

Martin Janßen

# **Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen**

**D 93**  
**ISBN 3 - 936100 – 17 – 9**

**Institut für Maschinenelemente**

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
70569 Stuttgart  
Tel. (0711) 685 – 6170

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

# **Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen**

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

Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Martin Janßen  
geboren in Böblingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Uwe Heisel

Tag der Einreichung: 11. Mai 2005  
Tag der mündlichen Prüfung: 11. Oktober 2005

Institut für Maschinenelemente  
2005



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Die Untersuchungen waren Teil eines durch die Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V. (FWF) geförderten Forschungsprojekts.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas, Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am IMA, für die Ermöglichung dieser Arbeit, für seine menschliche und fachliche Unterstützung, sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Uwe Heisel, Ordinarius und Direktor des Instituts für Werkzeugmaschinen, danke ich für sein Interesse, für die Durchsicht der Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Meinem Mitstreiter im Projekt, Herrn André Gütlein, danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit, für seine Hilfsbereitschaft und für seine freundschaftliche Verbundenheit während unserer gemeinsamen Zeit am Institut.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Martin Lambert für das Wissen und die Fähigkeiten, die er mir vermittelt hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei den wissenschaftlichen Hilfskräften, den Studien- und Diplomarbeitern, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes bedanke ich mich für Ihre Unterstützung und das stets ausgezeichnete „IMA-Klima“.

Meinen Eltern und Alice Ackermann danke ich ganz besonders herzlich für die Unterstützung und das Verständnis während der letzten Jahre.

Stuttgart, im Oktober 2005

Martin Janßen



# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhalt</b> .....   | <b>I</b>  |
| <b>Bezeichnungen und Formelzeichen</b> .....                            | <b>IV</b> |
| <b>1 Einführung</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1 Stand der Technik .....   | 2         |
| 1.2 Abstreiferleisten, Abstreiferstirnplatten und Längsabstreifer ..... | 8         |
| 1.3 Struktur und Ziel der vorliegenden Arbeit .....                     | 9         |
| <b>2 Prüfeinrichtungen</b> .....  | <b>11</b> |
| 2.1 Prüfstand .....   | 11        |
| 2.2 Kraftmess-Einrichtung (KME) .....                                   | 13        |
| 2.3 Zustell-Einrichtung I.....  | 14        |
| 2.4 Führungswagen-Haltevorrichtung (FHV) .....                          | 14        |
| 2.5 Partikeldosier- und Zuführeinheiten (PDZ I, PDZ II).....            | 16        |
| 2.6 Ölkreislauf .....   | 16        |
| 2.7 Video-Ausrüstung.....   | 17        |
| <b>3 Versuchsprogramm</b> .....   | <b>20</b> |
| 3.1 Profilanalyse der Abstreifer-Querschnitte .....                     | 20        |
| 3.2 Normalkraftmessungen (statisch) .....                               | 23        |
| 3.3 Reibkraft und Normalkraftmessungen.....                             | 24        |
| 3.3.1 Reib und Normalkraftmessungen an Abstreiferleisten .....          | 24        |
| 3.3.2 Reibkraftmessungen an Abstreiferstirnplatten .....                | 26        |
| 3.3.3 Reib und Normalkraftmessungen an Längsabstreifer .....            | 27        |
| 3.4 Untersuchungen zur Schmierstoffleckage .....                        | 28        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.4.1    | Leckage an Abstreiferleisten und -stirnplatten .....                      | 29        |
| 3.4.2    | Schmierstoffleckage an Längsabstreifern .....                             | 30        |
| 3.5      | Abdichtung von Feststoffen .....  | 32        |
| 3.5.1    | Untersuchungen zum Feststoffeintrag an Abstreiferleisten .....            | 33        |
| 3.5.2    | Untersuchungen zum Feststoffeintrag an Abstreiferstirnplatten .....       | 34        |
| 3.5.3    | Untersuchungen zum Feststoffeintrag an Längsabstreifern.....              | 35        |
| 3.6      | Aufbereitung der Video-Aufnahmen.....                                     | 37        |
| <b>4</b> | <b>Werkstoffvarianten .....</b>   | <b>38</b> |
| 4.1      | Konturenvergleich .....   | 38        |
| 4.2      | Vorspannweg- Normalkraftmessung (statisch) .....                          | 39        |
| 4.3      | Reib und Normalkraftmessungen .....                                       | 40        |
| 4.3.1    | Trockenreibung- und Normalkraftmessung .....                              | 41        |
| 4.3.2    | Nassreibung- und Normalkraftmessung.....                                  | 43        |
| 4.4      | Leckage.....  | 45        |
| 4.5      | Abdichtung von Feststoffen .....  | 46        |
| 4.6      | Fazit der Untersuchungen zur Variation des Werkstoffes .....              | 48        |
| <b>5</b> | <b>Hilfsmaßnahmen zur Abdichtung von Werkzeugmaschinenführungen .....</b> | <b>49</b> |
| 5.1      | Abstreifer 44 mit vorgeschalteter Sperrlufteinheit.....                   | 49        |
| 5.2      | Abstreifer 44 mit Ölspülung.....  | 51        |
| 5.3      | Mehrfachanordnung von Abstreifern .....                                   | 53        |
| 5.4      | Fazit .....   | 56        |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse an Abstreiferstirnplatten .....</b>                         | <b>57</b> |
| 6.1      | Profilschnitte und Durchlichtaufnahmen.....                               | 57        |
| 6.2      | Reibkraftmessungen .....  | 67        |
| 6.2.1    | Trockenreibung .....  | 68        |
| 6.2.2    | Nassreibung und Beurteilung der Schmierstoffleckage.....                  | 70        |
| 6.3      | Untersuchungen zum Feststoffeintrag.....                                  | 73        |
| 6.4      | Fazit .....   | 76        |
| <b>7</b> | <b>Entwicklung neuer Abstreiferstirnplatten.....</b>                      | <b>78</b> |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>8</b>  | <b>Ergebnisse neuer Abstreiferstirnplatten .....</b>      | <b>86</b>  |
| 8.1       | Konturenvergleich .....                                   | 86         |
| 8.2       | Profilanalyse .....                                       | 87         |
| 8.3       | Reibkraftmessungen .....                                  | 94         |
| 8.4       | Untersuchungen zum Feststoffeintrag .....                 | 97         |
| 8.5       | Einfluss der Gegenlauffläche.....                         | 100        |
| 8.6       | Fazit .....   | 102        |
| <b>9</b>  | <b>Längsabstreifer .....</b>                              | <b>103</b> |
| 9.1       | Reib- und Normalkraftmessungen.....                       | 104        |
| 9.1.1     | Trockenreibung- und Normalkraftmessung .....              | 104        |
| 9.1.2     | Nassreibung und Normalkraftmessung .....                  | 107        |
| 9.2       | Vergleich Längsabstreifer und Radialwellendichtring ..... | 109        |
| 9.3       | Schmierstoffleckage.....                                  | 111        |
| 9.4       | Feststoffeintrag .....                                    | 115        |
| 9.5       | Fazit und Gestaltungsregeln bei Längsabstreifern.....     | 119        |
| <b>10</b> | <b>Hinweise für die praktische Anwendung .....</b>        | <b>122</b> |
| <b>11</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>                              | <b>125</b> |
| <b>12</b> | <b>Abstract .....</b>                                     | <b>126</b> |
| <b>13</b> | <b>Literatur .....</b>                                    | <b>128</b> |

# Bezeichnungen und Formelzeichen

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| 2D-   | 2 dimensionale-                       |
| 3D-   | 3 dimensionale-                       |
| APS   | Abstreifer Prüfstand                  |
| DMS   | Dehnungs-Meßstreifen                  |
| FEA   | Finite-Elemente-Analyse               |
| FEM   | Finite-Elemente-Methode               |
| FHV   | Führungswagenhaltevorrichtung         |
| FPM   | Fluor-Kautschuk                       |
| FVA   | Forschungsvereinigung Antriebstechnik |
| FWE   | Führungswageneinheit                  |
| KME   | Kraftmess-Einrichtung                 |
| NBR   | Acrylnitril-Butadien-Kautschuk        |
| PDZ   | Partikeldosier- und Zuführeinrichtung |
| PC    | Personal Computer                     |
| PE    | Polyethylen                           |
| PU    | Polyurethan-Elastomer, Polyurethan    |
| RGB   | Red Green Blue Signal                 |
| RWDR  | Radialwellendichtring                 |
| SPS   | Speicherprogrammierbare Steuerung     |
| S-VHS | Super Video Home System               |
| TPE   | Thermoplastische Elastomere           |
| TPU   | Thermoplastische Polyurethan          |

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| $F_N$    | Normalkraft              |
| $F_R$    | Reibkraft                |
| $R$      | Eck-Radius am Abstreifer |
| $R_a$    | Mittenrauhwert           |
| $R_z$    | gemittelte Rautiefe      |
| $s_v$    | Vorspannweg              |
| $v_i$    | Geschwindigkeit i        |
| $w_i$    | Pressungsgradient i      |
| $\mu$    | Reibwert                 |
| $\eta$   | Viskosität               |
| $\sigma$ | Spannung                 |



