedingung an der Partikeloberfläche verursacht. Der Druckwiderstand resultiert aus einer ungleichmäßigen Druckverteilung an der Partikeloberfläche. Dabei ist der Druck, der auf die stromab gelegene Seite des Partikels wirkt, kleiner als der auf die stromauf gelegene Seite wirkende Druck. Die resultierende Druckkraft ist der Partikelbewegung entgegen gerichtet.

Die Gleichung zur Bestimmung der Widerstandskraft lautet nach /56/:

$$\vec{F}_W = \frac{\pi}{8} \rho_F d_P^2 c_W v_{rel} \vec{v}_{rel} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

wobei \vec{v}_{rel} die Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Partikel ist:

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_F - \vec{v}_P, \quad (\text{Gl. 5.3})$$

und

$$v_{rel} = \left| \vec{v}_{rel} \right| = \sqrt{(v_{F_x} - v_{P_y})^2 + (v_{F_y} - v_{P_x})^2} \quad (\text{Gl. 5.4})$$

Der zur Bestimmung von \vec{F}_W benötigte Widerstandsbeiwert c_W ist eine meistens empirisch bestimmte Größe, die von der Partikel-Reynoldszahl abhängig ist:

$$Re_p = \frac{d_p v_{rel}}{\nu_F} \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Hierin ist ν_F die kinematische Viskosität des Fluides. Zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes kann die folgende Formel zur Berechnung von c_W in Abhängigkeit von Re_p verwendet werden. Die Formel gilt zunächst nur für ein ideal kugelförmiges Partikel:

$$c_W = a Re_p^{-2} + b Re_p^{-1} + c \quad (\text{Gl. 5.6})$$

Die Werte der Parameter a , b und c sind wiederum von der Größe der Partikel-Reynoldszahl abhängig, wie in der Tabelle 5.1 angegeben. In Bild 5.2 ist die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Partikel-Reynoldszahl graphisch dargestellt.

TABELLE 5.1 Werte für die Parameter a, b und c zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes c_W , /56/

Re_p	a	b	c
$0 < Re_p < 0,1$	0	24	0
$0,1 \leq Re_p \leq 1$	0,0903	22,73	3,69
$1 \leq Re_p \leq 10$	-3,8889	29,1667	1,222
$10 \leq Re_p \leq 100$	-116,67	46,5	0,6167
$100 \leq Re_p \leq 1000$	-2778,0	98,33	0,3644
$1000 \leq Re_p \leq 5000$	-47500	148,62	0,357
$5000 \leq Re_p \leq 10000$	578700	-490,546	0,46
$10000 \leq Re_p \leq 50000$	5416700	-166,25	0,5191
$50000 \leq Re_p$	0	0	0,49

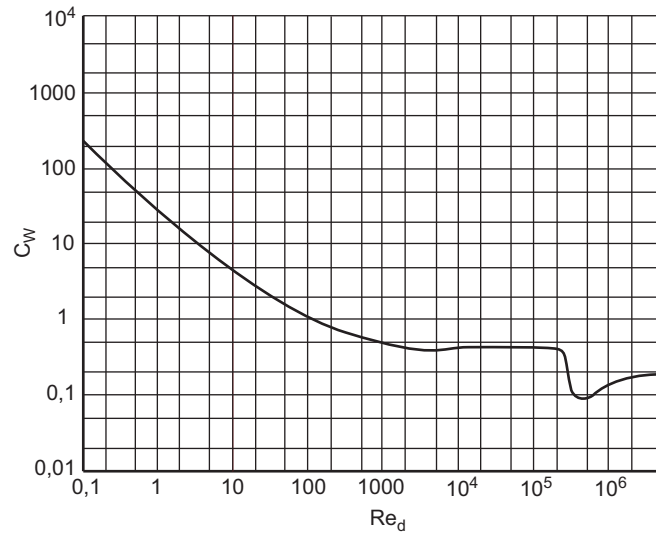


Bild 5.2 Widerstandsbeiwert einer glatten Kugel in Abhängigkeit von der Reynoldszahl /58/

Weicht die Form des Partikels von der Kugelform ab, so wird die Änderung des Widerstandsbeiwertes gegenüber der Kugel vom äquivalenten Durchmesser durch einen Korrekturfaktor ξ erfasst, /58/:

$$\vec{F}_W = \xi \frac{\pi}{8} \rho_F d_P^2 c_W v_{rel} \vec{v}_{rel} \quad (\text{Gl. 5.7})$$

Als Anhaltswerte sind in Tabelle 5.2 Richtwerte für ξ angegeben, die im Bereich $10^3 < Re_d < 10^5$ gelten und vorwiegend im freien Fall gemessen worden sind /58/.

TABELLE 5.2 Anhaltswerte für ξ im Bereich $10^3 < Re_d < 10^5$ /58/

Teilchenform	ξ	Seitenansicht	Draufsicht
Kugel	1		
Sinterkörner	1,2		
Weizen	1,5		
Oktaeder	2,4		
Würfel	3,2		
Tetraeder	4,7		
Völlige, kantige Körper (Länge : Breite : Höhe = 1 : 1 : 1)	2,5		
Längliche, kantige Körper (Länge : Breite : Höhe = 2 : 1 : 1)	3		
Plattenförmige Körper (Länge : Breite : Höhe = 10 : 5 : 1)	5		

In der Arbeit von Froschmeier /59/ werden Versuche mit Holzspänen beschrieben, für die c_W - Werte experimentell bestimmt wurden. Die dort gefundenen Werte sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Die Späne wurden nach Holzart, Spangröße und dem angewendeten spannenden Verfahren, Kreissägen, Fräsen bzw. Hobeln, unterschieden.

TABELLE 5.3 c_W -Werte verschiedener Holzspäne in Abhängigkeit von Größe und Bearbeitungsverfahren /60/

Material	Spangröße (Maschenweite des Siebs) [μm]	Mittlerer c_W - Wert der Holzspäne für:		
		Kreissägen	Fräsen	Hobeln
Buche	4000	-	-	0,305
	2000	-	-	0,577
	1000	0,448	0,879	0,680
	500	0,289	1,225	0,623
	250	0,995	1,081	0,540
Fichte	4000	-	-	0,272
	2000	-	-	0,476
	1000	0,477	0,471	0,630
	500	0,787	0,877	0,656
	250	0,740	1,493	-
Spanplatte	4000	-	-	-
	2000	-	-	-
	1000	0,775	0,582	-
	500	1,037	0,922	-
	250	1,776	0,988	-
MDF	4000	-	-	-
	2000	-	-	-
	1000	0,541	0,739	-
	500	0,742	0,502	-
	250	0,963	0,783	-

Vergleicht man die in obiger Tabelle eingetragenen c_W - Werte mit den in Bild 5.2 dargestellten, aus der Theorie für einfache Körper bekannten Werten, so stellt man fest, dass die errechneten Werte für spanförmige Partikel in der richtigen Größenordnung liegen. Nimmt man als unteren Anhaltswert den Wert für eine Kugel für den im Versuch herrschenden Reynoldszahlbereich von 5×10^3 - 7×10^4 , so entspricht dieser mit 0,47 in etwa den kleinsten errechneten Werten. Die Werte im oberen Bereich liegen in der Größenordnung der Werte einer Rechteckplatte, die je nach Seitenverhältnis Werte zwischen 1,1 und 2 annehmen kann.

5.1.2 Magnus-Kraft \vec{F}_M

Die Magnus-Kraft \vec{F}_M ist eine Querkraft, die auf ein rotierendes Partikel in einer parallelen Fluidströmung wirkt. Aufgrund der an der Partikeloberfläche geltenden Haftbedingung verändert sich das Fluidgeschwindigkeitsfeld in der Nähe des rotierenden Partikels. Auf der Seite des Partikels, die sich in Richtung der Fluidströmung bewegt, wird das Fluid beschleunigt und auf der gegenüberliegenden Seite wird es verzögert (siehe Bild 5.3). Dadurch sinkt auf der

beschleunigten Seite der Druck, wogegen er auf der verzögerten Seite ansteigt. Aus dieser Druckdifferenz resultiert eine Querkraft auf das Partikel, die senkrecht zur Richtung der Fluidströmung gerichtet ist.

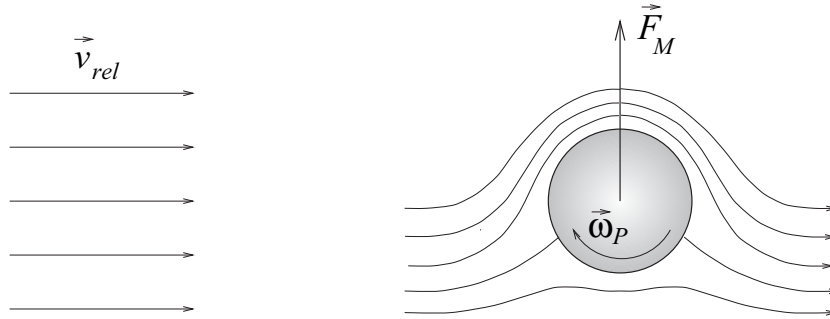


Bild 5.3 Querkraft auf ein rotierendes Partikel in einer Parallelströmung /56/

Die Gleichung zur Bestimmung der Magnus-Kraft \vec{F}_M lautet:

$$\vec{F}_M = \frac{\pi}{8} \rho_F d_P^2 c_M \frac{v_{rel}}{\omega_{rel}} (\vec{\omega}_{rel} \times \vec{v}_{rel}) \quad (\text{Gl. 5.8})$$

Hierbei ist $\vec{\omega}_{rel}$ die Rotationsgeschwindigkeit des Partikels relativ zum Fluid:

$$\vec{\omega}_{rel} = \vec{\omega}_F - \vec{\omega}_P \quad (\text{Gl. 5.9})$$

mit

$$\omega_{rel} = |\vec{\omega}_{rel}| = \sqrt{(\omega_{F_x} - \omega_{P_x})^2 + (\omega_{F_y} - \omega_{P_y})^2} \quad (\text{Gl. 5.10})$$

Die Rotation des Fluides am Partikelort ergibt sich aus:

$$\vec{\omega}_F = \nabla \times \vec{v}_F = \frac{\partial v_F}{\partial x} - \frac{\partial u_F}{\partial y} \quad (\text{Gl. 5.11})$$

Zur Bestimmung des Beiwertes der Magnus Kraft c_M wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Daraus wurden die folgenden Beziehungen abgeleitet:

$$c_M = \begin{cases} (0, 4 \pm 0, 1) \sigma_M & \text{für } \sigma_M < 1, \\ (0, 4 \pm 0, 1) & \text{für } \sigma_M \geq 1, \end{cases} \quad (\text{Gl. 5.12})$$

mit

$$\sigma_M = \frac{1}{2} \frac{d_P \omega_{rel}}{v_{rel}} \quad (\text{Gl. 5.13})$$

Wenn die Rotationsgeschwindigkeit hinreichend groß ist, kann die Magnus-Kraft die Bewegung eines Partikels signifikant beeinflussen. Solche hohen Rotationsgeschwindigkeiten sind

vor allem für Gas-Partikel-Strömungen in Kanälen und Röhren zu beobachten. Hierbei kommt es zu häufigen Partikel-Wand-Kollisionen, bei denen durch die Reibung zwischen der Partikeloberfläche und der Wand relativ große Tangentialkräfte auf die Partikeloberfläche wirken. Beim pneumatischen Transport von Partikeln mit einem Durchmesser von 0,5-1 mm in einem rechteckigen Kanal wurden Rotationsgeschwindigkeiten von 300-2000 rad/s gemessen, /56/.

5.1.3 Saffman-Kraft \vec{F}_S

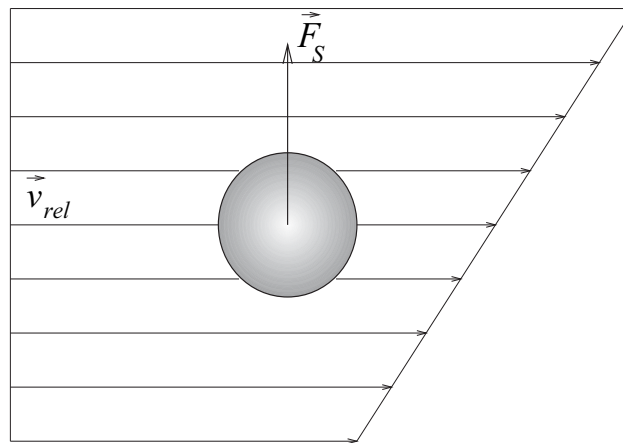


Bild 5.4 Querkraft auf ein Partikel in einer Scherströmung /56/

Die Saffman-Kraft \vec{F}_S ist eine Querkraft, die entsteht, wenn sich ein Partikel in einer Scherströmung bewegt. Betrachtet man ein ruhendes Partikel, so bedeutet dies, dass das Geschwindigkeitsfeld des Fluides am Partikelort einen Gradienten senkrecht zur Richtung der mittleren Anströmgeschwindigkeit aufweist (siehe Bild 5.4). Dadurch wird eine Seite des Partikels mit einer höheren Geschwindigkeit angeströmt als die gegenüberliegende Seite. Die Folge ist eine ungleichförmige Verteilung des Drucks an der Partikeloberfläche, woraus eine Querkraft resultiert. Diese Querkraft ist nach Saffman benannt, der eine analytische Beziehung für diese Kraft hergeleitet hat /56/:

$$F_S = 1,615 \rho_F \sqrt{v_F} d_P^2 v_{rel} \sqrt{\left| \frac{\partial u_F}{\partial y} \right|} \quad (\text{Gl. 5.14})$$

wobei $|\partial u_F / \partial y|$ der Betrag des Gradienten der Fluidströmung senkrecht zur mittleren Anströmgeschwindigkeit ist. Die Gültigkeit dieser Beziehung ist auf den Spezialfall einer unbegrenzten linearen Scherströmung beschränkt. Außerdem ist sie nur für einen kleinen Wertebereich der Partikel-Reynoldszahlen gültig, nämlich für:

$$Re_\omega \ll 1 \quad \text{und} \quad Re_P \ll \sqrt{Re_S} \quad (\text{Gl. 5.15})$$

wobei Re_ω die Reynoldszahl der Rotation:

$$Re_\omega = \frac{1}{4} \frac{d_P^2 \omega_{rel}}{v_F} \quad (\text{Gl. 5.16})$$

und Re_S die Reynoldszahl der Scherströmung ist:

$$Re_S = \frac{d_P^2 \left| \frac{\partial u_F}{\partial Y} \right|}{\nu_F} \quad (\text{Gl. 5.17})$$

Für größere Partikel-Reynoldszahlen wurden Korrekturen der Saffman-Beziehung vorgeschlagen. Zur Bestimmung der Saffman-Kraft in komplexen dreidimensionalen Strömungen kann die folgende allgemeinere Bestimmungsgleichung verwendet werden /56/:

$$\vec{F}_S = \frac{1}{4} \rho_F d_P^2 \sqrt{\nu_F} \frac{1}{\sqrt{\omega_F}} c_S (\vec{v}_{rel} \times \vec{\omega}_F), \quad c_S = 6,46 \quad (\text{Gl. 5.18})$$

5.1.4 Gravitationskraft \vec{F}_G

Die auf ein Partikel der Masse m_P wirkende Gravitationskraft \vec{F}_G wird berechnet aus:

$$\vec{F}_G = m_P \vec{g} = \frac{\pi}{6} \rho_P d_P^3 \vec{g} \quad (\text{Gl. 5.19})$$

wobei \vec{g} die Gravitationsbeschleunigung ist. Die Gravitationskraft hat insbesondere auf die Bewegung relativ großer Partikel einen signifikanten Einfluss, während bei relativ kleinen Partikeln der Einfluss der aerodynamischen Kräfte überwiegt.

Andere Kräfte wie z.B. die aus einer instationären relativen Beschleunigung des Partikels zum Fluid herrührende so genannte Basset-Kraft, oder auch die Added-Mass-Kraft, die daraus resultiert, dass das Partikel bei seiner Bewegung Fluidmasse verdrängen und beschleunigen muss, werden hier nicht berücksichtigt. Sie können wie auch der hydrostatische Auftrieb, vernachlässigt werden. Die Größe dieser Kräfte ist für die hier betrachteten Materialdichten von Partikeln und Gas mit $(\rho_P / \rho_G) \gg 1$ vernachlässigbar klein gegenüber den oben beschriebenen Kräften.

5.1.5 Bewegungsgleichung

Damit sind alle relevanten Kräfte beschrieben, die die translatorische Bewegung eines Partikels bestimmen. Setzt man die oben angegebenen Ausdrücke für die verschiedenen Kräfte in die Gleichung (5.1) ein und dividiert die Gleichung durch die Partikelmasse m_P , so erhält man die folgende Differentialgleichung für die Partikelgeschwindigkeit:

$$\frac{d \vec{v}_P}{dt} = \frac{3 \rho_F}{4 \rho_P} \frac{1}{d_P} \cdot \left[c_W \nu_{rel} \vec{v}_{rel} + c_M \frac{\nu_{rel}}{\omega_{rel}} (\vec{\omega}_{rel} \times \vec{v}_{rel}) + c_S \frac{2 \sqrt{\nu_F}}{\pi \sqrt{\omega_F}} (\vec{v}_{rel} \times \vec{\omega}_F) \right] + \vec{g} \quad (\text{Gl. 5.20})$$

Sind die Koordinaten \vec{r}_{P0} und die Geschwindigkeit \vec{v}_{P0} des Partikels zu einem Zeitpunkt t_0 bekannt, so ergibt sich die Partikelgeschwindigkeit \vec{v}_{P1} zum Zeitpunkt $t_1 = t_0 + \Delta t$ durch die numerische Lösung der Gleichung (5.20).

Nach Berechnung der neuen Partikelgeschwindigkeit \vec{v}_{P1} kann die Strecke bestimmt werden, die das Partikel während des Zeitschritts Δt zurückgelegt hat. Dazu muss die folgende Differentialgleichung gelöst werden:

$$\frac{d\vec{r}_P}{dt} = \vec{v}_P \quad (\text{Gl. 5.21})$$

Hierzu wird angenommen, dass das Partikel in dem Zeitintervall Δt gleichmäßig beschleunigt wird. In diesem Fall ergibt sich der neue Partikelort auf einfache Weise zu:

$$\vec{r}_{P1} = \vec{r}_{P0} + \frac{1}{2}(\vec{v}_{P0} + \vec{v}_{P1}) \cdot \Delta t \quad (\text{Gl. 5.22})$$

Damit ist die Berechnung der translatorischen Partikelbewegung vollständig beschrieben, soweit sie durch aerodynamische Kräfte bzw. Körperkräfte hervorgerufen wird. Der Einfluss von Partikel-Wand- und Partikel-Partikel-Kollisionen auf die Partikelbewegung wird weiter unten in separaten Abschnitten behandelt.

Die in Gleichung (5.20) hergeleitete Differentialgleichung muss für jedes Partikel innerhalb des Dichtsystems numerisch gelöst werden um anschließend den Partikelort bestimmen zu können. Eine derartige Bestimmung mittels Simulation kann sicherlich in Einzelfällen durchgeführt werden, ist aber für eine allgemeine Auslegung von Dichtsystemen und zur groben Abschätzung der Effekte nicht zwingend erforderlich.

5.1.6 Beispielrechnung

Um die einzelnen Kräfte, die an einem Partikel angreifen, quantifizieren zu können werden diese im Folgenden für einen diskreten Partikelzustand berechnet.

Ausgangspunkt soll ein Versuch mit einem offenen Ringspalt und einer Drosselspalthöhe von $h = 0,14$ mm sein, wie er auch praktisch mit einem metallischen Dichtsystem durchgeführt wurde. Die maximale Partikelgeschwindigkeit betrug $v_{max} = 22$ m/s und der Sperrluftstrom $\dot{V} = 155$ l/min. Bei dem Versuch drangen die Partikel in das Dichtsystem ein und hatten sich dann auf den Spaltwänden teilweise abgelagert, siehe Bild 5.5.

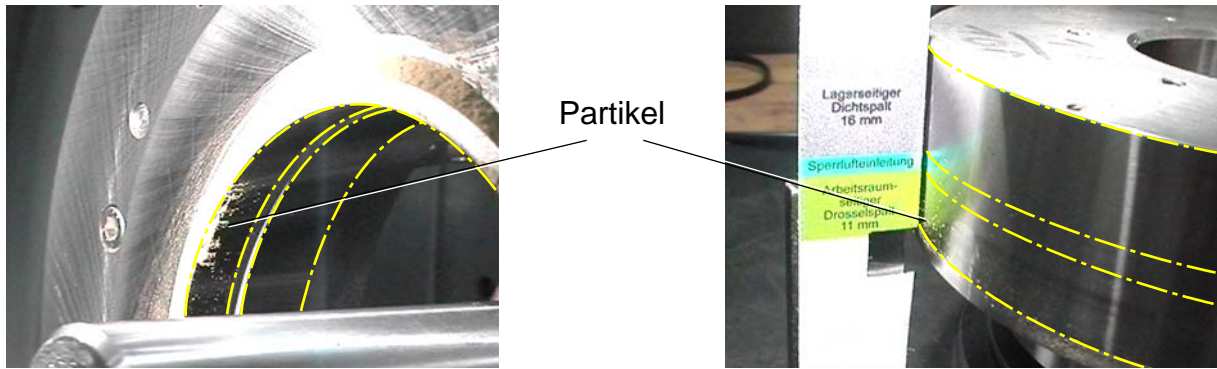


Bild 5.5 Ablagerungsgrenze, $h = 0,14 \text{ mm}$, $n = 150 \text{ min}^{-1}$, $v_{max} = 22 \text{ m/s}$, 120 min , $\dot{V} = 155 \text{ l/min}$, links Stator, rechts Welle

Für die Berechnung der aerodynamischen Kräfte die an einem exemplarischen Partikel mit angenommener Kugelgestalt angreifen, wurden die folgenden Größen als Randbedingungen angenommen, Tabelle 5.4:

TABELLE 5.4 Gegebene bzw. angenommene Größen zur Berechnung der aerodynamischen Kräfte

Größe	Symbol	Wert	Einheit
Dichte Partikel	ρ_P	8400	kg/m ³
Dichte Fluid	ρ_F	1,1881	kg/m ³
Geschwindigkeit relativ	v_0	54,868	m/s
Geschwindigkeit Partikel	v_P	22,0	m/s
Geschwindigkeit Fluid	v_F	32,868	m/s
Durchmesser Partikel	d_P	0,000045	m
kinematische Viskosität	ν	0,000001513	m ² /s
Rotationsgeschw. Partikel	ω	2000	rad/s
Formfaktor für c_W	ξ	3	--
Drosselspalt Durchmesser außen	D	0,12	m
Drosselspalthöhe	h	0,00014	m

Berechnung der Geschwindigkeit der Sperrluft

Für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Dichtsystem finden sich bei Würthner /16/ und bei Stiegler /17/ einige Hinweise und Formeln. Bei den in diesem Beispiel betrachteten zylindrischen Ringspalten ist die Berechnung trivial.

Bei der Geschwindigkeit der Sperrluft im Spalt muss zwischen dem lagerseitigen Spalt L und dem arbeitsraumseitigen Spalt A unterschieden werden. Für die Abdichtung ist lediglich der arbeitsraumseitige Spalt relevant, da nur hier die Sperrluftströmung der Partikelflugrichtung entgegengerichtet ist.

$$\dot{V} = \dot{V}_A + \dot{V}_L \quad (\text{Gl. 5.23})$$

Der Gesamtvolumenstrom teilt sich in die Teilströme durch die beiden Drosselspalte auf. Hierbei sind die Anteile umgekehrt proportional zu den Spaltlängen l :

$$\frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_L} = \frac{l_L}{l_A} \quad (\text{Gl. 5.24})$$

Daraus folgt für den arbeitsraumseitigen Sperrluftstrom \dot{V}_A :

$$\dot{V}_A = \dot{V} \cdot \left(\frac{\left(\frac{l_L}{l_A} \right)}{1 + \left(\frac{l_L}{l_A} \right)} \right) \quad (\text{Gl. 5.25})$$

Mit den gegebenen Größen ergibt sich der Sperrluftstrom durch den arbeitsraumseitigen Drosselspalt zu:

$$\dot{V}_A = 1,72 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Gl. 5.26})$$

Um die Geschwindigkeit der Sperrluft berechnen zu können muss als nächstes die Spaltfläche A bestimmt werden, durch die die Sperrluft ausströmt:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2 \cdot h)^2) \quad (\text{Gl. 5.27})$$

In Zahlen ergibt sich die Spaltfläche A zu:

$$A = 5,24 \times 10^{-5} \text{m}^2 \quad (\text{Gl. 5.28})$$

Aus diesen beiden Werten ergibt sich schließlich gemäß

$$\dot{V}_A = v_{F_A} \cdot A \quad (\text{Gl. 5.29})$$

beziehungsweise umgeformt

$$v_{F_A} = \frac{\dot{V}_A}{A} \quad (\text{Gl. 5.30})$$

der Wert für die Geschwindigkeit der Sperrluft zu:

$$v_{F_A} = 32,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Gl. 5.31})$$

Die Relativgeschwindigkeit v_{rel} zum Zeitpunkt Null ergibt sich gemäß Gleichung (5.3) zu:

$$v_{rel_0} = 54,86 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Gl. 5.32})$$

Für die oben dargestellten vier aerodynamischen- und Körperkräfte ergeben sich folgende Zahlenwerte:

TABELLE 5.5 Werte für die an einem beispielhaften Partikel angreifenden aerodynamischen- und Körperkräfte

Impuls / Kraft				Gleichung
Impuls Partikel	I_P	$2,20 \times 10^{-8}$	N	(5.1)
Widerstandskraft	F_W	$4,73 \times 10^{-4}$	N	(5.2)
Querkraft (Magnus-Kraft)	F_M	$8,50 \times 10^{-15}$	N	(5.8)
Querkraft (Saffman-Kraft)	F_S	$2,73 \times 10^{-8}$	N	(5.14)
Gravitationskraft	F_G	$3,93 \times 10^{-9}$	N	(5.19)

Aus obiger Tabelle ist zu ersehen, dass die weitaus größte Kraftkomponente, die an einem derartigen Partikel angreift, die Widerstandskraft F_W ist. Sie ist um vier Zehnerpotenzen höher als die nächst kleinere Kraft. Eine Änderung der Bewegungsrichtung die ein Partikel aufgrund von aerodynamischen oder Körperkräften innerhalb eines berührungsfreien Dichtsystems erfährt ist demnach geprägt vom Strömungswiderstand. Auf den Strömungswiderstand und seinen Einfluss auf das Partikel wird daher im nächsten Abschnitt noch weiter eingegangen. Die anderen, oben berechneten Kräfte werden hier nicht weiter betrachtet.

5.1.7 Geradlinig verzögerte Bewegung

Für die überschlägige Berechnung des Bremsweges eines Partikels, welches nur durch die oben genannten aerodynamischen Kräfte abgebremst wird, schlägt Vollheim /58/ eine vereinfachte Formel vor. Es wird davon ausgegangen, dass ein Partikel mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 in eine Gasströmung geschossen wird und dieses dann nach einer bestimmten Wegstrecke l_{Br} zur Ruhe kommt, Bild 5.6. Der Schwerkräfteinfluss soll bei dieser Betrachtung unberücksichtigt bleiben.

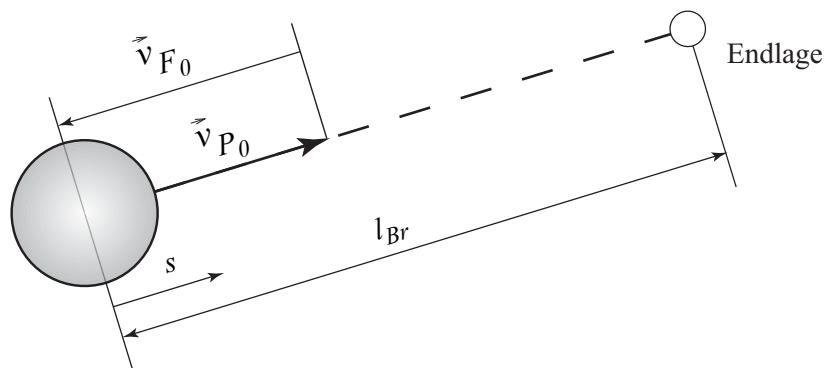


Bild 5.6 Bremsweg l_{Br} eines Teilchens mit der Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_{P_0} /58/

Vollheim gibt folgende Formel zur Berechnung des Bremsweges l_{Br} eines Partikels an, /58/.

$$l_{Br} = d_P \frac{Ba_0}{\frac{3}{4} c_{w_0} \frac{\rho_F}{\rho_P}} \quad (\text{Gl. 5.33})$$

Die Bahrzahl Ba_0 ist in Bild 5.7 als Funktion der Partikelreynoldszahl Re_{d0} zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ dargestellt.

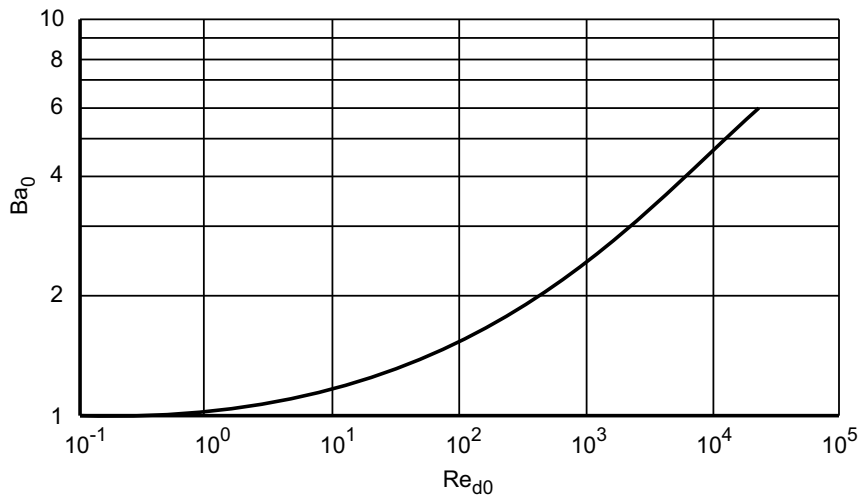


Bild 5.7 Ähnlichkeitskennzahl Ba_0 für die Teilchenabbremmung im Gas /58/

Gemäß dieser Formel ergibt sich ein theoretischer Bremsweg von $l_{Br} = 2,88$ m. Im Diagramm in Bild 5.8 ist der Bremsweg l_{Br} in Abhängigkeit von der Partikelgröße dargestellt.

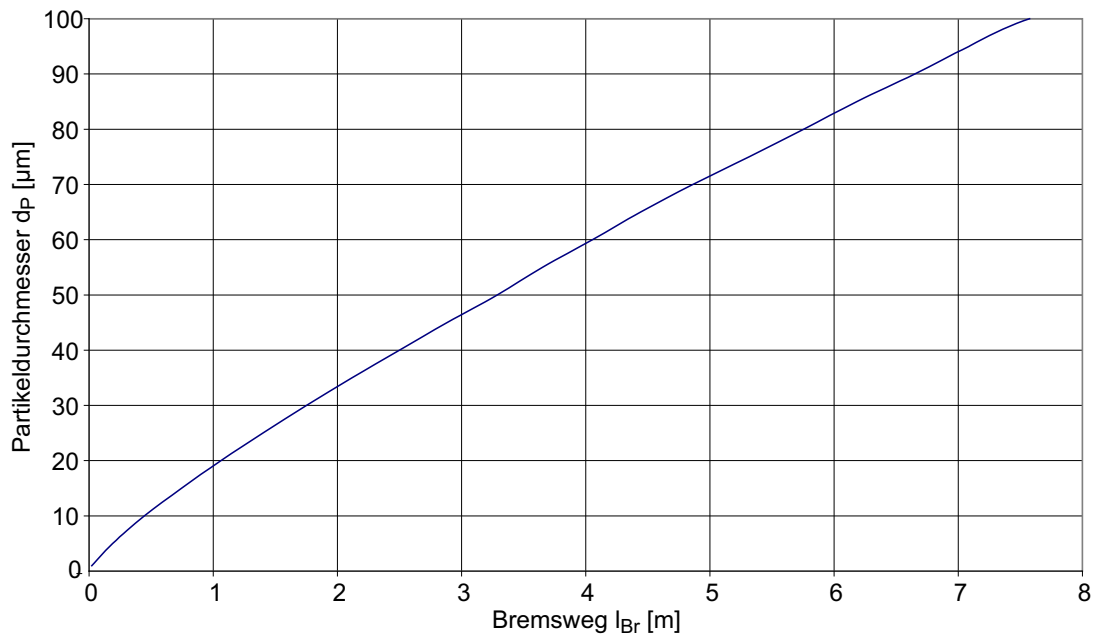


Bild 5.8 Bremsweg eines Partikels in einer Luftströmung in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser

Gemäß dieser Berechnung müsste das Dichtsystem eine Länge von 2,88 m aufweisen um die eingedrungenen Partikel allein mit Hilfe des Strömungswiderstandes aufgrund der Sperrluft von $v_P = 22$ m/s auf $v_P = 0$ m/s abzubremesen. Der bei diesen Versuchen realisierte lagerseitige Drosselspalt hatte lediglich eine Länge von 0,008 m.

Die unzureichende Dichtwirkung eines glatten, zylindrischen Drosselspaltes für die Partikelabdichtung wurde auch bereits bei den Versuchen in Kapitel 4.4.2 beschrieben.

Ein Dichtmechanismus für die Partikelabdichtung kann somit nicht auf der abdichtenden Wirkung von Sperrluft alleine basieren.

5.2 Gleichungen für die Partikelrotation

Wie bereits oben dargestellt wurde, kann die Rotation eines Partikels einen großen Einfluss auf die Bewegung des Partikels in einem Fluid haben. So sind z.B. die Größe der Magnus-Kraft und die der Saffman-Kraft u.a. abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit des Partikels. Der Drehimpuls eines rotierenden Partikels ändert sich, wenn an dem Partikel Momente angreifen. Dieser Zusammenhang wird durch die Drehimpulsgleichung ausgedrückt:

$$I_P \frac{d\vec{\omega}_P}{dt} = \sum_i \vec{T}_i \quad (\text{Gl. 5.34})$$

Hierbei ist I_P das Trägheitsmoment des Partikels:

$$I_P = \frac{1}{10} m_P d_P^2 = \frac{\pi}{60} \rho_P d_P^5 \quad (\text{Gl. 5.35})$$

und $\sum_i \vec{T}_i$ ist die Summe der an dem Partikel angreifenden Momente. Diese Momente können z.B. aerodynamischer Natur sein, d.h. durch die Reibung zwischen der Partikeloberfläche und dem umgebenden Fluid entstehen.

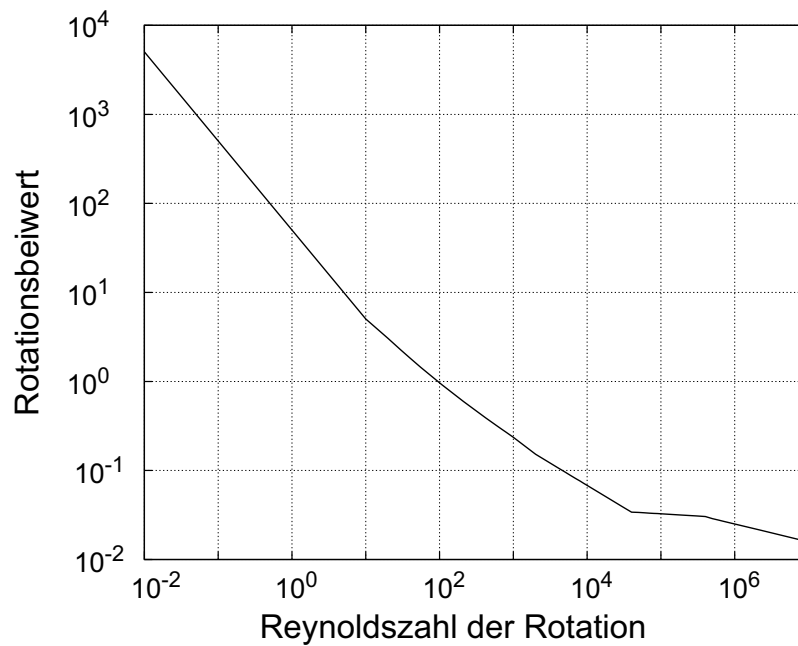
Das vom Fluid auf das Partikel ausgeübte Moment kann in folgender Weise bestimmt werden:

$$\vec{T} = \frac{\rho_F}{2} \left(\frac{d_P}{2} \right)^5 c_{\omega} \omega_{rel} \vec{\omega}_{rel} \quad (\text{Gl. 5.36})$$

Die Größe des in dieser Gleichung verwendeten Rotationsbeiwertes c_{ω} ist abhängig von der Reynoldszahl der Rotation Re_{ω} . Diese Abhängigkeit ist in der Tabelle 5.6 angegeben sowie im Bild 5.9 graphisch dargestellt. Neben den aerodynamischen Kräften treten bei Kollisionen mit Wänden oder anderen Partikeln tangentielle Kräfte auf, die ein Moment bezüglich des Partikelmittelpunktes hervorrufen. Die Wirkung dieser Kräfte wird im nächsten Kapitel beschrieben.

TABELLE 5.6 Abhängigkeit des Rotationsbeiwertes von der Reynoldszahl der Rotation

Re_ω	c_ω
$0 < Re_\omega \leq 10$	$\frac{16\pi}{Re_\omega}$
$10 < Re_\omega \leq 1000$	$\frac{6,45}{\sqrt{Re_\omega}} + \frac{32,1}{Re_\omega}$
$1000 < Re_\omega \leq 40000$	$\frac{6,8}{\sqrt{Re_\omega}}$
$40000 < Re_\omega \leq 400000$	$\frac{0,058}{20\sqrt{Re_\omega}}$
$400000 < Re_\omega \leq 10^7$	$\frac{0,397}{5\sqrt{Re_\omega}}$

**Bild 5.9** Verlauf des Rotationsbeiwertes c_ω in Abhängigkeit von der Reynoldszahl der Rotation Re_ω

Nach Einsetzen der Gleichungen (5.35) und (5.36) in die Gleichung (5.34) und Division durch I_P ergibt sich die Differentialgleichung für die Rotationsgeschwindigkeit des Partikels zu:

$$\frac{d}{dt} \vec{\omega}_P = \frac{15 \rho_F}{16\pi \rho_P} c_\omega \omega_{rel} \vec{\omega}_{rel} \quad (\text{Gl. 5.37})$$

Diese Differentialgleichung muss numerisch gelöst werden. Im Unterschied zur Berechnung der translatorischen Bewegung braucht hier keine weitere Integration zur Bestimmung des Winkels, um den sich das Partikel während des Zeitschritts Δt gedreht hat, zu erfolgen. Dieser Winkel ist hier nicht von Interesse da die Partikel als kugelförmig angenommen werden.

5.3 Partikel-Wand-Kollisionen

Die Strömungen im Dichtsystem werden von festen Wänden begrenzt. Betrachtet man Gas-Partikel-Strömungen, so hat die Wechselwirkung der Partikel mit den Wänden einen großen Einfluss auf das Strömungsverhalten. Dies gilt insbesondere für relativ große Partikel, die aufgrund ihrer Massenträgheit verhältnismäßig langsam auf Änderungen im Geschwindigkeitsfeld des Gases reagieren und daher oft mit den Wänden kollidieren. Ein besonders wichtiger Parameter bei den Partikel-Wand-Kollisionen ist die Wandrauhigkeit, die aus dem Herstellungsprozess des Wandbauteils herrührt. Die Abmessungen der Unebenheiten der Wand können in derselben Größenordnung wie der Partikeldurchmesser liegen. Dies hat zur Folge, dass ein Partikel, das mit der Wand kollidiert, lokal eine andere Wandneigung antrifft, als es bei einer ideal glatten Wand der Fall wäre, vgl. Bild 5.10.

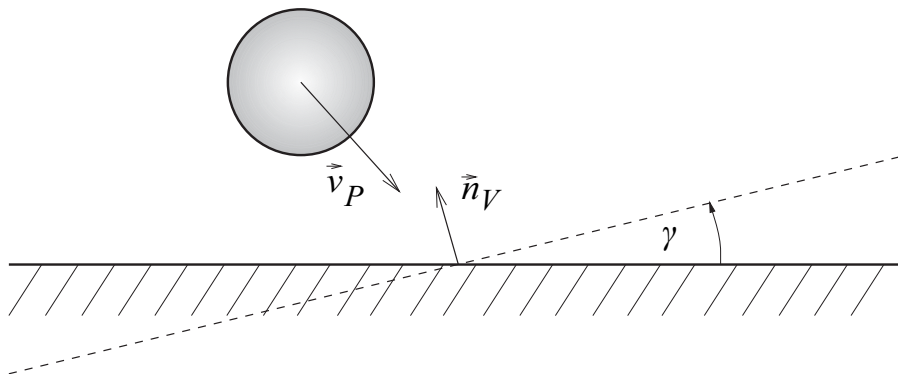


Bild 5.10 Stoß des Partikels mit einer ideal ebenen Wand

Tatsächlich stößt das Partikel mit einer realen Wand zusammen, die gegenüber der mittleren Wandebene um einen Winkel γ angestellt ist, (siehe Bild 5.11). Der Inklinationswinkel γ ist eine Zufallsgröße, die aus einer Gaußverteilung mit dem Mittelwert $\gamma = 0$ und der Standardabweichung $\Delta\gamma$ bestimmt wird. Die Größe der Standardabweichung ist von den Rauigkeitsparametern der Wand und dem Durchmesser des auftretenden Partikels abhängig. Wie man anhand von Bild 5.11 und Bild 5.12 sieht, ist der Stoßwinkel für kleine Partikel in der Regel größer als für große Partikel.