# 1 Einführung

Schnelligkeit, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit sind Anforderungen an eine moderne Werkzeugmaschine. Inwieweit diese Bedingungen erfüllt werden, hängt von der Güte der eingesetzten Komponenten ab. Präzise Führungen sind die Voraussetzung für eine genaue Positionierung und exakte Schnitt- und Vorschubbewegungen. Um genaue Werkstücke zu erzielen sind nach /1/ folgende Eigenschaften an Führungen notwendig:

- geringe Reibung und Stick-Slip-Freiheit als Voraussetzung für exaktes Positionieren mit geringen Vorschubkräften
- geringer Verschleiß und Sicherheit gegen Fressen, damit die Genauigkeit über lange Zeit erhalten bleibt
- hohe Steifigkeit und geringes Führungsspiel bzw. Spielfreiheit, um die Lageveränderung der geführten Bauteile unter Last gering zu halten
- gute Dämpfung in Trag- und Bewegungsrichtung, um Überschwingungen der Vorschubantriebe und Ratterneigung der Werkzeugmaschine zu vermeiden

Diese Anforderungen lassen sich durch die entsprechende Materialauswahl und eine beanspruchungsgerechte Gestaltung erfüllen. Damit die Führungen über lange Zeit genau und leichtgängig bleiben, sind spezielle Maßnahmen zu treffen. Dies sind bei Gleit- und Wälzführungen zum einen eine ausreichende Schmierung, zum anderen muss der Eintrag von Fremdstoffen in die Führung vermieden werden. Analysen an Profilschienenführungen haben gezeigt, dass schon nach relativ kurzer Einsatzdauer Ausfälle auftreten können. Als Ursache wurden die mangelhaften Abdichtungen an den Stirnseiten der Führungswagen, also die Abstreifer, angesehen:

- Schmutz und Fremdflüssigkeiten dringen in großem Maße in den Führungsbereich ein. Verschleiß, Klemmen der Führungen, Ruckgleiten, Genauigkeitsverlust, Schwingungen, mangelhafte Werkstück-Oberflächen und verminderte Lebensdauer sind die Folgen
- Schmierstoff tritt nahezu ungehindert aus, wodurch die eingesetzten Kühlschmierstoffe, bzw. die Umgebung verunreinigt werden. Mangelschmierung der Gleit- bzw. Wälzpartner, unnötig hohe Betriebskosten und Entsorgungskosten von Abfallstoffen sind die Folge

- Kühlschmierstoff, Schmutz und Schmierstoff verbinden sich zu chemisch aggressiven Mischungen, die zu erheblicher Korrosion führen können.

Fast ohne Ausnahme wird die Lebensdauer einer Linearführung durch Mangelschmierung oder Kontamination begrenzt. Schutzvorrichtungen wie Teleskopabdeckungen, Faltenbälge oder Rollos sollen die Führungen vor groben Verunreinigungen, anspritzenden Kühlschmierstoffen und mechanischer Beschädigungen schützen. Allerdings können sie nicht vermeiden, dass kleine Partikel, Staub, Fasern und Kühlschmierstoffe auf die Führungsbahn gelangen.

Die Fertigung klassischer Gleit- und Wälzführungen war bis vor einiger Zeit durch einen sehr hohen Eigenfertigungsgrad der Werkzeugmaschinenhersteller gekennzeichnet. Heute werden größtenteils Profilschienenführungen unterschiedlicher Baugrößen eingesetzt. Der Einsatz von Profilschienenführungen macht den Bau von vergleichsweise kompakten und leichten Werkzeugmaschinen-Baugruppen möglich. Auf diese Weise konnten Massen reduziert werden, was letztendlich der Dynamik und der Reduzierung von Nebenzeiten zugute kommt, /2/.

Ein wichtiger Punkt bei der Entwicklung neuer Profilschienenführungen ist die Wartungsfreiheit. Ziel ist es, mit einer einmaligen Schmierung des Systems im Neuzustand auszukommen und über die gesamte Lebensdauer der Führung nicht mehr nachschmieren zu müssen. Der Anschluss einer Zentralschmierung wäre nicht mehr notwendig. Dazu werden verschiedene Ansätze verfolgt. Die Kugelkette, Ölreservoir, Ölmengenregulatoren und Schmierölgeber sind Ergebnisse dieser Bemühungen. Der Ansatz der Initialschmierung steht und fällt allerdings mit einem funktionierenden Dichtsystem, /3/ - /8/.

## 1.1 Stand der Technik

Der Umfang an Forschungsarbeiten zum Thema Abstreifer für Führungen ist sehr gering. Die wenigen Literaturstellen, die das Thema Abstreifer beinhalten, erwähnen die Abdichtung von Linearführungen häufig nur am Rand. Viele Arbeiten beschäftigen sich mit der Statik und Dynamik von Führungen, /9/ - /10/. In /11/ wird der Einfluss der Reibung der Abstreifer auf die Verschiebekraft des Führungswagens untersucht. In /1/ und /12/ - /14/ werden verschiedene Ausführungen von Abstreifern beschrieben, allerdings ohne Aussagen über deren Wirksamkeit zu machen. /15/ vergleicht den Verschleiß der Führungsbahn beim Einsatz verschiedener Abstreifer. Der Einfluss des Abstreifers auf den Schmierfilmaufbau wird in /16/ und /17/ geschildert. In /18/ wird behauptet, dass PU-Abstreifer einen guten Schutz der Führung vor Verschleiß bieten, allerdings ohne auf die Gestaltung des verwendeten Abstreifers näher einzugehen. Patentschriften enthalten entweder Hinweise auf die konstruktive Gestaltung der Befestigung des Abstreifers oder beziehen sich auf Abstreifer für Teleskopabdeckungen /19/-/23/.

Über Abstreifer für Linearführungen liegen bis auf /24/ keine dichtungstechnisch fundierten Erkenntnisse vor. Sie sind funktionell artverwandt mit den Stangendichtungen in Hydraulikzylindern. Für den Sonderfall der Abdichtung drucklosen Hydrauliköls sind die Bedingungen und Aufgaben ähnlich, zumindest was den Ein- und Austrag von Flüssigkeiten betrifft. In /25/ wird über die Wirksamkeit von Abstreifern an Hydraulikzylindern berichtet, dabei wird hauptsächlich der Partikeleintrag in das Hydrauliksystem beim Betrieb mit und ohne Abstreifer gegenübergestellt. In /26/ -/31/ werden unterschiedliche Abstreifer für Hydraulikzylinder vorgestellt und die Anforderungen an diese benannt. Lediglich in /26/ wird auf die Auswirkungen unterschiedlich gestalteter Dichtlippen an Abstreifern eingegangen.

Über das Verhalten von Hydraulikstangendichtungen gibt es grundlegende Untersuchungen. Die Aussage über den Wirkungsmechanismus der Stangendichtungen kann auf die Abstreifer übertragen werden. Grundlage ist die Beschreibung der Schmierfilmbildung im Dichtspalt. Die in /32/ vorgestellte "inverse hydrodynamische Theorie" befasst sich mit der hydrodynamischen Schmierung zwischen einer flexiblen und einer festen Spaltbegrenzungsfläche. Ausgehend von der Reynoldsschen Differentialgleichung für eindimensionale, laminare, inkompressible und isoviskose Strömung wird die Höhe des Schmierpales bei einem vorgegebenen Pressungsverlauf ermittelt. Die folgenden Aussagen beziehen sich nur auf die Abdichtung von Flüssigkeiten. Feststoff-Flüssigkeitsgemische werden hier nicht berücksichtigt.

Eine mit Flüssigkeit benetzte oder überflutete Oberfläche schleppt diese mit sich. Die Aufgabe der Dichtung besteht darin, diese Flüssigkeit von der Oberfläche abzustreifen und im Flüssigkeitsraum zu halten. Durch die Adhäsion der Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche und der Kohäsion der Flüssigkeitsmoleküle untereinander, wird aber immer ein mehr oder weniger dicker Flüssigkeitsfilm unter der Dichtlippe hindurchgeschleppt. Der Flüssigkeitstransport durch den Dichtspalt bei gegebenen Betriebsbedingungen wird nur von der größten Steigung des Pressungsverlaufs in Bewegungsrichtung zwischen Dichtlippe und Gleitfläche beeinflusst. Aus den folgenden Gleichungen geht der Einfluss der Geschwindigkeit bzw. der Viskosität der abzudichtenden Flüssigkeiten hervor, /27/:

$$h_1 = \sqrt{\frac{2 \eta_a v_1}{9 w_1}} \quad \text{für die schmierstoff-abstreifende Bewegung} \quad (1.1)$$

mit  $\eta_a$  = Viskosität des Schmiermittels

$$h_2 = \sqrt{\frac{2 \eta_b v_2}{9 w_2}} \quad \text{für die fremdflüssigkeit-abstreifende Bewegung} \quad (1.2)$$

mit  $\eta_b$  = Viskosität der Fremdflüssigkeit

Bewegt sich der Abstreifer im Bild 1 mit der Geschwindigkeit  $v_1$ , so bestimmt der größte Pressungsgradient  $w_1$  die maximal unter dem Abstreifer nach außen geschleppte Schmierfilmdicke  $h_1$ . Unter der Dichtlippe wird bei der Bewegungsrichtung  $v_1$  immer ein mehr oder weniger dicker Schmierstoff-Film  $h_1$  hindurchgeschleppt. Dieser Film kommt zwangsläufig mit den Umgebungsstoffen in Berührung. Steht auf der Innenseite sehr wenig Schmierstoff zu Verfügung, so wird der Schmierfilm  $h_1$  allerdings durch den Schmierstoffmangel und nicht durch den maximalen Pressungsgradienten  $w_1$  bestimmt.