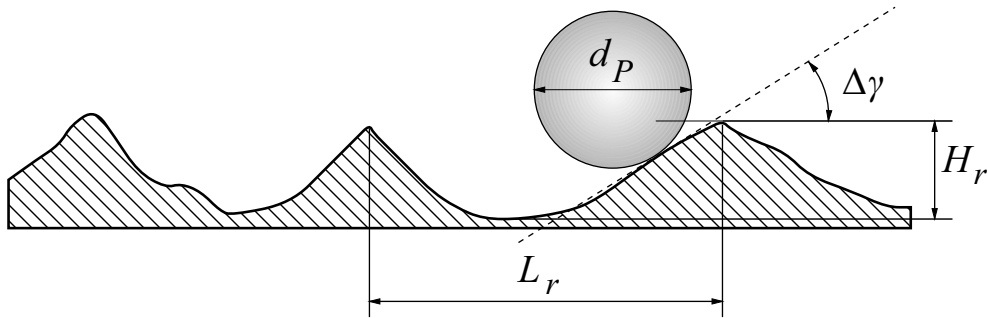


Bild 5.11 Rauigkeitswinkel $\Delta\gamma$ für kleine Partikel

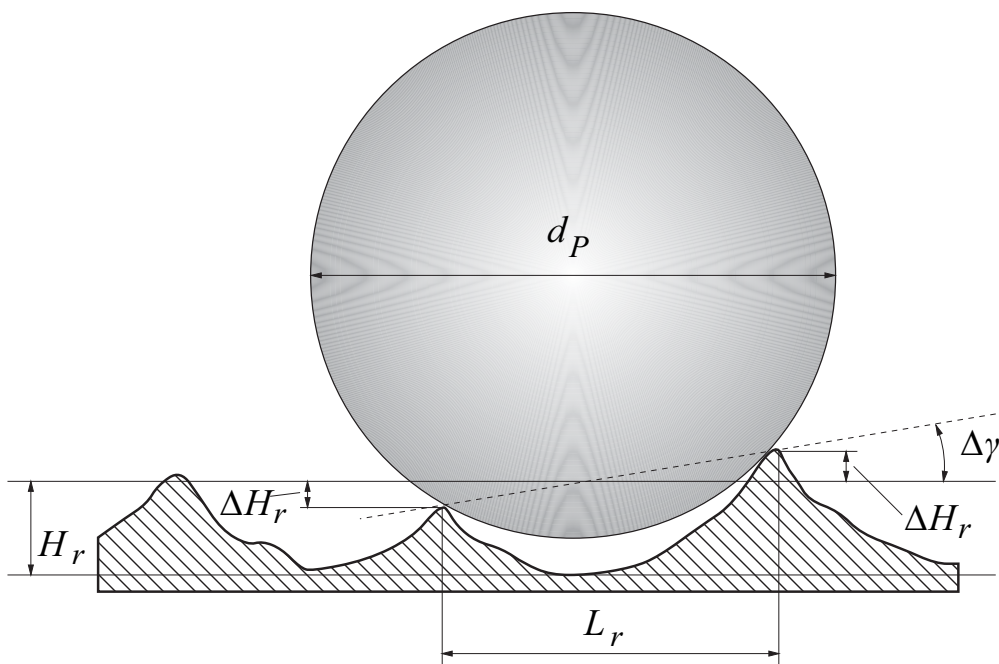


Bild 5.12 Rauigkeitswinkel $\Delta\gamma$ für große Partikel

Partikel deren Durchmesser deutlich kleiner als der Abstand L_r zwischen zwei Rauigkeitsspitzen ist, stoßen überwiegend mit den Flanken der Rauigkeitserhebungen zusammen. Dagegen stoßen wesentlich größere Partikel hauptsächlich gegen die Spitzen der Rauigkeitserhebungen.

Die Translations- und Rotationsgeschwindigkeit des Partikels nach dem Wandstoß ergeben sich aus den Impuls- bzw. Drehimpulsgleichungen. Die Berechnung des Stoßvorgangs erfolgt in einem wandorientierten Koordinatensystem. Die y-Achse des Koordinatensystems ist hierbei identisch mit dem nach innen gerichteten Normalenvektor der virtuellen Wand. In Bild 5.13 ist eine solche Stoßkonfiguration mit den im Folgenden verwendeten Bezeichnungen dargestellt.

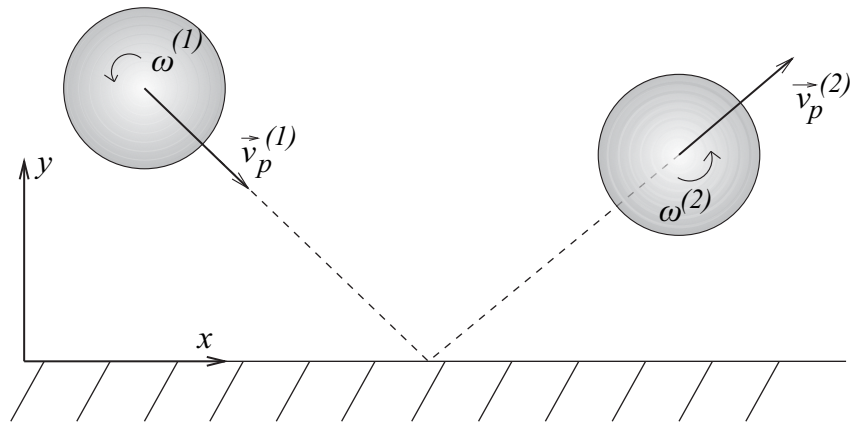


Bild 5.13 Beziehungen zur Berechnung des Partikel-Wand-Stoßes

Man kann zwei verschiedene Arten von Wandstößen unterscheiden, den Gleitstoß und den Haftstoß. Im ersten Fall gleitet das Partikel während des gesamten Stoßvorgangs an der Wand entlang. Im zweiten Fall kommt das Gleiten vor dem Ende des Stoßvorgangs zum Erliegen. Die Beziehungen zwischen den Größen vor und nach dem Stoß lauten für diese beiden Fälle:

1. Gleitstoß für $-\frac{2}{7f_\omega(e_\omega + 1)} \leq \frac{v_P^{(1)}}{|v_r|} \leq 0$:

$$u_P^{(2)} = u_P^{(1)} + (f_\omega e_\omega + 1)v_P^{(1)},$$

$$v_P^{(2)} = -e_\omega v_P^{(1)},$$

$$\omega^{(2)} = \omega^{(1)} + \frac{5}{d_P} f_\omega (e_\omega + 1) v_P^{(1)} \quad (\text{Gl. 5.38})$$

2. Haftstoß für $\frac{v_P^{(1)}}{|v_r|} < -\frac{2}{7f_\omega(e_\omega + 1)}$:

$$u_P^{(2)} = \frac{5}{7} \left(u_P^{(1)} - \frac{d_P}{5} \omega^{(1)} \right),$$

$$v_P^{(2)} = -e_\omega v_P^{(1)},$$

$$\omega^{(2)} = -\frac{2}{d_P} u_P^{(1)}, \quad (\text{Gl. 5.39})$$

mit

$$v_r = u_P^{(1)} + \frac{d_P}{2} \omega^{(1)}. \quad (\text{Gl. 5.40})$$

Das Superskript ⁽¹⁾ bezeichnet hierbei jeweils Größen vor dem Stoß und das Superskript ⁽²⁾ bezeichnet Größen nach dem Stoß. Der Parameter f_{ω} ist der Gleitreibungsbeiwert und e_{ω} die Stoßzahl für die aktuelle Materialpaarung von Partikel und Wand, und die Größe v_r ist die Relativgeschwindigkeit zwischen der Partikeloberfläche und der Wand am Punkt des Wandkontaktes.

In Bild 5.14 ist ein Messprotokoll der Rauigkeit der Oberfläche einer der Versuchswellen dargestellt. Die Rauigkeitskennwerte für R_z liegen bei $2,6 \mu\text{m}$. Die Rauigkeitserhebungen sind damit in etwa um den Faktor Zehn kleiner als der mittlere Durchmesser der Versuchspartikel. Der Einfluss der Wandrauigkeit auf den Auftreffwinkel der Partikel ist demnach gering.

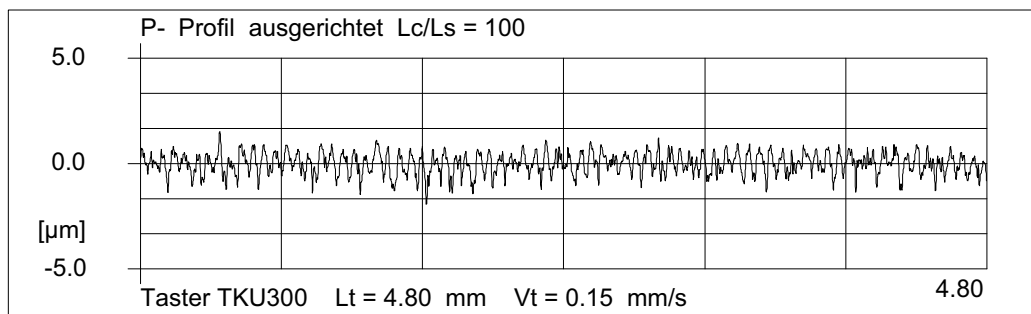


Bild 5.14 Messschrieb der Oberflächenrauigkeit einer Versuchswelle

In Bild 5.15 sind die Bewegungsbahnen für ein Partikel im Drosselspalt nach Gleichung (5.38) - (5.40) berechnet. Der Auftreffwinkel für den ersten Partikel-Wand-Stoß wurde mit 2° , 10° bzw. 20° angenommen. Vor dem ersten Stoß wurde die Eigenrotation des Partikels zu null gesetzt.

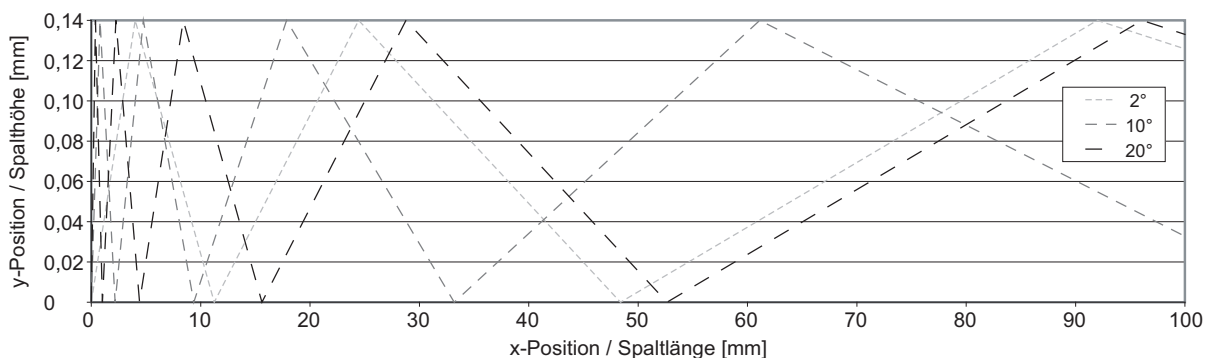


Bild 5.15 Partikelbewegung bei Partikel-Wand-Kollisionen

Es ist zu erkennen, dass sich die Flugbahn der Partikel mit zunehmender Anzahl der Partikel-Wand-Stöße mehr und mehr abflacht. Die Häufigkeit der Wandkontakte nimmt über der zurückgelegten Strecke ab, vgl. Bild 5.15.

Für nicht kugelförmige Partikel geben Frank /57/ und Kussin /61/ chaotische Bewegungsbahnen für die Partikel an. Dies ist darin begründet, dass die Partikel aufgrund ihrer unrunder

Form bei Eigenrotation unter völlig undefiniertem Winkel auf die Wand auftreffen, vgl. Bild 5.16

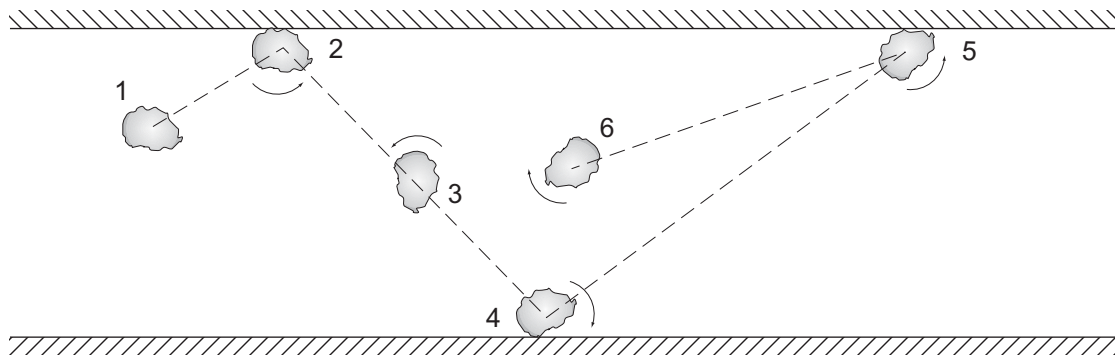


Bild 5.16 Lage eines nicht kugelförmigen Teilchens bezüglich einer glatten Wand /57/ und /61/

Bedeutung der Partikel-Partikel-Kollisionen

Der Einfluss, den die Partikel-Partikel-Kollisionen auf das Verhalten einer mehrphasigen Strömung haben, wurde in der Vergangenheit von verschiedenen Autoren untersucht, /56/. Hierbei kamen unterschiedliche Materialien und Partikelgrößen zum Einsatz. Allen gemeinsam ist, dass der Einfluss der Partikel-Partikel-Stöße auf das gesamte Strömungsverhalten in erster Linie von der Anzahldichte n_p der Partikel abhängt. Die Anzahldichte n_p beschreibt die Anzahl der Partikel, die sich in einem Einheitsvolumen des Gas-Feststoff-Gemisches befinden.

Bei einer geringen Anzahldichte n_p ist der Einfluss der Partikelstöße auf die Gesamtströmung äußerst gering, da Partikelstöße nur sehr selten auftreten. Bei höheren Anzahldichten wird von einer Homogenisierung der Partikelverteilung über den Strömungsquerschnitt berichtet.

In der Arbeit von Wassen /56/ wird die Berechnung der Partikelbewegungen zweier Partikel vor und nach einem Stoß beschrieben. Auf eine Darstellung der Berechnung soll an dieser Stelle verzichtet werden, da sie für die Auslegung eines Dichtsystems hier nicht zielführend ist, zumal die tatsächlichen Randbedingungen und Späneformen nicht bekannt sind und der Einfluss der Partikel-Partikel-Stöße nicht unmittelbar zu einer Abbremsung oder Ablagerung der Partikel beiträgt.

5.4 Zusammenfassung der Gas-Partikel-Strömungen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Berechnungsansätze für Gas-Partikel-Strömungen sind zur Auslegung und Berechnung von Dichtsystemen nicht ohne weiteres anwendbar. Die dazu notwendigen Gleichungssysteme müssen numerisch gelöst werden. Hierzu sind zusätzlich noch Kenntnisse über die exakte Spanform und Spangeschwindigkeit erforderlich, die für die wenigsten Anwendungsfälle bekannt sein dürften.

Die angegebene Formel (5.33) zur Berechnung des Bremsweges eines Partikels zeigt, dass die abbremsende Wirkung der Sperrluft nicht ausreichend ist. Zur Abbremsung von Partikeln im Dichtspalt sind demnach Partikel-Wand-Stöße notwendig. Je senkrechter ein Partikel auf eine

Wand trifft, desto größer ist die abbremsende Wirkung des Stoßes. Die so abgebremsten Partikel müssen im Weiteren wieder aus dem Dichtspalt gefördert werden um ein Zusetzen der Dichtspalte zu verhindern. Dieses Ausblasen von Partikeln aus dem Dichtspalt wird im nächsten Abschnitt untersucht.

5.5 Ausblasen von Partikeln

Die Partikel die im Inneren des Dichtsystems durch Stoßvorgänge abgebremst wurden, fallen dort zunächst einmal herunter und kommen auf irgendeiner Wandfläche zum liegen. Um die Partikel anschließend ausblasen zu können ist ein Sperrluftstrom notwendig. Dieser Sperrluftstrom muss groß genug sein die herrschenden Kräfte zwischen Partikel und Wand zu überwinden. Diese Kräfte sind Gegenstand der nächsten Abschnitte der Arbeit.

5.5.1 Haftkräfte horizontal und tangential

Haftkräfte, die zu den interatomaren und intermolekularen Kräften gehören, spielen in verschiedenen Prozessen wie Agglomeration, Zerkleinerung, Feststofftransport, Abscheidung und bei der Reinigung eine entscheidende Rolle. Bild 5.17 zeigt ein Beispiel für die Größe der Haftkräfte zwischen Materialien. Die beiden aneinanderhaftenden Glaskugeln mit einem Durchmesser von etwa $20\ \mu\text{m}$ in der Mitte des Bildes stellen ein stabiles System in dieser Mikrowelt dar. In der Makrowelt könnte ein derartiges System nicht stabil existieren, da die Gewichtskraft des rechten Partikels über den Hebelarm zu einem „Umkippen“ führen würde. Bei Partikeln mit einem Durchmesser größer als $100\ \mu\text{m}$ dominiert bei einer großen Dichtedifferenz zwischen Partikel und umgebendem Fluid die Gewichtskraft. Reduziert sich der Durchmesser der Partikel, nimmt der Einfluss der Gewichtskraft in der dritten Potenz des Partikeldurchmessers ab. Die Anziehungskräfte zwischen den Stoffen nehmen bei geringen Abständen in der ersten bis zweiten Potenz des Partikeldurchmessers zu. So hat beispielsweise ein Partikel mit $1\ \mu\text{m}$ Durchmesser eine um 10^6 höhere Anziehungskraft als die Gewichtskraft des Partikels /62/.

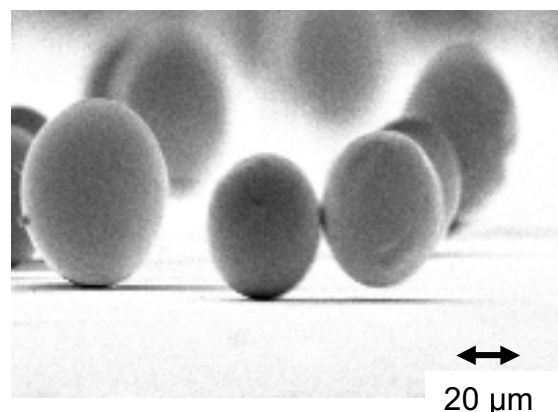


Bild 5.17 Haftkräfte zwischen zwei Glaskugeln /62/

Prinzipiell läuft die Anhaftung von Partikeln an Oberflächen (Adhäsionskinetik) immer nach dem gleichen Schema ab:

1. Annäherung des Partikels an die Oberfläche durch z.B. „Long Range Forces“.
2. Erster Kontakt von Partikel und Oberfläche im atomaren Bereich.
3. Kräfte zwischen den Haftpartnern bringen das Partikel v.a. bei rauen Oberflächen in eine Lage, die mehr Kontaktpunkte aufweist und somit stabiler ist.
4. Durch intermolekulare Kräfte im Kontaktbereich steigt die Kontaktfläche. Dies geschieht solange, bis die Haftkräfte und die Widerstandskräfte gegen die Deformation in einem Gleichgewicht sind. Durch elastische und / oder inelastische Verformung des Partikels und der Oberfläche bildet sich eine Kontaktfläche definierter Größe aus.

5.5.2 Theorie der van der Waals Kraft

Wenn Atome bzw. Moleküle aufeinander wirken, sind van der Waals Haftkräfte vorhanden. Die intermolekulare Anziehung von Atomen bzw. Molekülen wird durch intramolekulare Vorgänge bewirkt. Ein Atom kann als ein Aufenthaltswahrscheinlichkeitsraum des Atomkerns und der Elektronen gesehen werden. Nur wenn der Schwerpunkt des Atomkerns exakt mit dem Schwerpunkt der Elektronenhülle übereinstimmen würde, wäre das Atom neutral. In der Quantentheorie sind jedoch exakte Orte nicht definiert (Heisenberg'sche Unschärferelation). Ein Atom ist deshalb nur im Gedankenexperiment neutral. Real handelt es sich um einen fluktuierenden Dipol. Durch die Ausbildung dieses zeitlich veränderlichen Dipols kommt es bei genügend kleinem Abstand zu einer Anziehung zweier benachbarter Teilchen. Ist die van der Waals Kraft groß genug, haften die Partikel. Die Größe der van der Waals Haftkraft wird durch die Materialien der Haftpartner, den Partikeldurchmesser, den Abstand Partikel-Oberfläche und das Zwischenmedium bestimmt /62/.

5.5.3 Grundlagen zur Kapillarkraft

Kapillarkräfte treten auf, wenn sich Flüssigkeit, wie z.B. Öl aus der Minimalmengenschmierung, zwischen zwei Festkörperoberflächen befindet (Dreiphasenkontakt). Die Kräfte werden zwischen hydrophilen Oberflächen aufgrund des Laplace Druckunterschiedes zwischen dem Flüssigkeitsinneren und dem umgebenden Fluid sowie der Oberflächenspannung der Flüssigkeit wirksam. Das Partikel haftet auf der Oberfläche durch den entstandenen kapillaren Unterdruck. Aufgrund der Oberflächenspannung gibt es eine Anziehungskraft zwischen benetzten Partikeln, die die Partikel zusammenhalten kann /62/, /63/.

Bei trockenen Partikeln können ebenfalls Kapillarkräfte auftreten. Wesentliche Ursache für das Auftreten von Kapillarkräften in Luft ist das in der Lücke zwischen haftendem Partikel und Oberfläche kondensierende Wasser. Das Ausmaß der Flüssigkeitskondensation wird dabei von der Geometrie sowie von Materialeigenschaften der beteiligten Haftpartner und der relativen Luftfeuchte beeinflusst. Erst ab einer relativen Luftfeuchte von etwa 65 % ist die Ausbildung einer „wirkenden“ Wasserkapillare (Bild 5.18) zu beobachten, /62/.

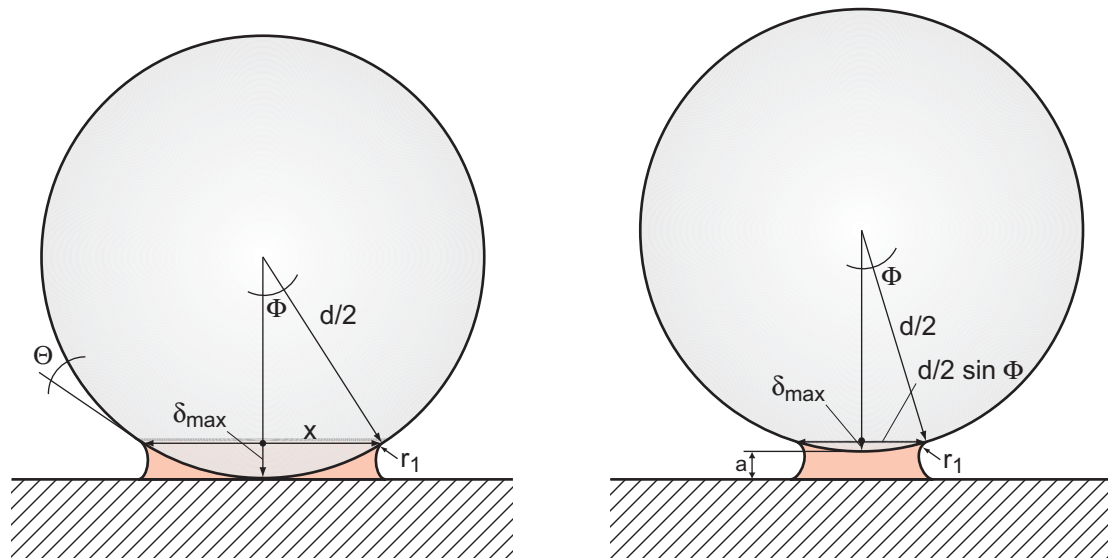


Bild 5.18 Schematische Darstellung eines über Kapillaren haftenden Partikels auf einer glatten Oberfläche /62/, /63/

5.5.4 Grundlagen der elektrostatischen Kraft

Die elektrostatischen Kräfte lassen sich in zwei Phänomene aufteilen: Wechselwirkung durch Elektronenaustrittsarbeit und Wechselwirkung durch Oberflächenadsorption.

Grundlagen der Elektronenaustrittsarbeit

Materialien der beiden Kontaktpartner (Isolatoren oder Leiter) weisen jeweils eine material-spezifische Elektronenaustrittsarbeit auf. Elektronenaustrittsarbeit ist als die Arbeit definiert, die benötigt wird, um ein Elektron von der Oberfläche ins Unendliche zu transportieren. Ist die Austrittsarbeit klein, ist eine leichte Elektronenabgabe möglich. Wurde ein Elektron herausgelöst, ist es für ein weiteres Elektron schwerer, das Material zu verlassen. Durch die entstehende gegenpolige Ladung kommt es zu einer Anziehung. Da sich bei elektrischen Leitern die Ladungen im Kontaktbereich konzentrieren, ist die elektrostatische Wechselwirkung größer als bei Isolatoren.

Elektrostatische Haftung durch Oberflächenadsorption

Die Elektrostatik durch Oberflächenadsorption ist im trockenen System aufgrund von Oberflächenadsorption für die hier betrachteten Fälle kaum relevant. Die an der Oberfläche adsorbieren Ionen / Ladungen werden durch die hohe Beweglichkeit der Gegenionen im umgebenden Gas ausgeglichen. Im Gegensatz dazu kann sich in flüssiger ionenhaltiger Umgebung ein Abstoßungspotential entwickeln. In flüssiger Umgebung (Wasser bei $\text{pH} = 7$) sind Feststoffteilchen meist negativ geladen. Somit können hier die elektrostatischen Kräfte einer Adhäsion entgegenwirken, /64/.

Einen Eindruck von der Stärke dieser drei eben beschriebenen Kräfte vermittelt Bild 5.19. Hier ist das Verhältnis von Haftkraft zu Gravitationskraft der einzelnen Kraftkomponenten in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser angegeben.

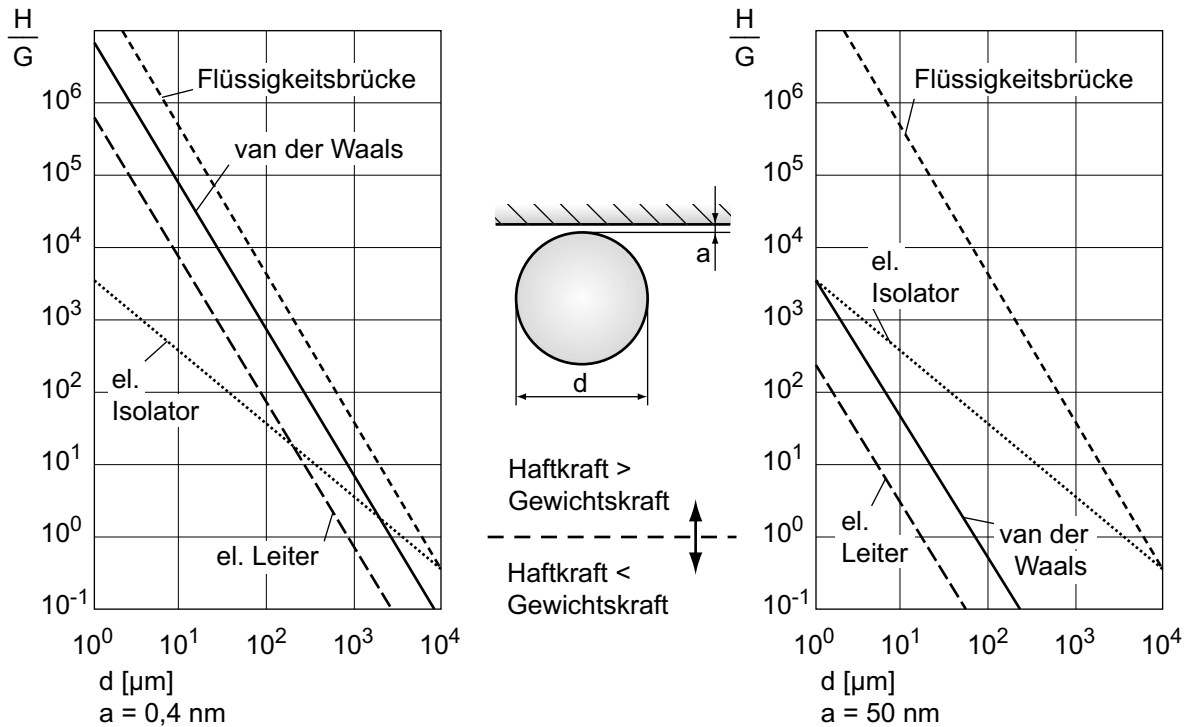


Bild 5.19 Vergleich von Haftkraft H und Gewichtskraft G in Abhängigkeit von der Partikelgröße d für die Fälle $a = 0,4\text{nm}$ und $a = 50\text{nm}$ /64/

Betrachtet man Partikel mit einem Durchmesser von $45 \mu\text{m}$, so ist festzustellen, dass selbst bei einem Abstand des Partikels zur Oberfläche von $a = 50 \text{ nm}$ (Bild 5.19 rechts) die van der Waals Kräfte um den Faktor Zehn größer sind als die Gravitationskraft. Kommt es zu einer Ausbildung von Flüssigkeitsbrücken bzw. zur Ausbildung von Kapillarkräften aufgrund der MMS-Beaufschlagung, so liegen diese Kräfte um den Faktor 10.000 über den Gravitationskräften.

Zum Ausblasen von Partikeln aus dem Dichtspalt müssen diese Haftkräfte durch die Strömungskräfte des Fluides, hier der Sperrluft, überwunden werden. Dies wird im nächsten Abschnitt betrachtet.

Weigl /62/ berechnet in seiner Arbeit die Kraftkomponenten der Haftkraft unter anderem für Glaskugeln mit einer maximalen Größe von $d_{max} = 32 \mu\text{m}$. Der d_{50} Wert der Kugeln lag bei $22,3 \mu\text{m}$. Die berechneten Werte sind in Tabelle 5.7 für unterschiedliche Wandmaterialien in Luft und in Wasser angegeben.

TABELLE 5.7 Errechnete Haftkräfte des idealen Kugel-Platte-Modells unterschiedlicher Materialkombinationen /62/

Partikel - Oberfläche - Medium	F_{vdW} [N]	F_{el} [N]	F_{Kap} [N]
Glaskugeln - Stahl - Luft	$-2,3 \cdot 10^{-6}$	-	$-1,1 \cdot 10^{-5}$
Glaskugeln - Stahl - Wasser	$-6,2 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	-
Glaskugeln - PTFE - Luft	$-1,3 \cdot 10^{-6}$	-	$-1,1 \cdot 10^{-5}$
Glaskugeln - PTFE - Wasser	$-5,8 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	-

TABELLE 5.7 Errechnete Haftkräfte des idealen Kugel-Platte-Modells unterschiedlicher Materialkombinationen /62/

Partikel - Oberfläche - Medium	F_{vdW} [N]	F_{el} [N]	F_{Kap} [N]
Glaskugeln - Email - Luft	$-1,9 \cdot 10^{-6}$	-	$-1,1 \cdot 10^{-5}$
Glaskugeln - Email - Wasser	$-4,4 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	-

Eine messtechnische Bestimmung der Trennkräfte mittels eines AFM (Atomic Force Microscope) brachte die folgenden Ergebnisse, Bild 5.20.

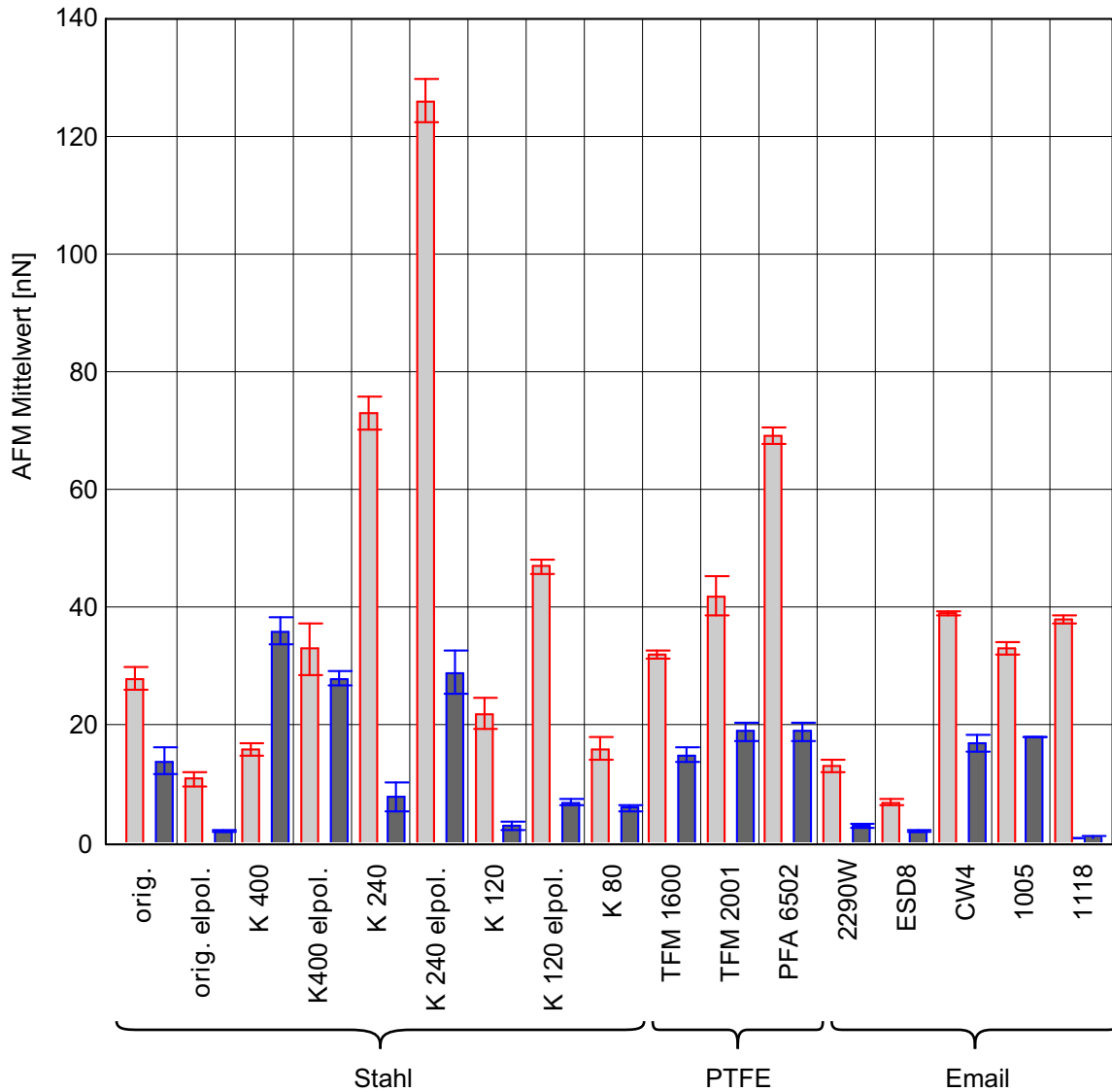


Bild 5.20 Vergleich der AFM-Trennkraftergebnisse für Glaskugeln auf den Testoberflächen in gasförmiger (jeweils heller Balken) und in flüssiger Umgebung (jeweils dunkler Balken) /62/

Die hier untersuchten Oberflächen waren Stahl, PTFE und Email. Bei den Stahloberflächen kamen die original Oberflächen sowie mit Sandpapier mit den angegebenen Körnungen aufgerauten Oberflächen zum Einsatz. Teilweise wurden die geschliffenen Stahloberflächen

anschließend elektropoliert (Bezeichnung: elpol.). Bei den anderen Oberflächen handelte es sich um unterschiedliche PTFE- bzw. Emailbeschichtungen.

Werden die Testoberflächen miteinander verglichen, zeigen die glatt polierten Stahloberflächen größere Trennkräfte als die raueren (Bild 5.20). Durch die glattere elektropolierte Oberfläche können die Partikel eine größere Kontaktfläche und damit größere Haftkräfte ausbilden.

Bei geschliffenen Oberflächen kann das Partikel aufgrund der Rauheit nur eine relativ geringe Kontaktfläche ausbilden. Die Trennkraft verringert sich. Eine definierte und regelmäßige Oberflächenrauheit könnte helfen, die Trennkräfte zwischen Partikeln und Oberfläche zu minimieren /62/.

Zum Ausblasen von Partikeln aus dem Dichtspalt ist es nicht zwingend erforderlich die Haftkräfte zwischen Partikel und Oberfläche komplett zu überwinden, es genügt häufig auch die Partikel entlang des Dichtspaltes zu rollen. Weigl /62/ führte Untersuchungen mit Glaskugeln auf Stahloberflächen durch, bei denen er die Kräfte bestimmt hat, die notwendig sind um die Partikel tangential zur Oberfläche zu bewegen. In Bild 5.21 sind diese Ergebnisse mit den Trennkräften normal zu Oberfläche gegenübergestellt. Unter Rückstand $R\ddot{U}$ versteht Weigl den Anteil der noch auf der Oberfläche befindlichen Partikel.

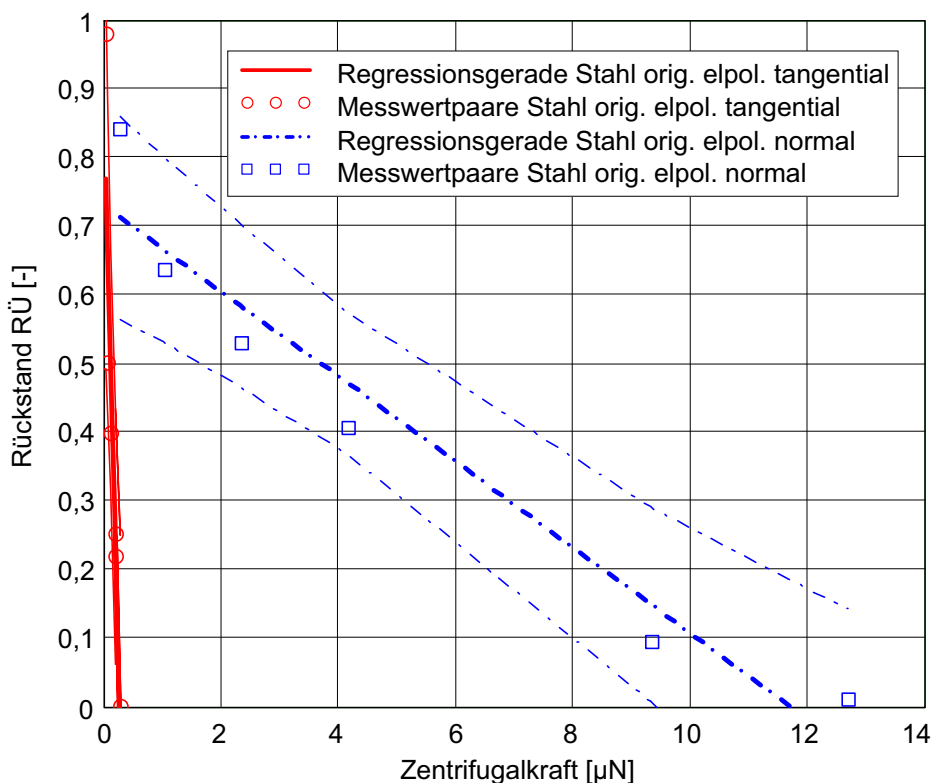


Bild 5.21 Vergleich von Zentrifugentrennkräften normal und tangential zur Oberfläche mit Glaskugeln auf Stahl orig. elpol. in Luft

Die aufzuwendenden Kräfte zur Bewegung der Partikel in tangentialer Richtung liegen im Bereich von 0,1 - 0,2 μN . Zur vollständigen Entfernung der Partikel normal zur Oberfläche sind Kräfte zwischen 12 - 13 μN notwendig.

Zum Vergleich sollen diese Zahlenwerte mit den Versuchsergebnissen des oben beschriebenen Sperrluftversuchs mit den Versuchsbedingungen gemäß Tabelle 5.4 gegenübergestellt werden. Bei diesen Versuchsbedingungen wirkten auf die Partikel Fluidkräfte auf Grund der Sperrluftströmung in Höhe von:

$$F_{\text{Kanal}} = 1,65 \times 10^{-6} \text{ N} = 1,65 \mu\text{N} \quad (\text{Gl. 5.41})$$

Bei den im beschriebenen Versuch herrschenden Versuchsbedingungen haben sich nur sehr wenige Messingpartikel auf den Oberflächen gehalten. Vergleicht man die Kraft die die Luftströmung auf ein Teilchen ausübte mit den Ergebnissen, die Weigl /62/ für Glaskugeln bestimmen konnte, so ist zu vermuten, dass die Haftkräfte sich in ähnlichen Größenordnungen eingestellt hatten. Eine leichte Erhöhung der Haftkräfte beim hier beschriebenen Versuch mit den Messingpartikeln ist auf Kapillarkräfte zurückzuführen. Bei diesen Versuchen wurden die Dichtspaltoberflächen leicht eingölt, daher ist von zusätzlichen Kapillarkräften auszugehen.