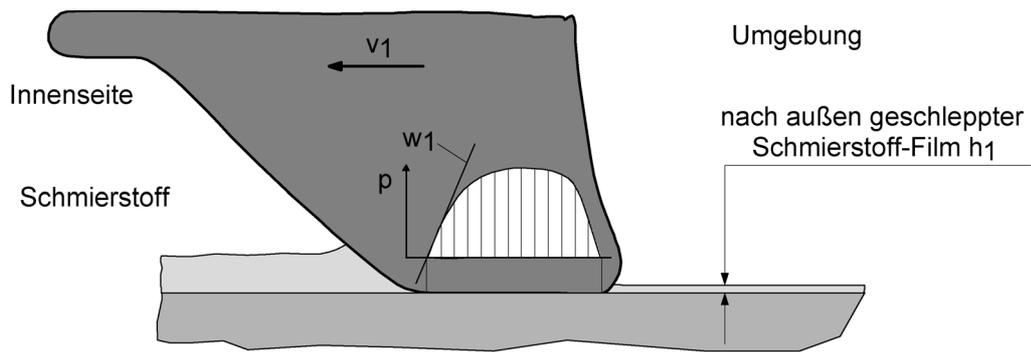


Bild 1: Ausgeschleppter Schmierstofffilm

Fremdflüssigkeiten sind in der Werkzeugmaschine im Regelfall Kühlschmierstoffe. Diese dürfen nicht in das Innere der Führung eingeschleppt werden. Prinzipbedingt kann diese Forderung nur eingeschränkt erfüllt werden. Der nach Gleichung (1.2) eingeschleppte Flüssigkeitsfilm kann nicht vermieden werden. Die Viskosität  $\eta_b$  und die Geschwindigkeit  $v_2$  können kaum beeinflusst werden. Zur bestmöglichen Abdichtung muss deshalb der Pressungsgradient  $w_2$  möglichst groß sein. Unter Umständen wird, abhängig vom Gradienten  $w_2$ , mit der Fremdflüssigkeit auch ein Teil des Schmierstoff-Films  $h_1$  auf der Außenseite abgestreift. Damit der Schmierstoff-Verlust klein bleibt, muss der Pressungsgradient  $w_1$  möglichst groß sein. Auch hier stehen die Parameter Viskosität  $\eta_a$  und Geschwindigkeit  $v_1$  zur Minimierung der Schmierstoff-Filmstärke nicht zur Verfügung.

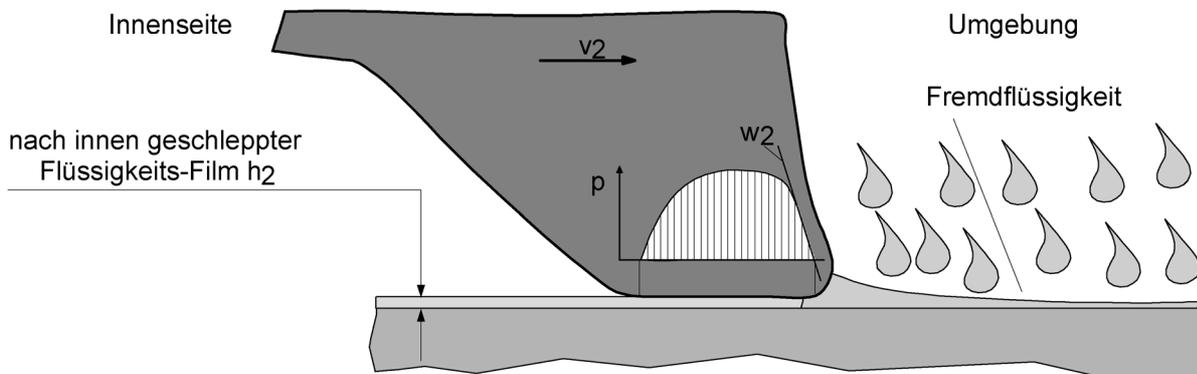


Bild 2: Eingeschleppter Flüssigkeitsfilm

Bei gleicher Geschwindigkeit und gleicher Viskosität gilt:

- Falls  $w_1 < w_2 \rightarrow h_1 > h_2$ , dies führt zum Austrag von Schmierstoff, also zu Leckage
- Falls  $w_1 > w_2 \rightarrow h_1 < h_2$ , dies führt zum Eintrag von Fremdflüssigkeit

Idealerweise sollten, sofern der Schmierfilm auf der Außenseite nicht teilweise abgestreift wird, die Gradienten  $w_1$  und  $w_2$  gleich groß sein. Damit der Austausch von Flüssigkeit minimal ist, müssen beide Gradienten möglichst groß sein.

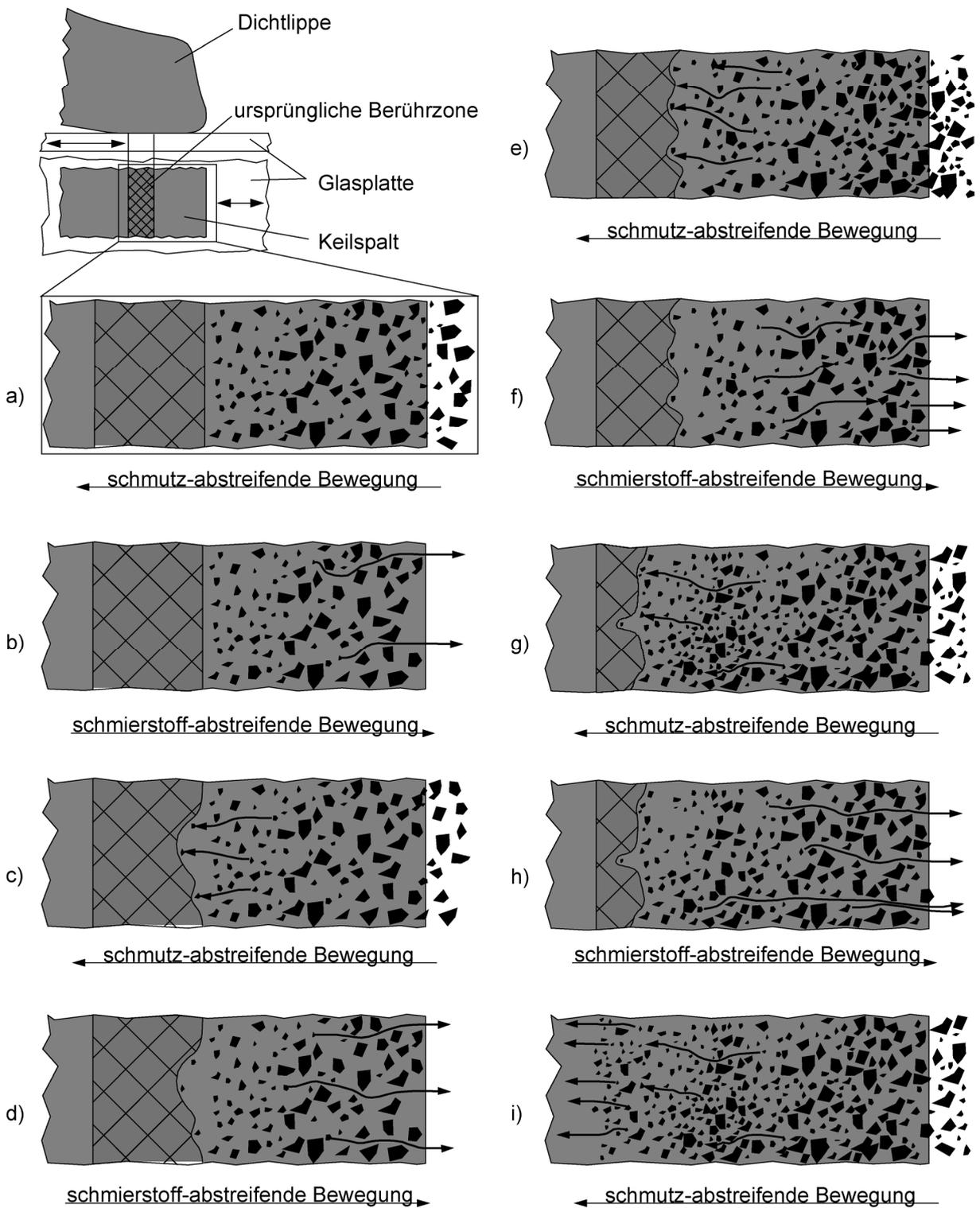


Bild 3: Durch Partikel unterbaute Dichtlippe

Die Untersuchung einer Vielzahl von handelsüblichen Abstreiferleisten in /24/ ergibt ein genaues Bild verschiedener Mechanismen, die zum Eintrag fester Fremdstoffe in den geschmierten Bereich der Führung führen können. An vielen der untersuchten Abstreifer waren zur Schmutzseite geöffnete, flache Keilspalte vorhanden. Die im Bild

3 dargestellte, schmutz-abstreifende Dichtlippe liegt nur an den mit Berührzone bezeichneten Stellen auf. Durch den zur Schmutzseite hin geöffneten Keilspalt werden bei der schmutz-abstreifenden Bewegung Partikel unter die Dichtlippe transportiert. Bei der ersten schmutz-abstreifenden Bewegung a) werden die Partikel unter die Dichtlippe in den Bereich des Keilspaltes geschleppt. Nur relativ kleine Partikel dringen bis zur ursprünglichen Berührzone vor. Beim Einschleppen der Partikel verklemmen sich diese zwischen der Dichtlippe und der abzustreifenden Gegenfläche und werden bei der anschließenden schmierstoff-abstreifenden Bewegung b) durch die Elastomer-Dichtlippe teilweise festgehalten. Während der nächsten schmutz-abstreifenden Bewegung c) werden die bereits schon eingeklemmten Partikel weiter in den Keilspalt gezogen, wodurch die Dichtlippe an der ursprünglichen Berührzone den Kontakt zur abzustreifenden Gegenfläche teilweise verliert. Dorthin werden dann die ersten, relativ kleinen Partikel eingeschleppt und verklemmen sich ebenfalls zwischen Dichtlippe und abzustreifender Gegenfläche. Die weiteren Hin- und Herbewegungen führen zum Unterbauen der Dichtlippe, wodurch die ursprüngliche Berührzone schwindet. Schließlich stützt sich die Dichtlippe i) nur noch auf den eingeklemmten Partikeln ab und hat keinen Kontakt mehr zur abzustreifenden Gegenfläche. Bei jeder schmutz-abstreifenden Bewegung werden dann Partikel zur Innenseite des Systems hindurchgeschleust. Bei jeder schmierstoff-abstreifenden Bewegung werden die zwischen den eingeklemmten Partikeln befindlichen, kleineren Teilchen wieder teilweise ausgespült und zur Schmutzseite transportiert. Dies ist gleichzeitig mit großer Schmierstoff-Leckage verbunden.

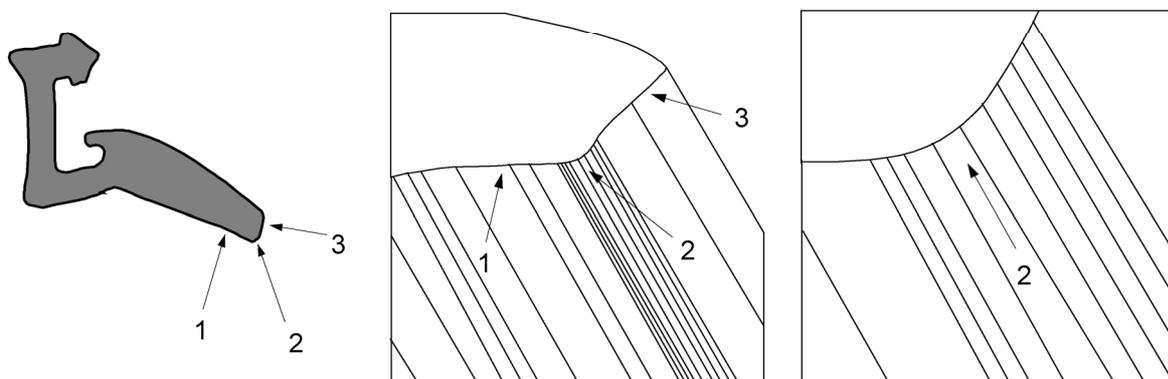


Bild 4: Dichtlippe mit Längsriefen

Mangelhafte Oberflächen der Dichtlippe führen ebenfalls zum erhöhten Feststoffeintrag, Bild 4. Die eingezeichneten Pfeile ermöglichen die Zuordnung der Fotos und der Grafiken zum links abgebildeten Abstreifer-Querschnitt. Die mit 2 markierte Stelle zeigt deutliche Längsriefen, genau in dem Bereich, der in eingebautem Zustand an der abzustreifenden Gegenfläche anliegt. In diesen Riefen lagern sich bei der Feststoff-Beaufschlagung Partikel ein. Das führt ebenfalls zum oben beschriebenen Unterbauen der Dichtlippe.

Ungeeignete Befestigung und fehlende Profilstabilität wirken sich erwartungsgemäß auch negativ auf die Abdichtung von Feststoffen aus. Eine unsachgemäße Befestigung mit Schrauben kann den Dichtkörper aus Elastomer so wellig verformen, dass er nicht

gleichmäßig über der gesamten Länge anliegt. So kann es passieren, dass einige Abschnitte der Dichtlippe völlig undicht sind, während direkt danebenliegende Abschnitte keinen merklichen Feststoff-Eintrag erkennen lassen.

An anderen Abstreifern führt die Reibung zu unterschiedlichen Kontaktbedingungen zwischen Dichtlippe und abzustreifender Gegenfläche. Bei diesen Abstreifern ist weniger die Befestigung, sondern vielmehr die Instabilität des Elastomerprofils in sich verantwortlich. Die bei der Bewegungsumkehr an diesen Abstreifern stattfindende Walk- und Kippbewegung der Dichtlippenspitze führt dazu, dass die an der Oberfläche des Abstreifers anhaftenden Feststoffe bei der schmutzabstreifenden Bewegung in den Dichtspalt gelangen, Bild 5.

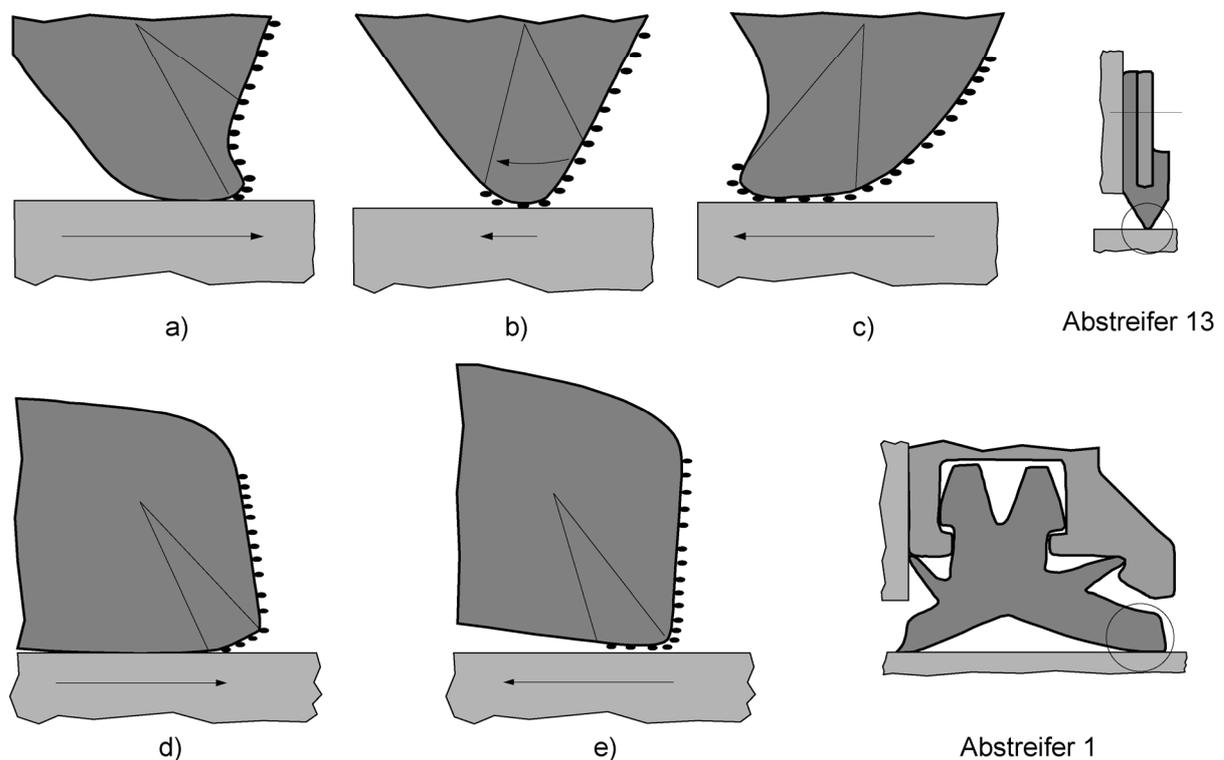


Bild 5: Reibkraftbedingte Verzerrungen führen bei der Bewegungsumkehr zum Eintrag von Partikeln