Dennoch war bei diesem Versuch die Kraft auf die Messingpartikel groß genug um diese im Spalt zu rollen und ein Zusetzen des Spaltes zu verhindern. Ein Ablösen von der Oberfläche wird nicht stattgefunden haben.

Eine weitere Arbeit, die sich mit dem Wegblasen von Spänen beschäftigt, wurde von Wieland /4/ vorgestellt. Es werden Versuche mit unterschiedlichen metallischen Spänen und unterschiedlichen metallischen Oberflächen beschrieben. Bei den beschriebenen Versuchen wurden Späne auf eine Metallfläche aufgebracht und es wurde untersucht bei welchen Luftströmungsgeschwindigkeiten wie viele Prozent der Späne zum Abrutschen gebracht werden konnten.

Bei den beschriebenen Versuchsergebnissen können die oben beschriebenen Haftmechanismen nochmals bestätigt werden. Wieland /4/ zeigte, dass sich trockene Späne leichter mit einem Luftstrom zum Abrutschen bringen lassen wie Späne aus der Nassbearbeitung. Bei diesen war die Haftung aufgrund der Kapillarkräfte erhöht, vgl. Bild 5.22 und Bild 5.23.

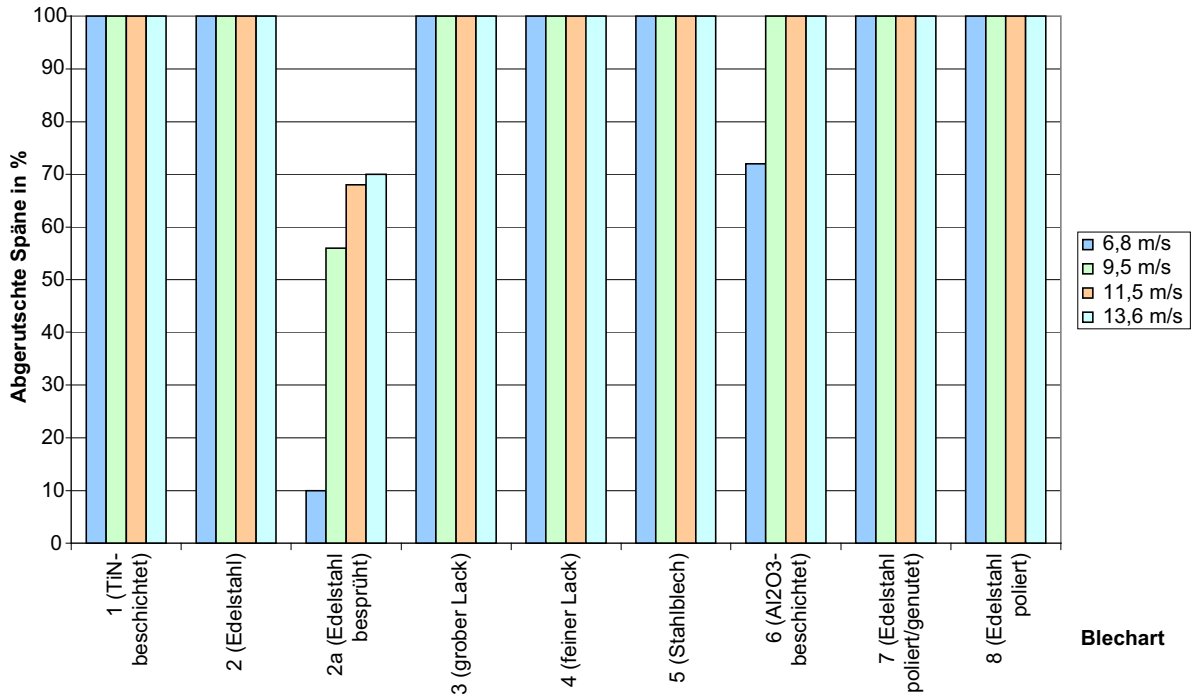


Bild 5.22 Vergleich der notwendigen Luftströmungsgeschwindigkeiten zum Abblasen trockener Späne /4/

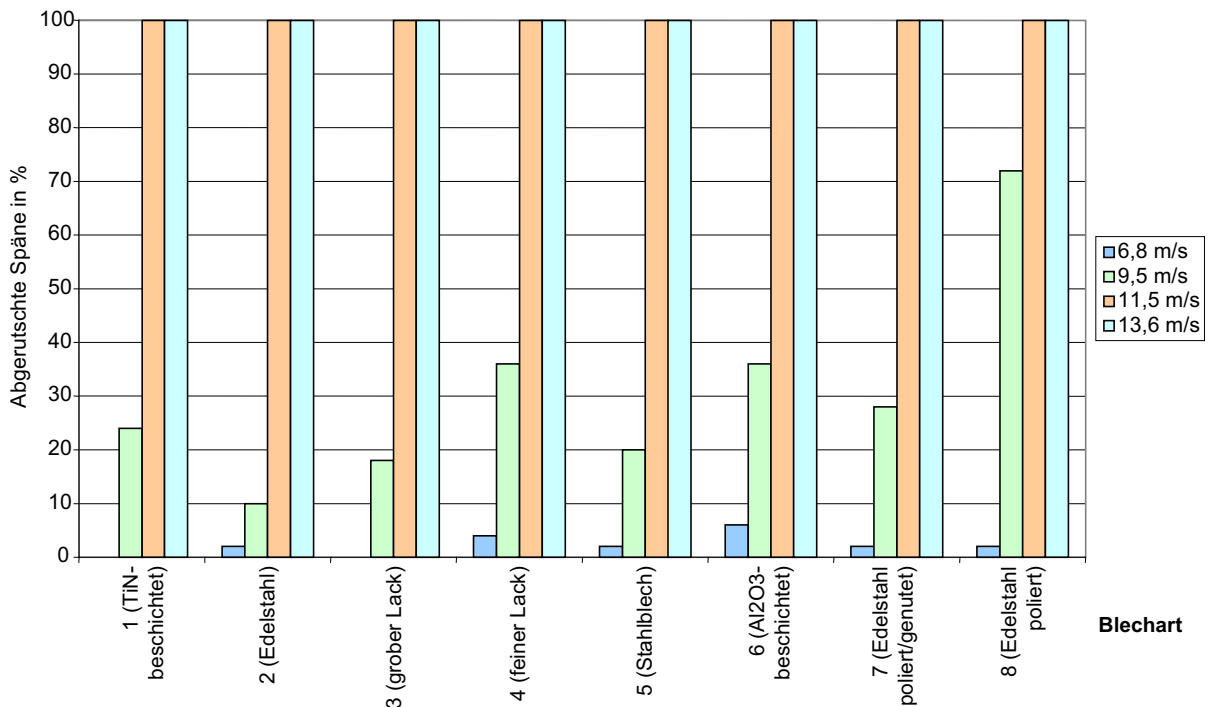


Bild 5.23 Vergleich der notwendigen Luftströmungsgeschwindigkeiten zum Abblasen nasser Späne /4/

Je größer die Balken in den Diagrammen sind, desto mehr Partikel konnten durch einen Luftstrom mit der entsprechenden Strömungsgeschwindigkeit zum abrutschen gebracht werden.

Bei den trockenen Spänen waren dazu meist Strömungsgeschwindigkeiten von $v = 9,5$ m/s ausreichend. Bei den Versuchen mit den nassen Spänen waren dazu Strömungsgeschwindigkeiten von mindestens $v = 11,5$ m/s notwendig.

Ferner fand Wieland /4/ auch, dass sich größere Partikel leichter abblasen lassen als kleinere Partikel. Bei den kleineren Partikeln ist das Verhältnis von Haftkräften zur Angriffsfläche für das Fluid schlechter als bei größeren Partikeln, siehe Bild 5.24. Es sind hierbei lediglich drei der acht getesteten Oberflächen dargestellt. Für ein Abrutschen der großen Späne waren etwas mehr als $v = 6,8$ m/s an Strömungsgeschwindigkeit erforderlich, wohingegen bei den kleinen Spänen eine Luftströmung mit einer Geschwindigkeit von $v = 13,6$ m/s noch nicht ausreichend war.

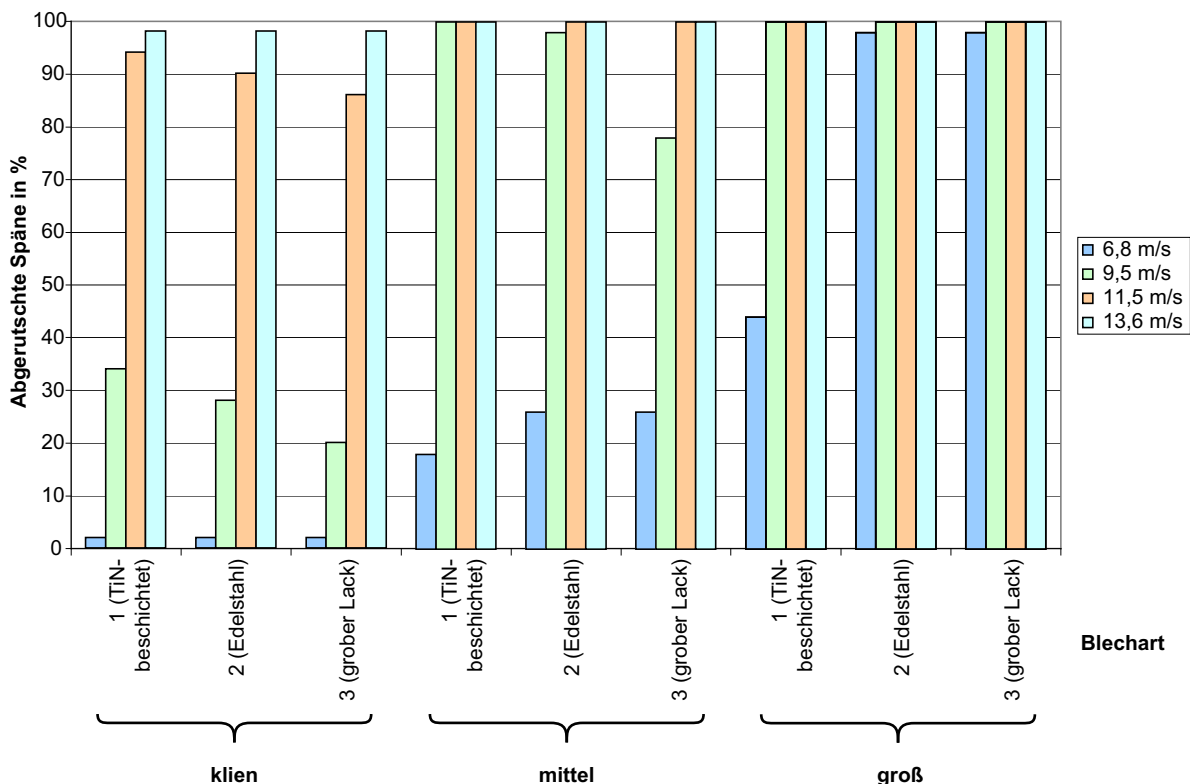


Bild 5.24 Vergleich der notwendigen Luftströmungsgeschwindigkeiten zum Abblasen kleiner (links), mittlerer (Mitte) und großer Späne (rechts) bei MMS Verwendung /4/

5.6 Bewertung und Anwendung der Überlegungen

Die in diesem Kapitel beschriebenen physikalischen Größen bestimmen die Funktion der berührungsfreien Wellendichtungen zur Staubabdichtung in entscheidendem Maße. Es wurde anhand einer Näherungsformel gezeigt, dass die aerodynamischen Kräfte zur Abdichtung durch abbremmen von Partikeln im Dichtspalt als einzigstes Wirkprinzip nicht ausreichend sein kann. Elementar wichtig ist die Luftströmung zum Ausblasen der Partikel aus dem Spalt, wenn sie z.B. durch Partikel-Wand-Stöße abgebremst wurden.

Die zur Berechnung der auftretenden Kräfte notwendigen Formeln wurden an dieser Stelle angegeben, um ein Gefühl für die Größenordnungen der Kräfte zu bekommen. Für eine exakte Berechnung von Dichtsystemen sind sie jedoch nur in Ausnahmefällen geeignet. Es handelt sich bei den Formeln zumeist um Differentialgleichungen die im Rahmen einer CFD-Simulation berechnet werden müssen. Für den jeweils zu betrachtenden Fall müssten dann noch die Spanform, die Dichtsystemoberflächen, die Geschwindigkeit und ähnliches bestimmt werden. Dies ist für die meisten Anwendungsfälle der hier untersuchten Dichtsysteme nicht möglich.

Die wesentlichen Wirkprinzipien - Spaltumlenkungen, enge Spalte, Sperrluft zum Ausblasen der Partikel - können dennoch abgeleitet werden und sind auf allgemeine Anwendungsfälle übertragbar.

Im nächsten Kapitel werden zwei Dichtsysteme vorgestellt, bei deren Konstruktion und Auslegung die bisher gefundenen Erkenntnisse konsequent umgesetzt wurden.

6 Eigenkonstruierte berührungsfreie Kassettendichtsysteme

Ausgehend von den bisher beschriebenen Versuchsergebnissen und den angestellten theoretischen Überlegungen wurden zwei Dichtsysteme entworfen und konstruiert. Ziel der Konstruktion war eine möglichst gute Partikeldichtwirkung bei minimalem Sperrluft- und Platzbedarf. Ferner wurden die Richtlinien des Konstruktionskatalogs „Berührungsfreie Spindelabdichtung im Werkzeugmaschinenbau“ /13/ beachtet. In diesem Konstruktionskatalog wurden Richtlinien für die Gestaltung von berührungsfreien Dichtungen bei Flüssigkeitsbeaufschlagung dargestellt. Die beiden Dichtsysteme sollten daher sowohl für die Abdichtung von flüssigen- als auch von staubförmigen Medien geeignet sein. Diese beiden Dichtsysteme wurden mit IMA Stirnflächenspaltichtung bzw. IMA Fangkammerdichtung bezeichnet, Bild 6.1.

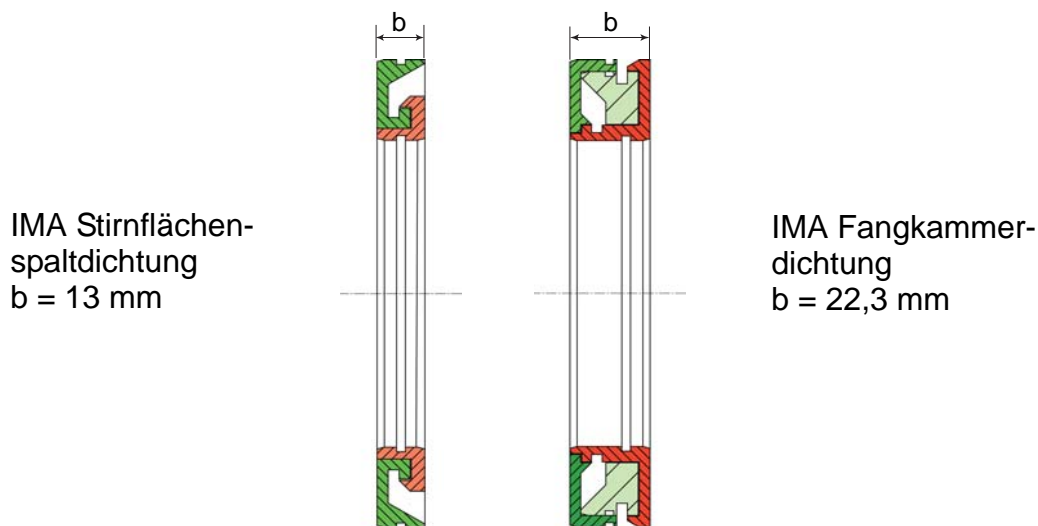


Bild 6.1 Eigenkonstruierte berührungsfreie Kassettendichtsysteme

Beide Dichtsysteme weisen einen überdeckten Stirnflächenspalt auf. Diese Art von Eingangsbereich der Dichtung erwies sich in bisherigen Untersuchungen und bei der Beaufschlagung von berührungsfreien Dichtungen mit Flüssigkeiten am günstigsten, /13/ und /65/. Die Dichtung, Bild 6.1 rechts, besitzt zusätzlich zum Eingangsbereich mit überdecktem Stirnflächenspalt noch eine Fangkammer. Die Fangkammer wurde nach den Gestaltungsrichtlinien einer ersten Dichtkammer gestaltet, in die viel Flüssigkeit eindringt, /13/. Die Fangkammer bildet eine zusätzliche Barriere für den Messingstaub.

Damit berührende Dichtelemente durch diese berührungsfreien Dichtsysteme ersetzt werden können, sollten die Dichtsysteme möglichst so konstruiert werden, dass sie in den Einbauräum eines Radialwellendichtrings (RWDR) passen. Bei der linken Dichtung, in Bild 6.1, konnte diese Forderung vollständig erfüllt werden. Dieses Dichtsystem besitzt die gleichen Abmes-

sungen wie ein RWDR für diesen Wellendurchmesser, /11/. Das Dichtsystem mit Fangkammer baut um den Eingangsbereich der Fangkammer größer als der entsprechende RWDR.

Beide Dichtsysteme wurden über O-Ringe im Stator und auf der Welle geklemmt. Sie bildeten gleichzeitig die Nebenabdichtung. Die Dichtelemente konnten damit wie RWDR von vorne in die Statorbohrung eingepresst werden und mussten nicht mit der Welle oder dem Stator verschraubt werden, siehe Bild 6.2.

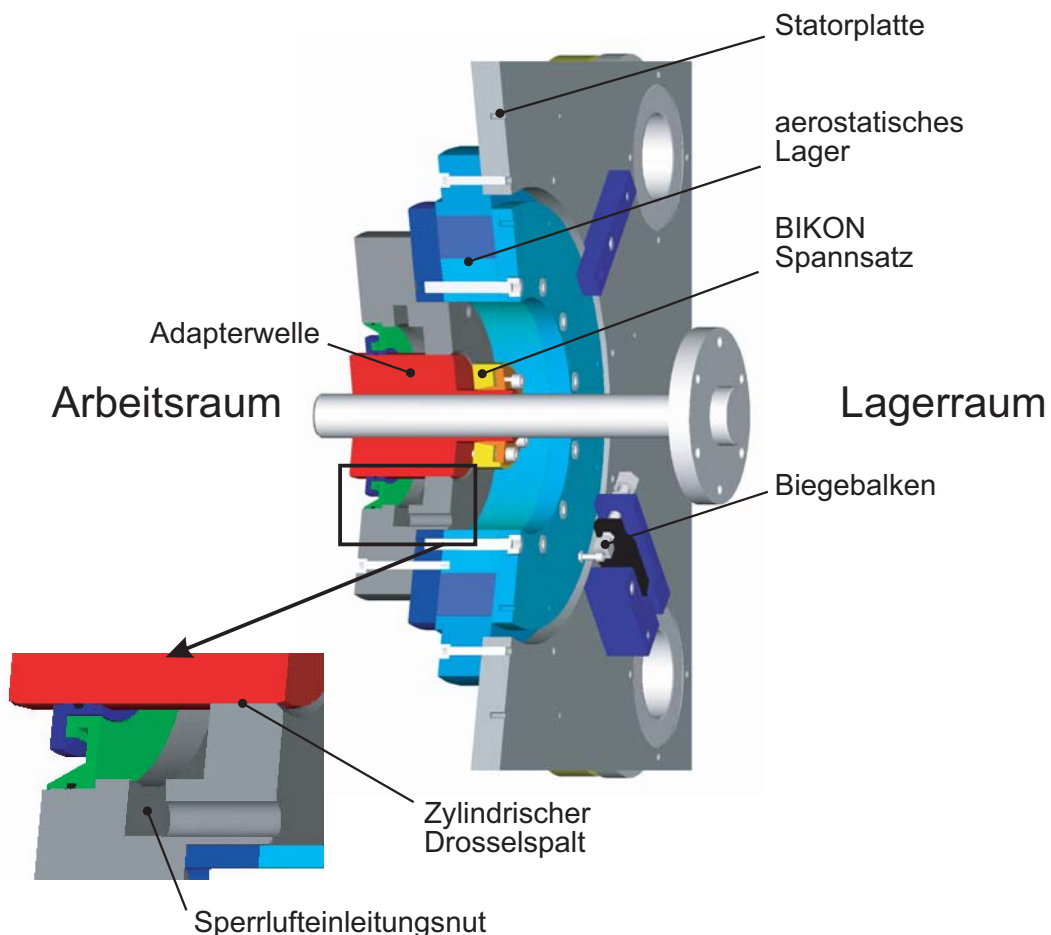


Bild 6.2 Versuchsaufbau mit IMA-Dichtsystemen

Damit die Ergebnisse vergleichbar mit denen der handelsüblichen Dichtsysteme sind, wurde der Außendurchmesser gleich dem der handelsüblichen Dichtungen gewählt, Drosselspalt-durchmesser $D = 120$ mm. Damit ist auch der Durchmesser des Spalteingangs etwa gleich groß, wie bei den handelsüblichen berührungsfreien Dichtsystemen, die untersucht wurden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Dichtsysteme beschrieben.

6.1 IMA Dichtung mit überdecktem Stirnflächenpalt

Die Adapterwelle und der Stator bildeten hinter dem Dichtsystem einen zylindrischen Drosselspalt mit einer Spalthöhe von $h = 0,15$ mm. Zwischen die berührungsfreie Dichtung und den Drosselspalt konnte über eine Sperrlufteinleitungsnut Sperrluft eingeleitet werden, siehe

Bild 6.1. Die bei der Stirnflächenspaltichtung realisierten Spaltmaße sind Bild 6.3 zu entnehmen.

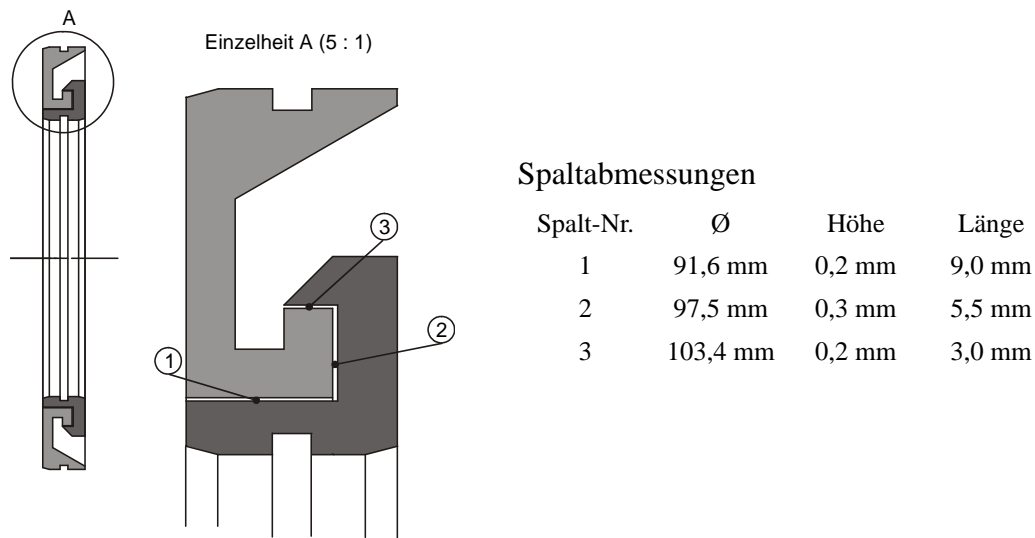


Bild 6.3 IMA Dichtsystem mit überdecktem Stirnflächenspalt - Abmessungen

Bei dieser Dichtung wurde der Volumenstrom der Sperrluft von 200 l/min in Stufen von 10 l/min bis auf 1 l/min verringert. Der Volumenstrom von 200 l/min wurde gewählt, da hierbei der Druck in der Sperrlufteinleitungsnut und in der Versuchskammer ähnlich den Werten bei den handelsüblichen Dichtungen war. Damit sind die Ergebnisse der Dichtungen vergleichbar. Bei der Variation des Volumenstroms wurde die Leckage hinter dem Dichtsystem mit dem Partikelzähler ermittelt. Außerdem wurde bei dieser Dichtung das Reibmoment bei öligem Dichtspalt und einem Druck in der Sperrlufteinleitungsnut von $p = 50$ hPa, $p = 25$ hPa und $p = 0$ hPa gemessen.

Die Versuchsergebnisse mit dem Partikelzähler sind im Diagramm in Bild 6.4 dargestellt.

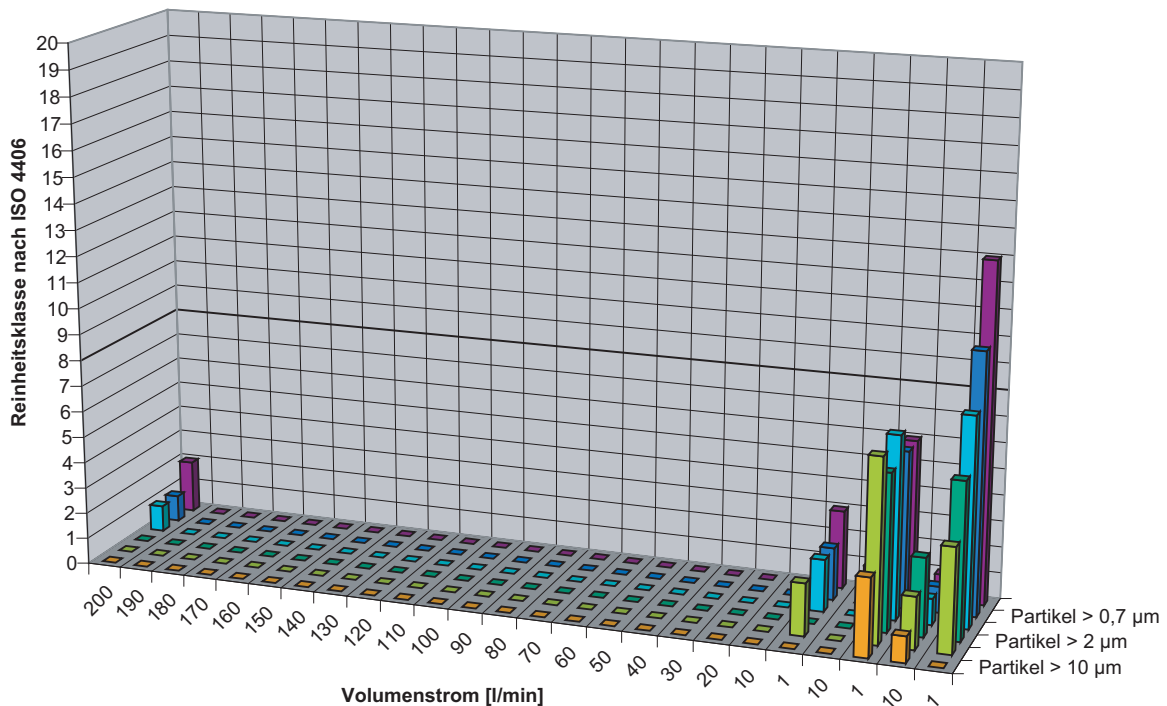


Bild 6.4 Leckagepartikel beim IMA Dichtsystem mit überdecktem Stirnflächenspalt

Die Reinheitsklassen, die sich aus den Partikelzahlen berechnen lassen, sind bis auf den Versuch mit 1 l/min Sperrluft und dem folgenden Versuch mit 10 l/min Sperrluft konstant Null. Bei diesem Versuch mit 10 l/min Sperrluft wird die Reinheitsklasse 2 erreicht, obwohl die absolute Anzahl der Partikel hinter der Dichtung geringer ist als bei den handelsüblichen Dichtsystemen. Bei dieser Dichtung ist jedoch der lagerseitige Anteil des Sperrluftvolumenstroms weniger als halb so groß, wie bei den handelsüblichen Dichtsystemen. Dadurch ist das analysierte Luftvolumen geringer, da die Messzeit bei allen Versuchen konstant war. Durch das geringere Luftvolumen steigt die auf 100 ml bezogene Partikelanzahl an. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Reinheitsklasse 2 hierbei eine Anzahl von 2 bis 4 Partikeln je 100 ml Volumen repräsentiert. Da der Luftstrom aus dem Dichtsystem geringer war als bei den handelsüblichen Dichtsystemen ist auch die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, dass Fremdpartikel aus der Laborluft in größerem Maße in den Lagerraum eingedrungen sind. Beim Reibmoment zeigten sich keine Besonderheiten. Das Reibmoment war bei allen drei Druckstufen, $p = 50$ hPa, $p = 25$ hPa und $p = 0$ hPa, annähernd konstant, siehe Bild 6.5.

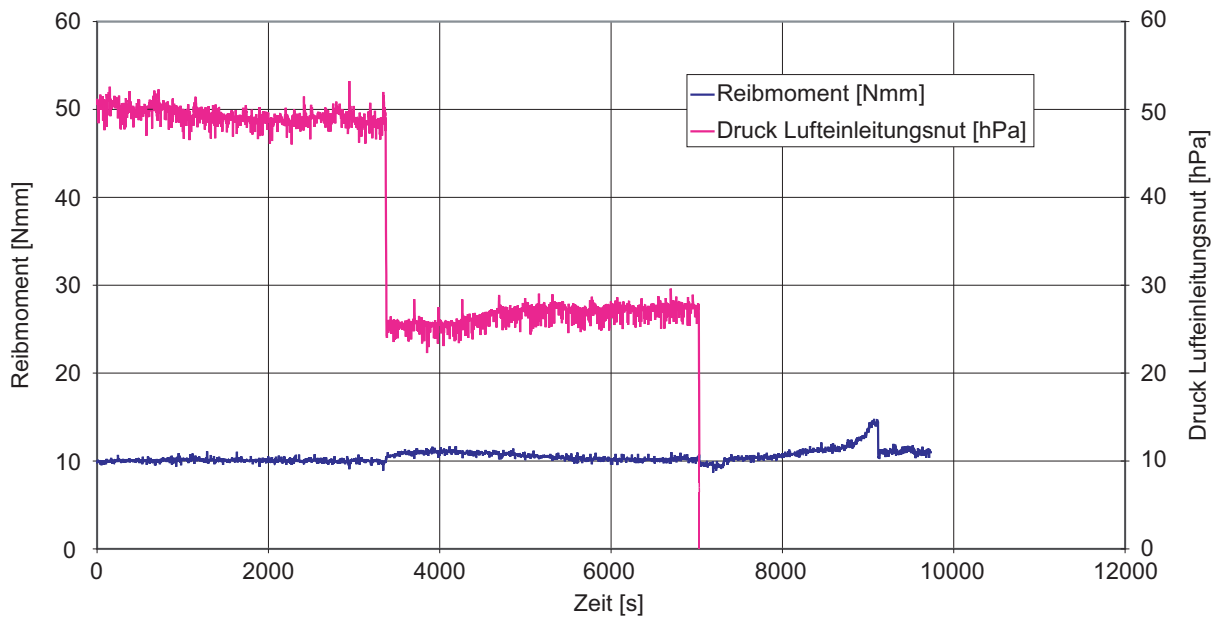


Bild 6.5 Reibmoment der IMA - Stirnflächenspaltichtung

6.2 IMA Dichtung mit überdecktem Stirnflächenspalt und Fangkammer

Bei dieser Dichtung wurde zur Montage auf dem Prüfstand der gleiche Stator wie bei der Dichtung ohne Fangkammer verwendet. Diese Dichtung besaß den gleichen Wellendurchmesser wie die zuvor untersuchte ohne Fangkammer. Auch hier bildeten die Adapterwelle und der Stator einen zylindrischen Drosselspalt. Damit der Stator der Dichtung gefertigt werden kann, ist dieser in zwei Teile geteilt worden. Das innere Teil klemmt im äußeren Teil durch einen O-Ring, sowie der Stator der Dichtung im Statorteil des Prüfstandes und der Rotor auf der Welle über O-Ringe klemmen, Bild 6.6. Die Ablaufbohrung aus der Fangkammer war bei den Versuchen zum Arbeitsraum hin verschlossen.

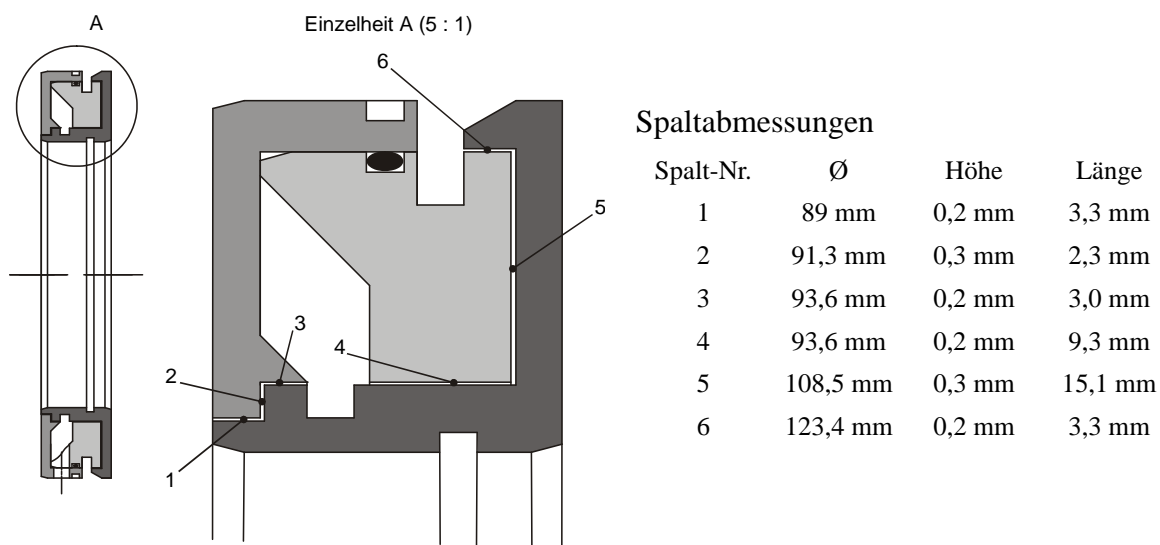


Bild 6.6 IMA-Fangkammerdichtsystem - Abmessungen

Auch bei dieser Dichtung konnte zwischen der Dichtung und dem zylindrischen Drosselspalt Sperrluft eingeleitet werden. Es wurde dasselbe Versuchsprogramm durchgeführt wie mit dem anderen eigengefertigten Dichtsystem auch. Der Versuchsaufbau ist in Bild 6.7 schematisch dargestellt.

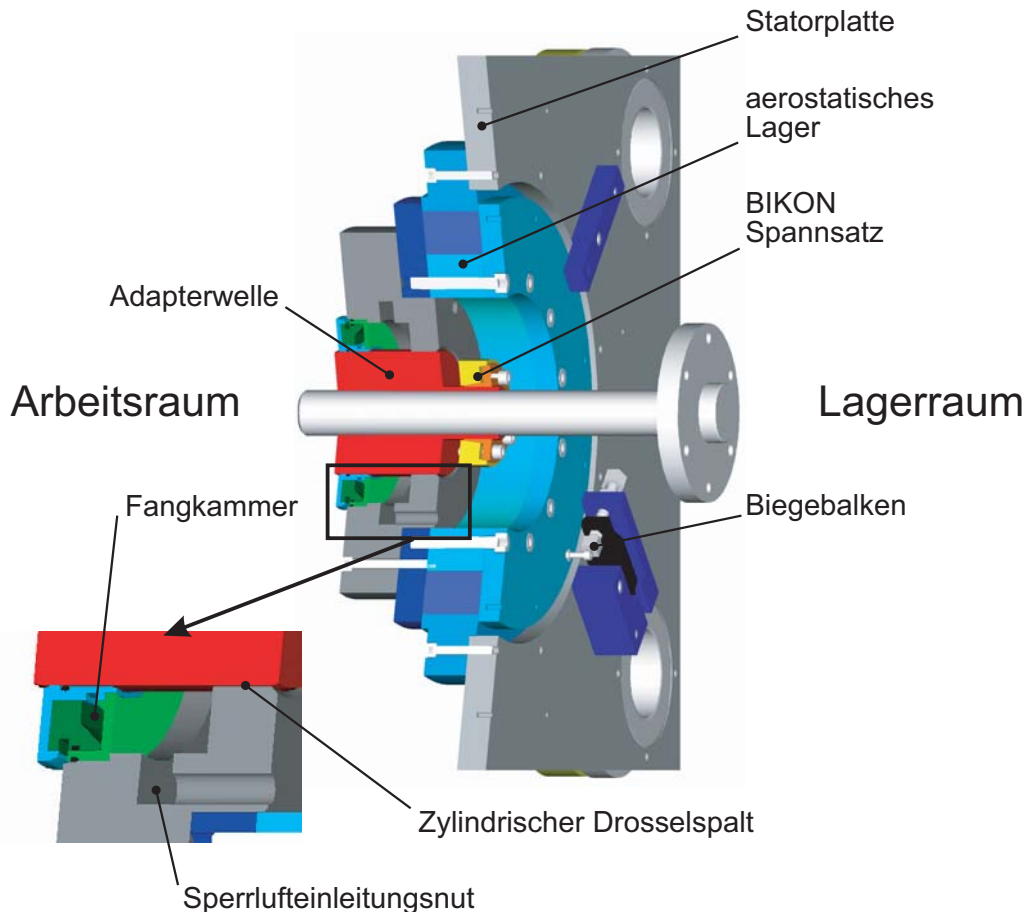


Bild 6.7 Versuchsaufbau mit IMA - Fangkammerdichtsystem

Die Reinheitsklassen in allen Größenklassen dieser Dichtung mit Fangkammer waren noch geringer als die Partikelzahlen der Dichtung ohne Fangkammer, Bild 6.8. Die Fangkammer und die zusätzlichen Umlenkungen stellen demnach ein zusätzliches Hindernis für die Partikel dar.

Insgesamt bewegte sich die Menge der Leckagepartikel, die beim Versuch mit dieser Dichtung gefunden wurden, auf einem äußerst niedrigen Niveau und stiegen auch beim zwischenzeitlichen Betrieb ohne Sperrluft nicht wieder an. Die erzielbaren Reinheitsklassen waren hierbei konstant Null.

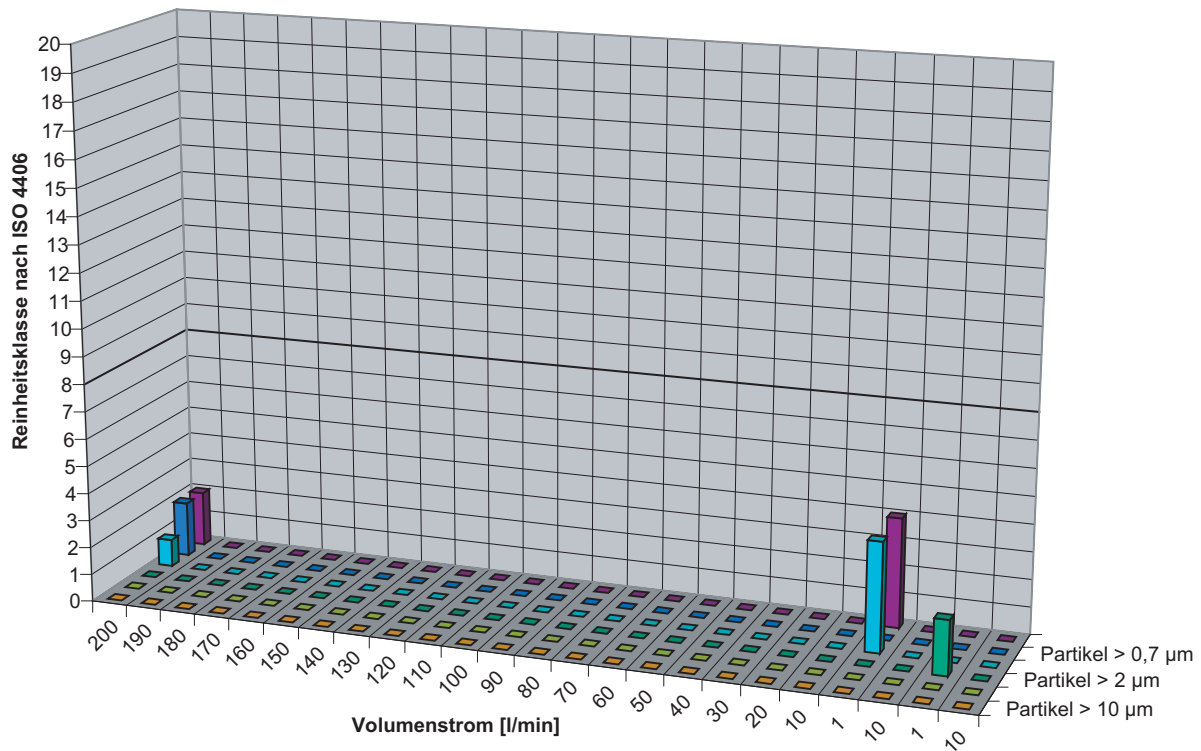


Bild 6.8 Leckagepartikel beim IMA Dichtsystem mit überdecktem Stirnflächenspalt und Fangkammer

Der Verlauf des Reibmoments zeigte nach den ersten beiden Druckstufen mit $p = 50$ hPa und $p = 25$ hPa einen Sprung und sank dann langsam wieder ab. Auch bei diesen Dichtsystemen zeigt sich am Reibmoment, dass ein dauerhafter Betrieb ohne Sperrluft nicht sicher möglich ist, Bild 6.9.