Sollen feste und flüssige Fremdstoffe sicher zurückgehalten werden, ergeben sich für die Gestaltung eines Abstreifer folgende Anforderungen:

- Zur Abdichtung von flüssigen Fremdstoffen ist ein Pressungsverlauf mit schmutzseitig steilem Pressungsanstieg notwendig
- Zusätzlich darf schmutzseitig im vorgespannten Zustand kein Keilspalt entstehen.
- Stabile Dichtlippen an korrekt befestigten Abstreifern sind notwendig, um den Eintrag von Feststoffen durch Verformung der Dichtlippe zu verhindern
- Profilverfälschungen an Abstreifern wie Grate, Formaustritt und Oberflächenfehler sind an den funktionsbestimmenden Oberflächen der Dichtlippen zu vermeiden

- Da lange, schlanke und spitz zulaufende Dichtlippen biegeweich sind und nur eine eingeschränkte Profilstabilität haben, sind kurze, dicke und massiv ausgeführte Dichtlippen zu bevorzugen

Diese und weitere Kriterien haben zur Entwicklung eines zweilippigen Abstreifers geführt, der mit seiner günstigen Befestigung in Bild 6 dargestellt ist.

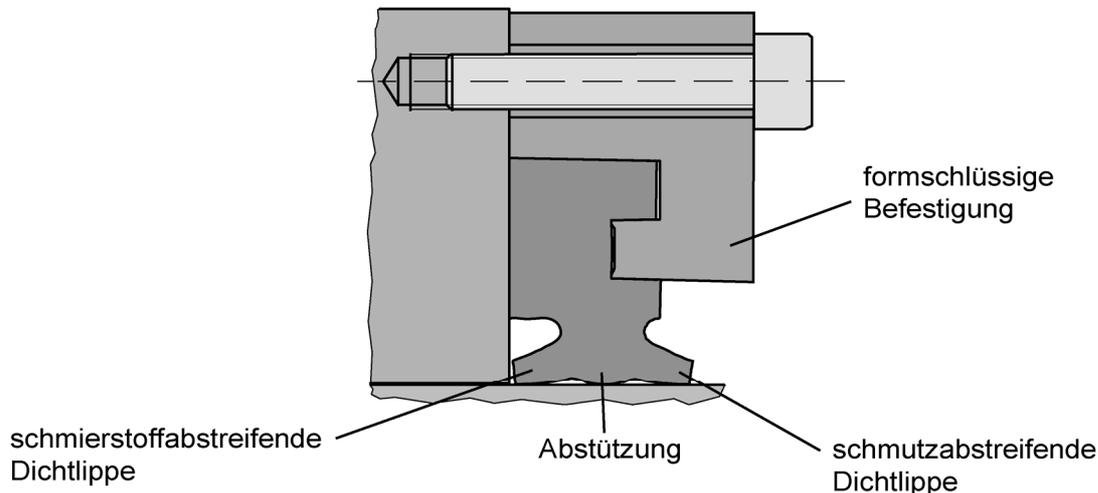


Bild 6: Neuentwickeltes Abstreiferprofil, V18\_9

Die aus einem PU-Werkstoff spritzgegossene Abstreiferleiste wird über eine Klemmleiste formschlüssig mit dem Schlitten verbunden. Eine örtliche Verdrängung von PU-Material und die damit verbundene Verformung der Dichtlippen kann nicht stattfinden. Der Abstreifer besteht aus zwei kurzen massiv ausgeführten Dichtlippen. Die Kernfunktionen Abdichten von Schmierstoffen und Abstreifen von Verschmutzungen sind auf separate Lippen aufgeteilt. Durch die Geometrie der Dichtlippen werden Keilspalte vermieden und ein günstiger Pressungsverlauf erreicht. Die oben dargestellten Mechanismen beim Eintrag von Feststoffen konnten an diesem Abstreifer nicht beobachtet werden.

## 1.2 Abstreiferleisten, Abstreiferstirnplatten und Längsabstreifer

Im Rahmen der Arbeit werden unterschiedliche Dichtsysteme behandelt. Die einzelnen Dichtungen grenzen sich wie folgt ab:

Abstreiferleisten sind die Grundelemente zusammengesetzter Abstreifer. Durch Ablängen und Verkleben bzw. Verschweißen der einzelnen Leisten werden vorwiegend stirnseitige Dichtungen für Gleitführungen bei kleineren Stückzahlen hergestellt. Sie sind quer zur Bewegungsrichtung angeordnet. Im Zusammenhang mit Längsabstreifern werden Sie hier auch als Querabstreifer bezeichnet.

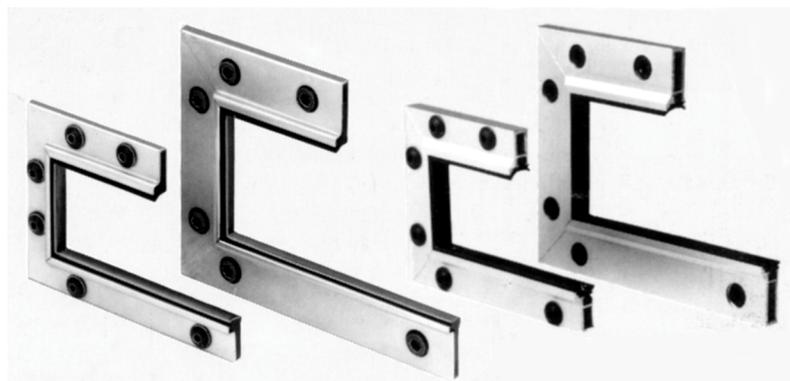


Bild 7: Abstreiferleisten, zusammengesetzte Abstreifer /33/

Abstreiferstirnplatten dienen der stirnseitigen Abdichtungen von Laufwagen für Profilschienenführungen. Wie die Abstreiferleisten werden auch sie hier als Querabstreifer bezeichnet, da sie quer zur Laufrichtung angeordnet sind.

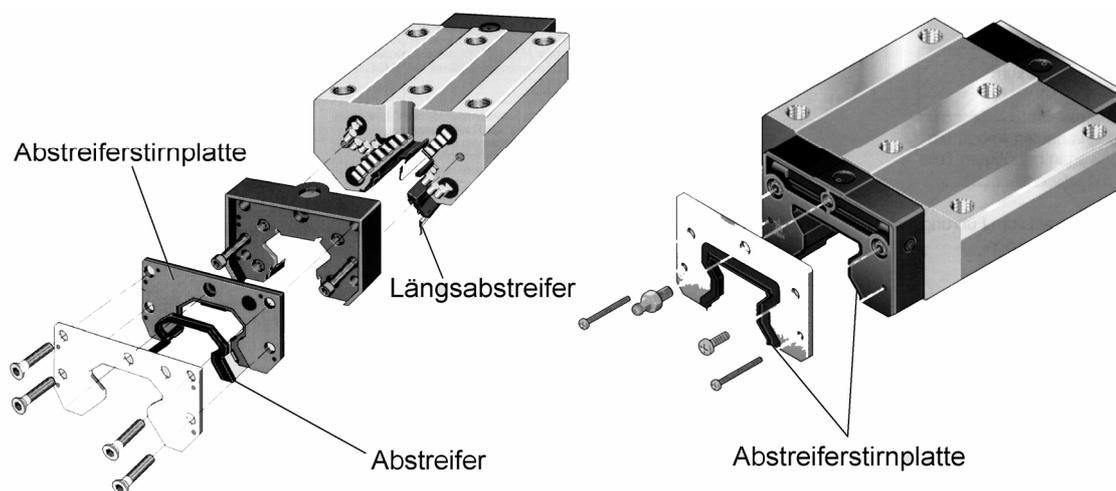


Bild 8: Abstreiferstirnplatten, Längsabstreifer, /35/ und /36/

Die Längsabstreifer sind in Bewegungsrichtung angeordnet. Man kann deshalb nicht von einem schmierstoff- und einem schmutzabstreifenden Hub sprechen. Unabhängig von der Bewegungsrichtung gelangen ständig Schmierstoff und Schmutz an die Dichtkante. Diese Medien müssen nicht aktiv abgestreift werden, da sie nur seitlich an den Längsabstreifer gelangen und sich nicht direkt auf der Bahn des Längsabstreifers befinden. Die relative Bewegung zwischen Längsabstreifer und Gegenlauffläche ist mit der eines Radialwellendichtrings vergleichbar.

### 1.3 Struktur und Ziel der vorliegenden Arbeit

Übergeordnetes Thema dieser Arbeit ist die Untersuchung und Weiterentwicklung von Abstreifern für Werkzeugmaschinenführungen. Dieser Themenbereich wird in drei

Abschnitte unterteilt. Um die Arbeiten zu Abstreifern von Flachführungen abzuschließen werden hier die Themen Werkstoffvariationen und Hilfsmaßnahmen vorgestellt. Der Schwerpunkt der Arbeit ist die Untersuchung und Entwicklung von Abstreiferstirnplatten für Profilschienenführungen. Abschließen werden Längsabstreifer betrachtet die sowohl bei Flach- als auch Profilschienenführungen eingesetzt werden.

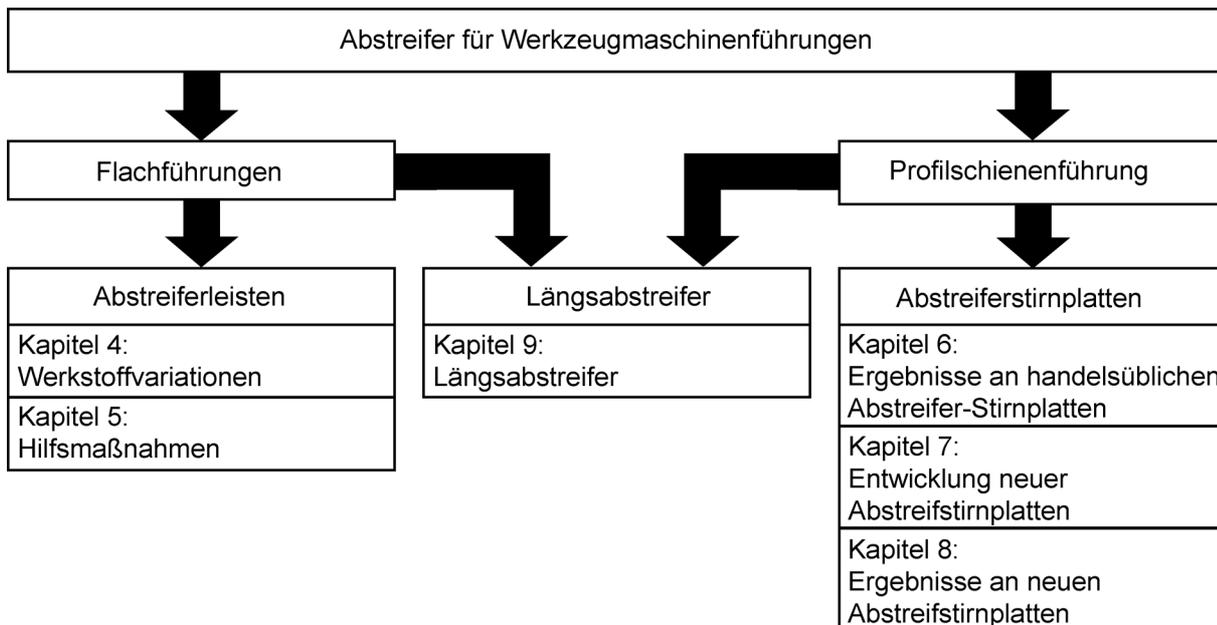


Bild 9: Struktur der vorliegenden Arbeit

Die Variation der Werkstoffe soll klären, ob sich die Geometrie des Abstreiferprofils V18\_9 auch für andere Werkstoffe verwenden lässt bzw. die Tauglichkeit verschiedener Werkstoffe, mit verschiedenen Härten, für den Einsatz als Abstreiferprofil zu prüfen.

Hilfsmaßnahmen sind Vorrichtungen und Aufbauten, die dem Abstreifer in seinen Funktionen, Abdichten des Schmierstoffes bzw. Abstreifen von Fremdstoffen, unterstützen. Es soll geklärt werden ob schmutzseitiges Spülen mit Luft oder Flüssigkeit oder eine Mehrfachanordnung Auswirkung auf die Dichtwirkung haben.

Bei der Untersuchung und Entwicklung neuer Abstreiferstirnplatten gilt es, das bei den Abstreiferleisten gewonnene Wissen auf die komplexe Führungsbahnen wie Profilschienen umzusetzen. Ziel ist die Entwicklung eines neuen funktionsfähigen Dichtelementes. Dazu werden zunächst handelsübliche Abstreiferstirnplatten experimentell betrachtet und deren Ausfallursachen ergründet. Diese Ergebnisse fließen in die Entwicklung von Abstreiferstirnplatten ein. Die neuen Abstreiferstirnplatten werden anschließend experimentell untersucht.

Die Untersuchungen an Längsabstreifern haben das Ziel, die Wirkungsweise und Ausfallkriterien dieser Dichtelemente zu ermitteln. Zudem sollen für den Längsabstreifer selbst und dessen Anbindung an den Querabstreifer geeignete Gestaltungsrichtlinien gefunden werden.

## 2 Prüfeinrichtungen

In diesem Kapitel werden die bei den experimentellen Untersuchungen verwendeten Prüfeinrichtungen und Hilfsaggregate vorgestellt. Abstreiferprüfstand, Kraftmesseinrichtung (KME), Zustelleinrichtung und der Ölkreislauf standen zur Verfügung /24/. Zustelleinrichtung II, Führungswageneinheit, Partikeldosier- und Zuführeinheit II wurden in der vorliegenden Arbeit entwickelt und aufgebaut.

### 2.1 Prüfstand

Der Prüfstand ermöglicht die Untersuchung von Dichtungen an Linearführungen unter praxisähnlichen Bedingungen, wie sie z. B. in Bearbeitungszentren und Drehmaschinen vorliegen. Aus den damit durchgeführten Versuchen werden, unter Variation der dichtungstechnisch relevanten Parameter, Aussagen über das Verhalten bei dynamischer Beanspruchung der Dichtungen gewonnen.

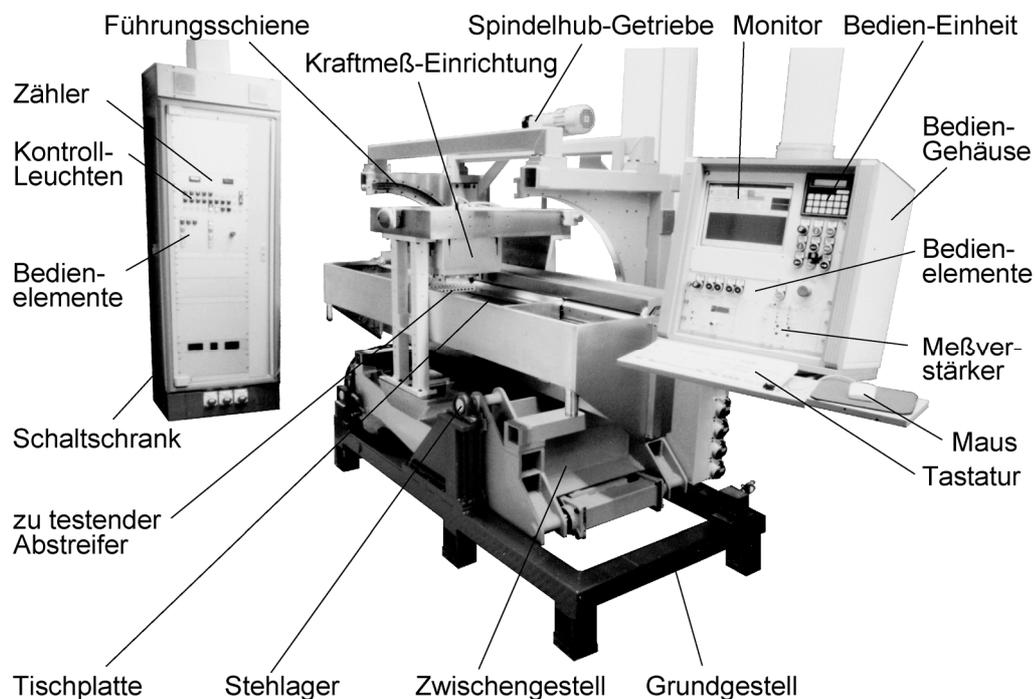


Bild 10: Gesamtansicht des Prüfstands mit Kraftmess-Einrichtung, ohne Nebaggregate

Um die Beobachtung der Dichtung am Prüfstand zu ermöglichen, ist der Abstreifer ortsfest und die abzustreifende Gegenfläche (Tisch) bewegt sich linear hin und her. Die Prüfeinheit kann stufenlos um bis zu  $90^\circ$  geneigt werden, Bild 11. Das Zwischen-gestell ist ebenfalls um  $90^\circ$  schwenkbar.