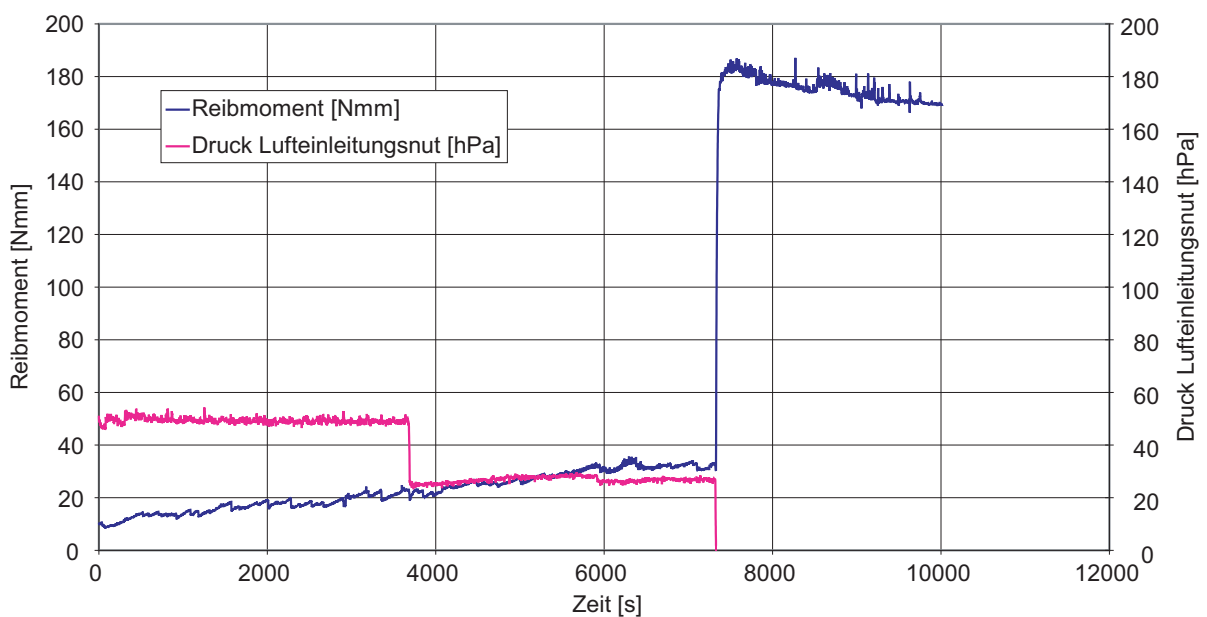


Bild 6.9 Reibmoment der IMA - Fangkammerdichtung

Zusammenfassung der Ergebnisse mit den eigenkonstruierten Dichtsystemen

Es wurden zwei Dichtsysteme vorgestellt und untersucht die nach den in dieser Arbeit gefundenen Erkenntnissen gestaltet wurden. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf eine kleine, kompakte Bauweise sowie einen geringen Sperrluftbedarf bei optimaler Dichtwirkung gelegt. Es konnte gezeigt werden, dass mit einem berührungsfreien Dichtsystem mit den Abmessungen eines Radialwellendichtrings exzellente Ergebnisse erzielt werden können.

Bei der Verwendung eines Dichtsystems, das nach diesen Erkenntnissen aufgebaut wurde und in Verbindung mit Sperrluft betrieben wird, ist eine Gefährdung von z. B. Wälzlagern ausgeschlossen. Die Verwendung von Sperrluft ist aber auch bei diesen Dichtsystemen für einen sicheren und dauerhaften Betrieb unbedingt erforderlich.

Aufgrund des realisierten, überdeckten Eingangsbereiches und der ähnlichen Gestaltung der Drosselspalte gemäß des Konstruktionskatalogs „Berührungsfreie Spindeldichtungen im Werkzeugmaschinenbau“ /13/ eignen sich diese Dichtsysteme sowohl zur Abdichtung von Stäuben als auch von flüssigen Medien. Diese Eigenschaft verbunden mit der unbegrenzten Fähigkeit des Trockenlaufes, der hohen Drehzahlgrenzen und somit hohen Zuverlässigkeit eröffnen diesen Dichtsystemen ein großes Feld der Einsatzmöglichkeiten.

7 Konstruktionsrichtlinien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zahlreichen durchgeführten Versuche zu konkreten Konstruktionshinweisen zusammengefasst. Dies soll dem Konstrukteur und Anwender von berührungsfreien Wellendichtungen zur Staubabdichtung als praktische Anleitung zur Konstruktion und zum Betrieb von berührungsfreien Dichtungen dienen.

Ziel ist die Konstruktion eines Dichtsystems das effektiv das Durchtreten von Leckagepartikeln verhindert und das Verstopfen der Spalte durch Partikel (Fressen) vermeidet.

Im Folgenden werden die einzelnen Faktoren, die bei der Staubabdichtung mit berührungsfreien Wellendichtungen relevant sind, vorgestellt und am Ende des Kapitels in Bild 7.1 an einem beispielhaften Dichtsystem zusammenfassend dargestellt.

7.1 Randbedingungen

Zur Auslegung und zur sicheren Gestaltung eines Dichtsystems ist zunächst einmal die Kenntnis der Randbedingungen wichtig, bei denen das Dichtsystem betrieben werden soll. Teilweise sind hier bereits einfache Maßnahmen möglich, um die Anforderungen an das Dichtsystem zu entschärfen. Großen Einfluss haben die Größe der Partikel, deren Geschwindigkeit und Richtung sowie ihre Neigung zum Verkleben. Nur Partikel die kleiner als die Spalthöhe sind, dringen in das Dichtsystem ein und sind somit relevant.

ES GILT: Je größer die Partikel am Spalteingang sind, desto unkritischer sind sie.

Ein weiterer Faktor bei den abzudichtenden Partikeln ist die Geschwindigkeit v , mit der sie auf das Dichtsystem auftreffen. Je langsamer die Partikel sind desto weniger weit dringen sie in den Dichtspalt ein.

ES GILT: Je langsamer die Partikel, desto unkritischer sind sie.

Hierbei bietet sich in vielen Fällen ein großes Potenzial für Verbesserungen der Dichtsicherheit. Es ist zu prüfen, wie die Partikel an das Dichtsystem gelangen und ob dieser direkte Weg durch „Abschirmungen“ verstellt werden kann. Diese Abschirmungen könnten entweder direkt im Bereich vor der Dichtstelle angeordnet werden oder in dem Bereich, in dem die Partikel bei der Bearbeitung entstehen.

Neben der Geschwindigkeit ist auch die Bewegungsrichtung der Partikel relativ zur Spaltrichtung von entscheidender Bedeutung. Partikel die in Spaltrichtung fliegen können am weitesten in die Dichtspalte eindringen und stellen somit die größte Gefahr dar. Je größer der Winkel zwischen Flugrichtung und Spaltrichtung ist desto geringer ist das Eindringvermögen der Partikel.

ES GILT: Je kleiner der Winkel zwischen Bewegungsrichtung der Partikel und der Spaltichtung ist desto mehr Partikel und desto tiefer dringen sie in den Spalt ein.

Die vierte Einflussgröße bei den Randbedingungen ist die Neigung zum Verkleben der Partikel, bzw. ob die Partikel trocken oder ölig sind bzw. ob der Spalt trocken oder ölig ist.

Äußerst kritisch sind trockene Partikel, die weit in ölige Dichtspalte eindringen. Diese lagern sich dort ab und bilden verklebte Partikelansammlungen an denen es dann zum Fressen kommen kann. Ölige Spalte sind demnach zu vermeiden. Trockene Partikel in trockenen Spalten erwiesen sich als wenig kritisch, da sie von der Sperrluft leicht wieder ausgeblasen werden können. Unkritisch sind ölige Partikel die auf trockene Spalte auftreffen. Diese verkleben bereits am Spaltanfang und behindern dann weitere Partikel dabei in den Spalt einzudringen.

ES GILT: Ölige Partikel und trockene Spalte sind unkritisch, trockene Partikel und trockene Spalte sind etwas ungünstiger, trockene Partikel und ölige Spalte sind kritisch.

7.2 Betriebsbedingungen

Zu den Betriebsbedingungen zählen Luftströme \dot{V} aufgrund von Druckdifferenzen und vor allem die Sperrluft. Sperrluft ist bei der Staubabdichtung unverzichtbar, zum einen um die Spalte „sauber“ und partikelfrei zu halten und zum anderen um die Lager sicher vor Partikeln zu schützen.

Die eingesetzte Sperrluft muss sehr sauber sein, da sie in den meisten Fällen auch durch die Lagerung entweicht und in ihr enthaltene Verunreinigungen die Lagerungen auch wieder schädigen würden. Hierzu ist der Einsatz spezieller Filter notwendig. Diese müssen Partikel zurückhalten, die größer sind als der Schmierfilm im Bereich der Wälzkörper des Lagers. Für die Praxis sind dies meist Filter mit einer Filterfeinheit von unter 1 μm .

ES GILT: Die Sperrluft muss sehr sauber bzw. partikelfrei sein.

Auf jeden Fall und zu jedem Zeitpunkt sind Luftströme vom Arbeitsraum in und durch das Dichtsystem zu vermeiden. Schon geringste Luftströme durch das Dichtsystem führen zu einem sehr hohen Partikeleintrag in und durch das Dichtsystem hindurch. Ebenfalls zu vermeiden sind Betriebssituationen, bei denen keine Sperrluft zur Verfügung steht. Hierbei können ebenfalls größere Mengen an Partikeln in das Dichtsystem gelangen und es zusetzen. So lange die Sperrluftströmung im Spalt laminar bleibt, steigt die Dichtsicherheit mit zunehmendem Sperrluftvolumenstrom an.

ES GILT: Je größer der laminare Sperrluftstrom umso größer die Dichtsicherheit. Ein Luftstrom aus dem Arbeitsraum durch das Dichtsystem ist unter allen Umständen zu verhindern.

Dasselbe gilt auch für den Luftdruck und für Luftdruckdifferenzen. Der Sperrluftdruck in der Sperrluftleitungsstrecke muss immer der höchste Druck im System sein. Der Druck darf zu keinem Zeitpunkt im Arbeitsraum größer sein als in der Einleitungsstrecke. Ebenfalls zu vermeiden sind Situationen bei denen der Sperrluftdruck auf Null absinkt. Allgemein gilt auch hier: Je

höher der Sperrluftdruck - laminare Strömung vorausgesetzt -, desto größer ist die Dichtsicherheit.

ES GILT: Je höher der Sperrluftdruck, desto größer die Dichtsicherheit, bei günstiger Gestaltung genügen $p = 50$ hPa. Der Druck darf im Arbeitsraum zu keiner Zeit größer sein als in der Sperrlufteinleitungsnut.

Bei den Betriebsbedingungen für die Sperrluft ist zu beachten, dass bei gegebener Spaltgeometrie der Sperrluftdruck direkt vom Sperrluftvolumenstrom abhängig ist. Ein für die Praxis günstiger Wert für den Druck in der Sperrlufteinleitungsnut gegenüber dem Druck im Arbeitsraum ist $p = 50$ hPa, wie er auch in der DIN 69002 für Kurzspindeln /18/ empfohlen wird.

Generell gilt, dass bei der Staubabdichtung die Strömungsgeschwindigkeit der Sperrluft im Drosselspalt ausschlaggebend ist und bei der Flüssigkeitsabdichtung der Sperrluftdruck die entscheidende Größe ist.

ES GILT: Sperrluftvolumenstrom möglichst hoch wählen, solange die Strömung laminar bleibt.

7.3 Konstruktion

Die eigentliche Konstruktion der Dichtsysteme wird zum einen bestimmt durch den einzelnen Spalt mit Spalthöhe und Spaltlänge und zum anderen durch die Anordnung verschiedener Teilspalte zueinander. Hierbei übernehmen nur die Spalte zwischen abzudichtendem Schmutzraum und der Sperrlufteinleitungsnut die Funktion der Staubabdichtung. Die Spalte hinter der Nut dienen nur als Drosselspalt zur Verringerung des lagerseitigen Sperrluftstroms oder zur Abdichtung von Fluiden aus dem Lager. Die nachfolgenden Gestaltungsrichtlinien beziehen sich nur auf den schmutzabdichtenden Spaltteil. Der lagerraumseitige Teil kann je nach Anwendungsfall als einfacher zylindrischer Drosselspalt ausgeführt werden oder kann gemäß den Angaben im Konstruktionskatalog „Berührungsfreie Spindelabdichtung im Werkzeugmaschinenbau /13/ zur Abdichtung z. B. eines ölgeschmierten Lagers gestaltet werden.

7.3.1 Spalthöhe und Spaltlänge

Für die Spalthöhe h gilt, dass je kleiner die Spalthöhe ausgeführt wird, desto größer ist die Dichtsicherheit. Je kleiner die Spalthöhe, desto mehr Partikel werden aufgrund ihrer Größe schon am Eindringen in den Spalt gehindert und die kleinere Querschnittsfläche reduziert die Anzahl weiter. Ferner erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Partikel mit den näher zusammengedrängten Spaltwänden kollidieren und so abgebremst werden.

ES GILT: Je kleiner die Spalthöhe h , desto größer die Dichtsicherheit

Die Spalthöhe beeinflusst zusätzlich den Druck in der Sperrlufteinleitungsnut bzw. den notwendigen Volumenstrom, in ganz erheblichem Maße. Die vereinfachte Formel für den Luftstrom durch einen engen Spalt bei geringen Druckdifferenzen lautet:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta p \cdot h_0^3}{12 \cdot \eta \cdot l} \Rightarrow \Delta p \propto \frac{\dot{V} \cdot l}{h_0^3} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Der Durchmesser D der Statorteile und die Viskosität η der Luft sind hier als Konstanten zu betrachten. Der Druck ist damit vom Volumenstrom, der Spaltlänge und der Spalthöhe abhängig. Während die Spaltlänge den Volumenstrom nur linear beeinflusst, geht die Spalthöhe in 3. Potenz ein!

Auch wirtschaftlich betrachtet ist es ratsam in erster Linie die Spalthöhen möglichst gering und in zweiter Linie den Spalt möglichst lang auszuführen. Der Sperrluftbedarf bei gleichem Sperrluftdruck und damit die Betriebskosten sinken. Weitere Hinweise zum Sperrluftbedarf finden sich auch bei Würthner /16/ und Stiegler /17/.

Für die Spaltlänge l gilt weiter, je länger, desto größer die Dichtsicherheit. Je länger der Spalt, desto mehr Partikel werden an die Spaltwände abgelenkt und dort abgebremst.

ES GILT: Je größer die Spaltlänge, desto größer die Dichtsicherheit

7.3.2 Spaltanordnung

Bei der Spaltanordnung gilt, dass jede Spaltumlenkung um 90° für die Partikel ein großes Hindernis darstellt. Sie treffen dadurch senkrecht auf eine Spaltwand auf und verlieren dabei ihre gesamte kinetische Energie in Spaltlänge. Dies sollte so weit wie möglich am Spaltanfang erfolgen, um Partikelansammlungen im Inneren zu vermeiden und das Ausblasen der abgebremsten Partikel mittels Sperrluft zu erleichtern.

Besonders vorteilhaft sind Stirnflächenspalte. Partikel werden dort durch Fliehkraft bei rotierender Welle nach außen befördert und dringen nicht weiter ins Innere des Dichtsystems vor. Auch hier ist die Unterstützung durch Sperrluft erforderlich, um ein Zusetzen beispielsweise eines vorgeschalteten Überdeckungsspaltens zu verhindern.

Nach Möglichkeit ist der erste Teilspalt so auszuführen, dass er von der Partikelquelle abgewendet ist. Die besten Ergebnisse werden mit überdeckten Stirnflächenspalt erzielt. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass für 99% der Anwendungsfälle ein derartiges Dichtsystem mit zwei Spaltumlenkungen - richtige Wahl der Spalthöhen und des Sperrluftdrucks vorausgesetzt - ausreichend ist.

ES GILT: 90° Umlenkungen bremsen die Partikel effektiv ab. Das Abbremsen sollte möglichst weit am Spaltanfang erfolgen. 2 Umlenkungen genügen.

Die wichtigsten Gestaltungsmerkmale die ein zuverlässiges Dichtsystem aufweisen muss, sind zusammenfassend in Bild 7.1 dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine Variante mit einem überdeckten Stirnflächenspalt, die konstruktiv einfach aufgebaut ist und in der Praxis für die meisten Anwendungsfälle ausreichend ist.

Die Angabe über die Spalthöhen verstehen sich als Richtwerte und müssen den jeweiligen Konstruktionen angepasst werden. Beispielsweise muss bei größeren Längenausdehnungen der Welle der Stirnflächenspalt entsprechend dimensioniert werden. Eine prozentuale Skalierung der Spalthöhen mit dem Wellendurchmesser ist hingegen nicht zulässig. Bei Abweichungen von den angegebenen Richtwerten hin zu größeren Spalthöhen oder bei größeren Durchmessern steigt der Sperrluftbedarf entsprechend. Die Gefahr des Fressens in einzelnen Spaltteilen, die größer ausgeführt werden, steigt, da hier die Strömungsgeschwindigkeit der Sperrluft geringer ist und sich die Partikel dadurch leichter ablagern können. Ein generelles Versagen des Dichtsystems durch konstruktive Abweichungen von einzelnen Größen ist nicht zu erwarten, lediglich die Dichtsicherheit kann geringer werden.

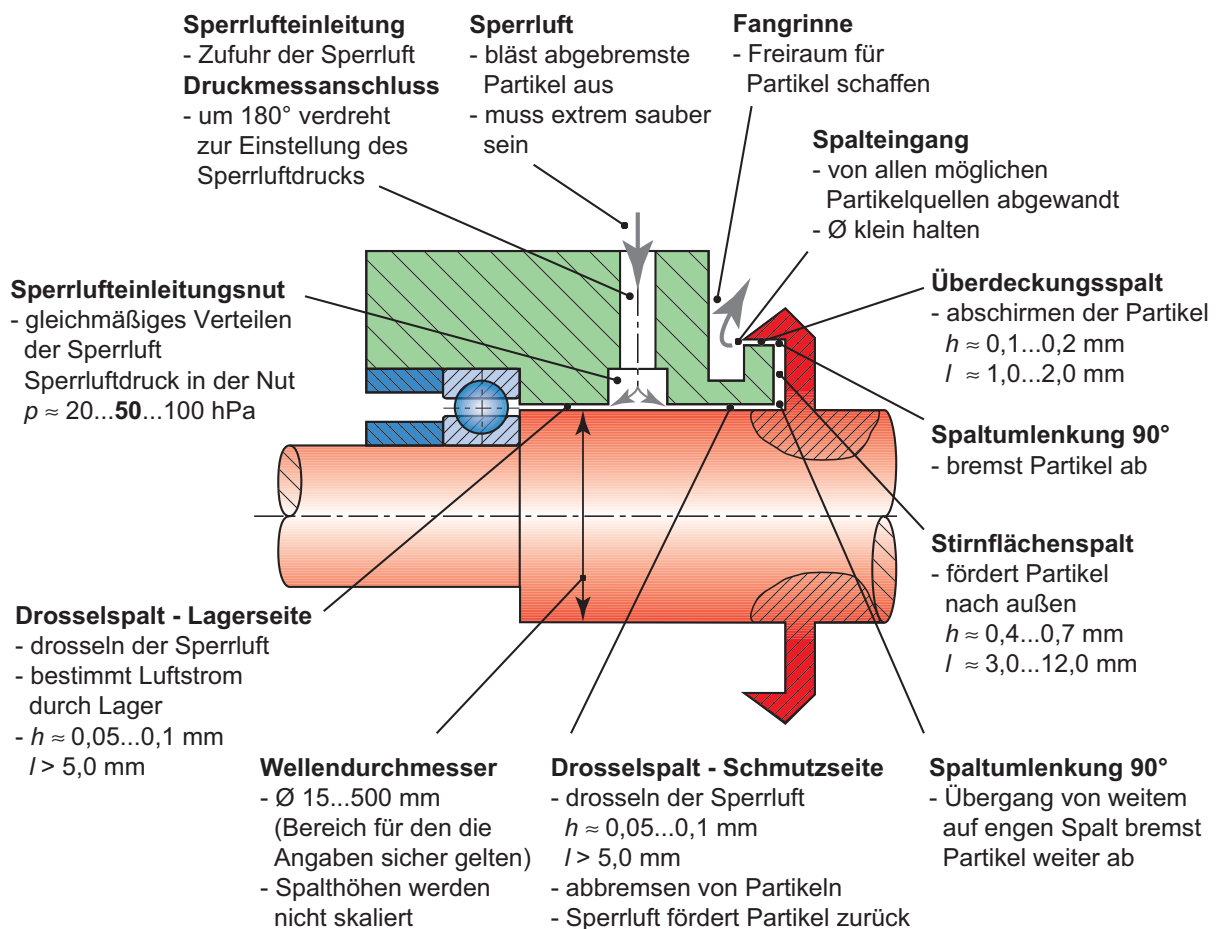


Bild 7.1 Gestaltungsmerkmale: Zusammenfassung

Ein nach den oben dargestellten Richtlinien gestaltetes Dichtsystem ist somit bestens für die berührungsfreie Abdichtung von feinen Stäuben geeignet. Es ist aber ebenso dazu geeignet dauerhaft oder auch nur temporär flüssige Medien wie Wasser, Öl, Schmutz abzudichten, siehe auch Kapitel 3.2. Derartige Dichtsysteme sind demnach recht universell einsetzbar, verschleißfrei, trockenlauffähig und können mit sehr hohen Drehzahlen betrieben werden. Der konsequente Einsatz von Sperrluft ist jedoch zwingend erforderlich.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die Vorgänge und Abläufe, die bei der Partikelabdichtung von Bedeutung sind, untersucht.