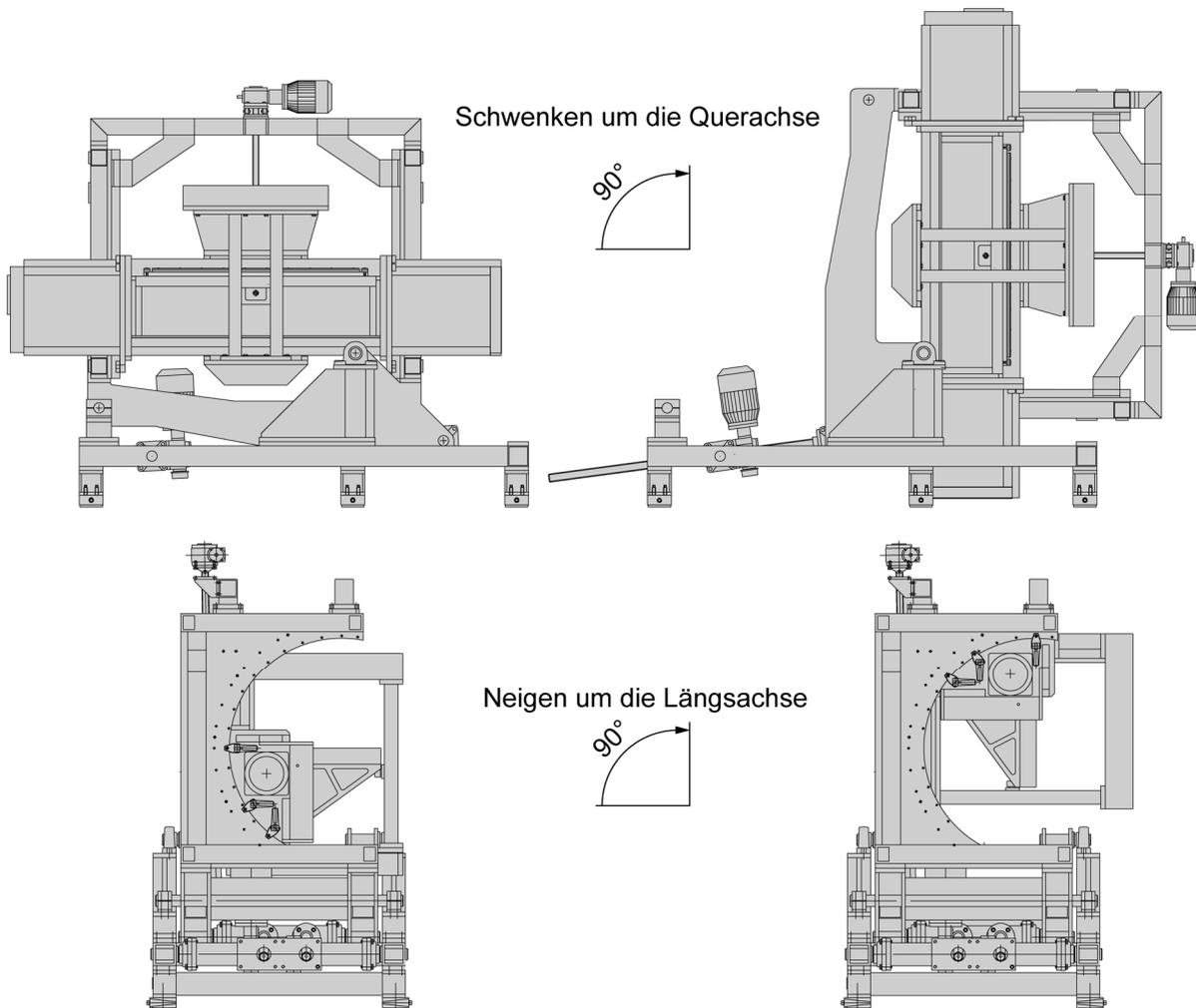


Bild 11: Raumlagen der Prüfeinheit, drehen um die Längs- bzw. Querachsen

Im Schaltschrank befinden sich die Leistungselektronik zur Ansteuerung des Servomotors und die SPS. Die zur Bedienung des Prüfstandes notwendigen Elemente sind im Bedien-Gehäuse untergebracht.

- Fahrweg des Tisches (Hub), frei wählbar zwischen 1 – 900 mm
- Kleinster programmierbarer Weg-Schritt 1 mm
- Positioniergenauigkeit des Tisches 0,05 mm
- Geschwindigkeit des Tisches, frei wählbar zwischen 1 – 1500 mm/s
- Kleinster programmierbarer Geschwindigkeits-Schritt 1 mm/s
- max. zulässige zusätzliche Tischmasse (Tischplatte) 100 kg
- max. zulässige Normalkraft-Belastung auf den Tisch 5000 N

## 2.2 Kraftmess-Einrichtung (KME)

Zur Beurteilung unterschiedlicher Abstreifer sind Kenntnisse über die Reibung im Betrieb und über die Abhängigkeit der Normalkräfte von Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit notwendig. Mit der Kraftmess-Einrichtung (KME) können die Reib- und Normalkräfte am Abstreifer sowohl im Stillstand als auch im dynamischen Betrieb gemessen werden. Der Vorspannweg der Dichtung wird über vier gemeinsam angetriebene Gewindespindeln eingestellt, Bild 12. Querkräfte auf die Spindeln werden durch die Stützleisten vermieden. Auf der Unterseite der KME kann die Trägerleiste über den drehbar gelagerten Teller um die Vertikalachse gedreht werden. Dadurch lässt sich eine Schrägstellung des Abstreifers zur Bewegungsrichtung erreichen. Die Trägerleiste ist zudem um ihre Längsachse über die Winkel-Einstellung drehbar.

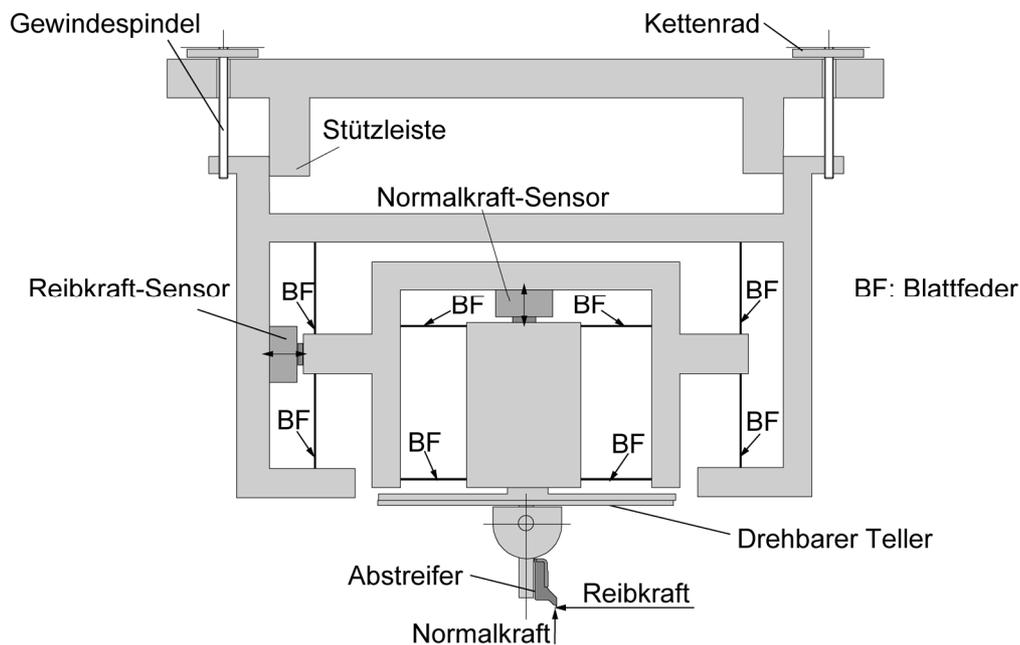


Bild 12: Aufhängung der KME

Die Kraftmessung erfolgt mit Sensoren auf DMS-Basis. Die zugehörigen Messverstärker werten die Widerstandsänderung der DMS aus und stellen ein  $\pm 10$  V-Analogsignal zur Auswertung durch die PC-Messwerterfassung zur Verfügung. Im Verlauf der Arbeiten wurde der Messverstärker und PC-Messwerterfassungskarte durch eine Messelektronik ersetzt.