Mit Hilfe von Glasplatten wurde untersucht, wie und nach welchen Mechanismen Partikel in parallele Spalte eindringen. Es konnte gezeigt werden, dass Partikel in mehr oder weniger großer Zahl immer in offene Spalte eindringen. Hierbei spielt die Spalthöhe eine entscheidende Rolle, sowohl für die Anzahl der Partikel als auch für die Eindringtiefe. Je niedriger der Spalt, desto geringer die Partikelzahl und die Eindringtiefe. Abhängig von der räumlichen Ausrichtung des Spaltes kommt es zu mehr oder weniger starken Abrutsch- oder Rieselvorgängen. Rutschen die Partikel im Spalt nicht nach unten ab, kommt es zu einer Anhäufung von Partikeln, die dann eine Art Barriere bilden. Einzelne Partikel gelangten bei den Versuchen dennoch bis zum Ende des 50 mm langen Versuchsspaltes. Bei den Versuchen mit Minimalmengenschmierung (MMS) konnten prinzipiell die gleichen Beobachtungen gemacht werden wie bei den trockenen Partikeln, jedoch ist die Rieselfähigkeit stark eingeschränkt. Es kommt stattdessen zu einem Ver- und Ankleben der Partikel schon im Bereich des Spalteingangs, die Eindringmenge und -tiefe ist geringer.

Anhand von transparenten, rotationssymmetrischen Spalten, wie sie bei realen Dichtsystemen auftreten, konnten diese Ergebnisse bestätigt werden. Es zeigte sich auch bei diesen Versuchen mit sich, aufgrund der Rotation, bewegenden Spaltwänden, dass Partikel in die Spalte eindringen. Auch hier war die Eindringtiefe öligter Partikel in die Dichtspalte nicht so groß wie bei den trockenen Partikeln. Viel kritischer als ölige Partikel erwiesen sich trockene Partikel die in ölige Spalte eindringen und dort verkleben. Sie neigen dazu die Spalte zu füllen und können somit ein Fressen des Dichtsystems bewirken. Es wurde gezeigt, dass nur durch den Einsatz von Sperrluft Partikelansammlungen vermieden werden können.

Die verschiedenen Einflussfaktoren, die den zur Abdichtung notwendigen Sperrluftbedarf beeinflussen, wurden anhand eines „realen“ Dichtsystems aus Stahl untersucht. Dieses Dichtsystem war modular aufgebaut und erlaubte so die Variation der Spalthöhen und Spaltverläufe. Hierbei konnte gezeigt werden, dass es trotz Einsatz von großen Sperrluftströmen und damit Sperrluftgeschwindigkeiten bei glatten, offenen Ringspalten nicht möglich ist, auf kleinem Bauraum, d. h. mit kurzen Spaltlängen, die Partikel zurückzuhalten.

Bei einer überschlägigen Berechnung der strömungsmechanischen Vorgänge im Spalt bestätigten sich diese experimentellen Ergebnisse. Die kinetische Energie der Partikel in Spaltlängsrichtung muss vielmehr durch Stöße mit den Spaltwänden abgebaut werden. Dies lässt sich leicht und sicher durch Spaltumlenkungen um 90° erreichen. Bei derartigen Dichtsystemen, die beispielsweise vor dem Ringspalt einen Stirnflächenspalt aufweisen, konnte der Sperrluftstrom drastisch gesenkt werden. Partikel drangen hierbei nur in den ersten Spaltteil ein. Hinter der Spaltumlenkung fanden sich visuell keine Partikel mehr. Die Sperrluft verhindert hierbei

effektiv das Zusetzen des ersten Spaltabschnitts. Mit weiteren Spaltumlenkungen wie zum Beispiel beim überdeckten Stirnflächenspalt ließen sich noch bessere Ergebnisse erzielen.

Mit Hilfe eines Partikelzählers wurde die Menge an Leckagepartikeln bei weiteren Versuchsreihen quantitativ erfasst. Auch bei der quantitativen Auswertung der Versuche bestätigten sich die bereits besprochenen Effekte.

Zur Einschätzung der Gefährdung von Wälzlagern durch Partikel, die das Dichtsystem passieren, wurden die gefundenen Partikelzahlen in Reinheitsklassen eingestuft. Dies geschah in Anlehnung an die Norm ISO 4406, in der Ölrinheitsklassen definiert werden, die dann teilweise auch in die erweiterte Lebensdauerberechnung von Wälzlagern mit einfließen.

Es zeigte sich, dass durch günstig gestaltete Dichtsysteme bei geeignet gewählten Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel die Sperrluftversorgung, eine Gefährdung von Wälzlagern durch Partikel ausgeschlossen werden kann. Die erzielbaren Reinheitsklassen liegen im Bereich von Klasse 0, was einer Anzahl von 0 - 1 Partikel pro 100 ml Sperrluft bedeutet, die durch das Lager strömt. Als kritische Partikelmengen für die Lagerlebensdauer gelten Reinheitsklassen von 8 und höher, was einer Anzahl von 130 bis 250 Partikeln pro 100 ml entspricht.

In einem weiteren Versuchsblock wurden handelsübliche Kassettendichtsysteme untersucht und deren Eignung als Staubdichtung ermittelt. Hierbei ließ sich nur in Verbindung mit hohen Sperrluftströmen akzeptable Dichtheit erzielen.

Die Betrachtung der physikalischen Vorgänge beim Anströmen von Partikeln mit Luft, das Verhalten von Partikeln bei Stößen mit Spaltwänden sowie beim Anhaften von Partikeln an Spaltwänden wurde in einem separaten Kapitel dargestellt. Eine rechnerische Auslegung der Dichtsysteme ist jedoch aufgrund der unsicheren Randbedingungen (Partikelgröße, Form, Geschwindigkeit, etc.) nicht möglich. Die grundlegenden Erkenntnisse aus den Versuchen konnten aber dennoch bestätigt werden.

Aus diesen Erkenntnissen in Kombination mit den Erkenntnissen aus den systematischen Untersuchungen zu den Spaltformen wurden zwei spezielle Kassettendichtsysteme entworfen und untersucht. Diese zeigten im Vergleich zu den handelsüblichen Systemen eine gute Dichtwirkung bei sehr geringem Sperrluftbedarf. Bei allen Kassettendichtsystemen zeigte sich, dass für den sicheren und dauerhaften Betrieb der Einsatz von Sperrluft dringend erforderlich ist. Andernfalls kommt es zum Fressen des Dichtsystems, was durch Reibmomentsmessungen bestätigt wurde. Dies gilt allgemein für alle berührungsfreien Staubabdichtungen.

Als Quintessenz aus den durchgeführten Untersuchungen wurden Gestaltungsrichtlinien und Konstruktionshinweise erarbeitet, die dem Konstrukteur in der Praxis erlauben derartige Dichtsysteme sicher und schnell zu entwerfen und deren Möglichkeiten und Grenzen abzuschätzen. Hierzu wurden in einem eigenen Kapitel die unterschiedlichen Gestaltungs- und Betriebsbedingungen der Dichtsysteme zusammengefasst.

Offen bleibt nach wie vor die Frage, ob es möglich ist derartige Dichtsysteme auch mit anderen Sperrmedien als Sperrluft zu betreiben. Ein bekannter Ansatz ist der Einsatz von Fett als Dichtstoff bei Anwendungen mit geringeren Drehzahlen und größeren Spalthöhen. Über deren Wirkung gibt es allerdings keine gesicherten Erkenntnisse.

9 Literatur

- /1/ Schulte K.; Thamke D.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Trockenbearbeitung. In: Praxis der Trockenbearbeitung, 8.-9. März 1999 in Karlsruhe/Hrsg.: VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999
- /2/ Schmidt, J.; Doerfel O.; Fillibeck J.; Hühsam A.: Trockenbearbeitung - Die Herausforderung für die Zerspanungstechnik. In: Praxis der Trockenbearbeitung, 8.-9. März 1999 in Karlsruhe/Hrsg.: VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999
- /3/ Schmidt, J.; Lang, H.; Dyck, M.: Trockenbearbeitung ist wirtschaftlich und umweltfreundlich. In: Maschinenmarkt 107 (2001) Nr.: 29
- /4/ Wieland, P.: Ein Beitrag zur Gestaltung der Spanentsorgung bei der Trockenbearbeitung. Dissertation Technische Universität Chemnitz, 2004
- /5/ Dressler, M.; Grundlagenuntersuchungen zum Späneflug bei der Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe zur optimierten Auslegung von Späneerfassungselementen und Werkzeugen durch Simulationsrechnung. Abschlussbericht Universität Stuttgart, IfW Institut für Werkzeugmaschinen, 2006
- /6/ Schutzrecht DE 39 02 058 A1 Offenlegungsschrift, Hesse, E., Wellenabdichtungssystem, Goetze AG, Burscheid, 1990
- /7/ Schutzrecht DE 101 14 647 A1 Offenlegungsschrift, Biebrich, G., Dichtungsanordnung, DaimlerChrysler AG, Stuttgart 2002
- /8/ Schutzrecht EP 0 337 893 B1 Patentschrift, Hamman, G.; Hufnagel, W.; Fougerville, F.; Join d'étanchéité en cartouche, PROCAL, Langres, 1989
- /9/ Schutzrecht DE 103 15 370 A1 Offenlegungsschrift, Bock, E.; Klenk, T.; Pfandt, M.; Vogt, R.; Kassettendichtung, Carl Freudenberg KG, Weinheim, 2004
- /10/ Schutzrecht WO 00 / 71 912 A2 Offenlegungsschrift, Toth, D.; Tripathy, B.; Kapcoe, J.; Radial Lip Seal Having Protected Porous Dust Excluder, Federal-Mogul Corporation, Southfield, 2000
- /11/ Busak + Shamban GmbH & Co.: Dichtungen und Führungen. Katalog, 2000
- /12/ Norm DIN 3761-2:1983-11, Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge; Anwendungshinweise
- /13/ Fritz, E.; Haas, W.; Müller, H. K.: Berührungsfreie Spindelabdichtung im Werkzeugmaschinenbau, Konstruktionskatalog. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Bericht Nr.: 39, 1991

- /14/ Haas, W.: Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fanglabyrinth. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Habilitationsschrift, 1997
- /15/ Stanger, N.: Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum. Universität Stuttgart, Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Bericht Nr. 55
- /16/ Würthner, M.: Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2003
- /17/ Stiegler, B.: Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2005
- /18/ Norm DIN 69002-1, Werkzeugmaschinen - Kurzspindeln, Ausgabe:2001-07
Teil 1: Allgemeine Beschreibung, Grundlagen
Teil 2: Maße und Teilelisten, Bezeichnung
Teil 3: Einzelteile
- /19/ Schutzrecht DE 35 44 783 A1 Offenlegungsschrift, Müller, H.K.; Wellendichtung, Müller, K.H., Waiblingen, 1987
- /20/ Schutzrecht DE 36 17 863 A1 Offenlegungsschrift, Müller, H.K.; Haas, W.; Spritzring-Labyrinthdichtung, Müller, K.H., Waiblingen, 1987
- /21/ Schutzrecht DE 35 35 445 A1 Offenlegungsschrift, Deuring, H.; Wellenabdichtungssystem, Goetze AG, Burscheid, 1987
- /22/ Schutzrecht US 5 975 533 A1 Offenlegungsschrift, Hubbard, P.; Fisher, K.; Sklute, A.; Labyrinth-Type Seal For Railway Car Journal Bearing, Petersburg, 1999
- /23/ Schutzrecht DE 39 30 280 A1 Offenlegungsschrift, Biesold, W.; Merz, S.; Berührungslose Dichtung, SKF GmbH, Schweinfurt, 1991
- /24/ Schutzrecht US 4 332 310 A1 Offenlegungsschrift, Kazuhiro, J.; Enomoto, H.; Device For Preventing Intrusion Of Water, Dust, Etc. Into Drim Brake, Tokyo, 1980
- /25/ Schutzrecht US 3 893 674 A1 Offenlegungsschrift, Paradine, T.; Non-Frictional Closure For Excluding Of Contaminants, Pittsburg, 1975
- /26/ Schutzrecht JP 58 046 266 A1 Offenlegungsschrift, 1981
- /27/ Garant: Handbuch Zerspanung, Ausgabe Kat. 32, Firmenschrift
- /28/ Werkstoffdatenblatt Fa. Eckert
- /29/ Wahler, M.: Schmierung bestimmt die Lebensdauer, Antriebs Praxis 01/2006
- /30/ Einfluß von Fremdpartikeln in Wälzlagern und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung : Literatúrauswertung und technische Marktstudie ; [Abschlußbericht] ; Berichtszeitraum: 1989 - 90 ; Forschungsvorhaben Nr. 179 "Partikelschäden" / Verf.: H. Werries. - Frankfurt/M. : FVA, 1992
Schriftenreihe: Forschungsheft / Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. ; 353

- /31/ Pall Technische Informationen; Ölpflege mit System: Bedeutung der Verschleißschutzfiltration, Pall GmbH Industrie Hydraulik, Firmenschrift: PGH TH1b , 2000
- /32/ Partikelüberrollung : Steigerung der Gebrauchsdauer von wälzbeanspruchten Bauteilen unter verschmutztem Schmierstoff ; Abschlußbericht ; Forschungsvorhaben Nr. 336 / Verf.: Doris Günther. - Frankfurt/M. : FVA, 2002
Schriftenreihe: Forschungsheft / Forschungsvereinigung Antriebstechnik ; 651
- /33/ Pall Handbuch; Pall GmbH Industrie Hydraulik, Firmenschrift: PGH TH1b, 2007
- /34/ Wiendl, S. B.: Mikrotribologische Untersuchungen an fettgeschmierten Wälzlagern, Universität Hannover, Dissertation, 2005
- /35/ Zabel, W.; Einfluss von Oxidationsinhibitoren auf das Betriebsverhalten fettgeschmierter Wälzlager, Hochschulschrift: Hannover, Univ., Diss., 2005
- /36/ Wälzlagerschäden: Schadenserkennung und Begutachtung gelaufener Wälzlager, FAG OEM und Handel AG, Firmenschrift, 1996
- /37/ Aßmann, C.: Partikelfresser Unkonventionelle Möglichkeiten zur Minderung von schädlichen Partikeln in Getriebeschmierstoffen, FVA Forschungsvorhaben Nr. T 970, Heft 803, 2006
- /38/ Norm DIN ISO 281: 2006-11; Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO/DIS 281:2005)
- /39/ Schäffler KG: INA FAG Wälzlager, Kugellager - Rollenlager - Gehäuse - Zubehör. Schäffler KG, Firmenschrift, 2006
- /40/ Norm ISO 4406: 1999-12; Fluidtechnik-Hydraulik-Druckflüssigkeiten - Zahlenschlüssel für den Grad der Verschmutzung durch feste Partikel
- /41/ Pall GmbH Industrie - Hydraulik / FAG: Broschüre - Berechenbare Wirtschaftlichkeit und Sicherheit. Dreieich, Schweinfurt, Firmenschrift, 2000
- /42/ Flüssiges Gold : Fluidmanagement, der Schlüssel zur vorbeugenden Instandhaltung von Spritzgießmaschinen / Klaus Lange. - 2., völlig neu bearb. und erw. Aufl. - Heidelberg : Hüthig, 2003
- /43/ Pall GmbH Machinery and Equipment, Beispiele für Ölrreinheitsklassen, PGH-RKc, Firmenschrift, 2002
- /44/ Würthner, M.: Arbeitsfortschrittsbericht 1999
- /45/ GMN - Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG: Berührungslose Dichtungen. Katalog Nr.: 8051, Firmenschrift, 2001
- /46/ NILOS Ziller GmbH & Co. KG: NILOS - Ring, Metallische Dichtungen für Wälzlager. Katalog, Firmenschrift, 2001
- /47/ INPRO - Seal Company: Lagerdichtungen für die Werkzeugmaschinenbranche, Firmenschrift

- /48/ SKF GmbH: Interaktiver SKF Lagerungskatalog, <http://skfiec.skf.com/3d.htm>, 2007
- /49/ Garlock Sealing Technologies: Klosure Oil Seals & Bearing Isolators, Bearing Isolator Family, Firmenschrift, 2000
- /50/ Garlock Sealing Technologies: The Garlock Equalizer, Firmenschrift, 2001
- /51/ Garlock Sealing Technologies: Klosure Oil Seals & Bearing Isolators, Technical Manual, Firmenschrift, 2000
- /52/ Galock Sealing Technologies: Iso Gard Family of Bearing Isolators, Firmenschrift, 2000
- /53/ Garlock Sealing Technologies: Klosure Oil Seals & Bearing Isolators, Iso - Gard GP Bearing Isolator, Firmenschrift, 2001
- /54/ Parker: ProTech Bearing Isolators, Catalog EPS 5275/USA, Firmenschrift, 2006
- /55/ Flowserve Corporation, Flow Solutions Devision, Firmenschrift, 2000
- /56/ Wassen, E.: Entwicklung paralleler Algorithmen zur numerischen Simulation von Gas-Partikel-Strömungen unter Berücksichtigung von Partikel-Partikel-Kollisionen. Dissertation Universität Chemnitz, 1998
- /57/ Frank, T.: Numerische Berechnung der feststoffbeladenen Gasströmung im horizontalen Kanal unter Berücksichtigung von Wandrauigkeiten. Dissertation Bergakademie Freiberg, 1992
- /58/ Vollheim, R.: Pneumatischer Transport - Beitrag zu Theorie und Anwendung feststoffbeladener Gasströmungen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1971
- /59/ Froschmeier, T.; Bestimmung des c_w -Wertes von Holzpartikeln aus spanenden Bearbeitungsverfahren. Studienarbeit Universität Stuttgart, IfW Institut für Werkzeugmaschinen, 2001
- /60/ Dressler, M.; Froschmeier, T.: Bestimmung des c_w - Wertes von Holzpartikeln aus spanenden Bearbeitungsverfahren. Studienarbeit Universität Stuttgart, Teil des Forschungsthemas: Auslegung von Absaugkanten bezüglich der Späneerfassung durch Simulationsrechnung (BMW/ AiF- Nr.12311).
- /61/ Kussin, J.; Experimentelle Studien zur Partikelbewegung und Turbulenzmodifikation in einem horizontalen Kanal bei unterschiedlichen Wandrauigkeiten. Dissertation Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät - Fachbereich Ingenieurwissenschaften, 2004
- /62/ Weigl, B.; Trennkkräfte zwischen Mikroorganismen, Partikeln und Oberflächen. Dissertation Technische Universität München, 2004
- /63/ Hogeckamp, S. H.; Über eine modifizierte Strahlagglomerationsanlage zur Herstellung schnell dispergierbarer Pulver. Dissertation Technische Universität Karlsruhe, 1997
- /64/ Heinlein, M.; Strömungsmechanik und Wärmeübergang in einer kontinuierlich betriebenen Wirbelschicht zur thermischen Behandlung feinsten Partikel. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 2003

/65/ Müller, H. K.: Dichtungstechnik, Abdichtung bewegter Maschinenteile, Kurzfassung.
Waiblingen: Medienverlag U. Müller, 1995

Lebenslauf

Name: Jochen Orso
Geburtsdatum, -ort: 28.02.1972, Reutlingen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig
Eltern: Emil Orso
Hannelore Orso, geb. Pagels

Schulbildung:

08.1978 - 06.1982 Eduard-Spranger-Schule, Grundschule, Reutlingen
08.1982 - 07.1991 Johannes-Kepler-Gymnasium, Reutlingen

Zivildienst:

10.1991 - 12.1992 Gustav Werner Stiftung zum Bruderhaus, Reutlingen

Studium:

10.1992 - 06.2000 Studium an der Universität Stuttgart
Abschluss: Dipl.-Ing. Maschinenbau, Diplomprüfung: 29.06.2000
Hauptfächer: Konstruktionslehre, Kunststoffkunde
10.1993 - 06.2000 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Maschinenelemente

Beruf:

07.2000 - 12.2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart,
Bereich Dichtungstechnik
seit 01.2005 Applikationsingenieur bei der Firma Modine Europe GmbH
in Filderstadt-Bonlanden

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
3	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 zu 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 Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtungen
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-Wellendichtungen
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;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
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 Mehrkoordinatentastlers
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. Borenius	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;	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
	H.K. Müller	

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 Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
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 Qualitätssysteminformationssystems 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 Getriebelastkollektiven 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 Außenzahnpumpen 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