Sensoren: Zug-Druck-Kraftsensor Typ 85041, Messbereich  $\pm 5000$  N  
 Firma Burster Nennmessweg  $\pm 100$   $\mu\text{m}$   
 Vierleiter-Anschluss

Messverstärker: Speisungs- und Messverstärker  
 Typ 97216, Firma Burster

Messelektronik: Spider 8, Firma HBM

## 2.3 Zustell-Einrichtung I

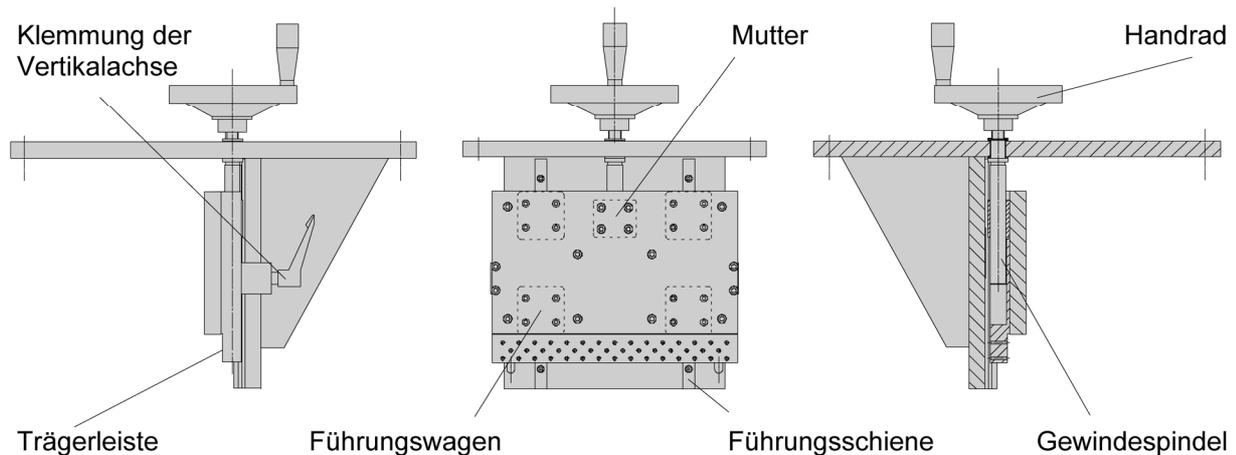


Bild 13: Zustelleinrichtung

Statt der empfindlichen KME kann die einfache, robuste Zustell-Einrichtung eingesetzt werden. Insbesondere zur Durchführung von Verschmutzungs-Untersuchungen an Abstreifern ist die Zustell-Einrichtung gebaut worden. An der Trägerleiste wird der zu untersuchende Abstreifer befestigt, über Handrad, Gewindespindel und Mutter positioniert und vor Versuchsbeginn über die Klemmung fixiert.

## 2.4 Führungswagen-Haltevorrichtung (FHV)

Zur Durchführung der Untersuchungen an Profilschienenführungen wird die Führungswagen-Haltevorrichtung (FHV) eingesetzt. Damit können beliebige Profilschienenführungen der Baugröße 45 und Standardführungswagen untersucht werden.

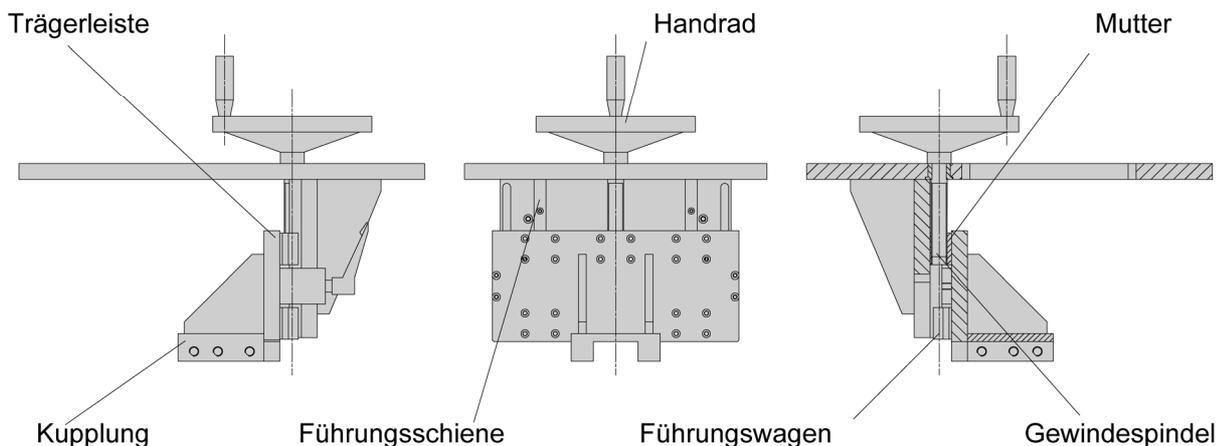


Bild 14: Zustelleinrichtung II

Die FHV besteht aus zwei Baugruppen. Die Zustell-Einrichtung II wird von oben, im Versuchsträger des Prüfstands montiert und ähnelt im Aufbau der Zustell-Einrichtung I. An der Trägerleiste ist eine Kupplung angebracht.

Die sechs federnde Druckstücke der Kupplung greifen in die Nutenplatte der Führungswageneinheit (FWE). Diese wird auf dem Führungswagen der zu untersuchenden Profilschienenführung montiert. Die Baugruppe besteht aus dem Grundträger, Kraftmessdosen zur Aufnahme der Reibkraft und dem Abstreiferhalter. Die Abstreiferstirnplatte wird am Abstreiferhalter montiert und ist über die beiden Kraftmessdosen vollständig vom Führungswagen entkoppelt.

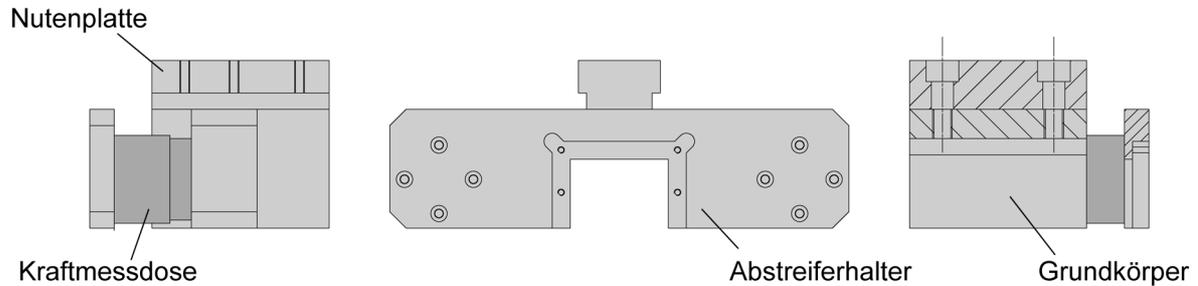


Bild 15: Führungswageneinheit (FWE) mit Kraftmessdosen

Die gemessenen Reibkräfte beziehen sich ausschließlich auf den Abstreifer. Auf einen komplizierten Aufbau wie bei der Kraftmesseinrichtung KME kann verzichtet werden, da keine zusätzlichen Normalkräfte aufgezeichnet werden und die verwendeten Kraftmessdosen querkraftkompensiert sind. Die Kraftmessung erfolgt mit Sensoren auf DMS-Basis. Die zugehörige Messelektronik wertet die Widerstandsänderung der DMS aus, digitalisiert das Signal und stellt es dem PC zur Auswertung zur Verfügung.

Sensoren: Zug-Druck-Kraftsensor Typ U3 Messbereich  $\pm 2000$  N  
 Firma HBM Nennmessweg  $\pm 80$   $\mu$ m  
 Querkraftkompensiert  
 Vierleiter-Anschluss

Messelektronik: Spider 8  
 Firma HBM

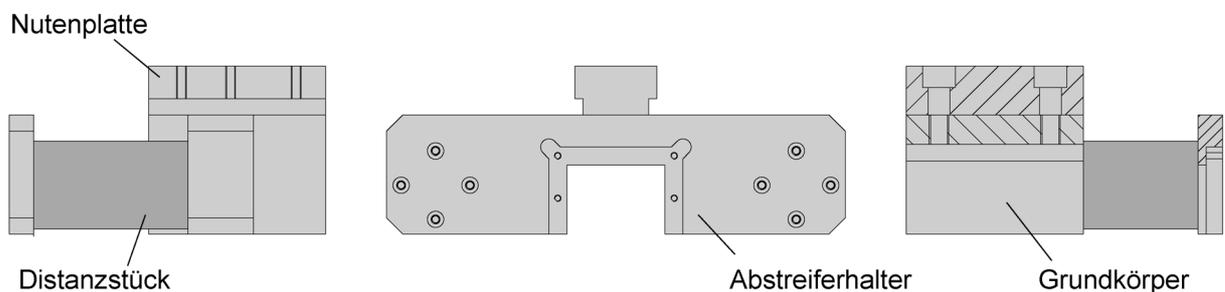


Bild 16: Führungswageneinheit (FWE) mit Distanzstücken

Für die Durchführung von Verschmutzungsuntersuchungen lassen sich die Kraftmessdosen durch Distanzstücke austauschen. Der Abstand des Abstreiferhalters vom Grundkörper wird vergrößert. Der Bereich hinter der Abstreiferdichtlippe lässt sich so besser einsehen

## 2.5 Partikeldosier- und Zuführeinheiten (PDZ I, PDZ II)

Die Partikeldosier- und Zuführeinheit (PDZ) dient zur Beaufschlagung des zu testenden Abstreifers mit Feststoffpartikeln. Die Partikel werden über eine Zelleradschleuse dosiert und vor den Abstreifer gestreut.

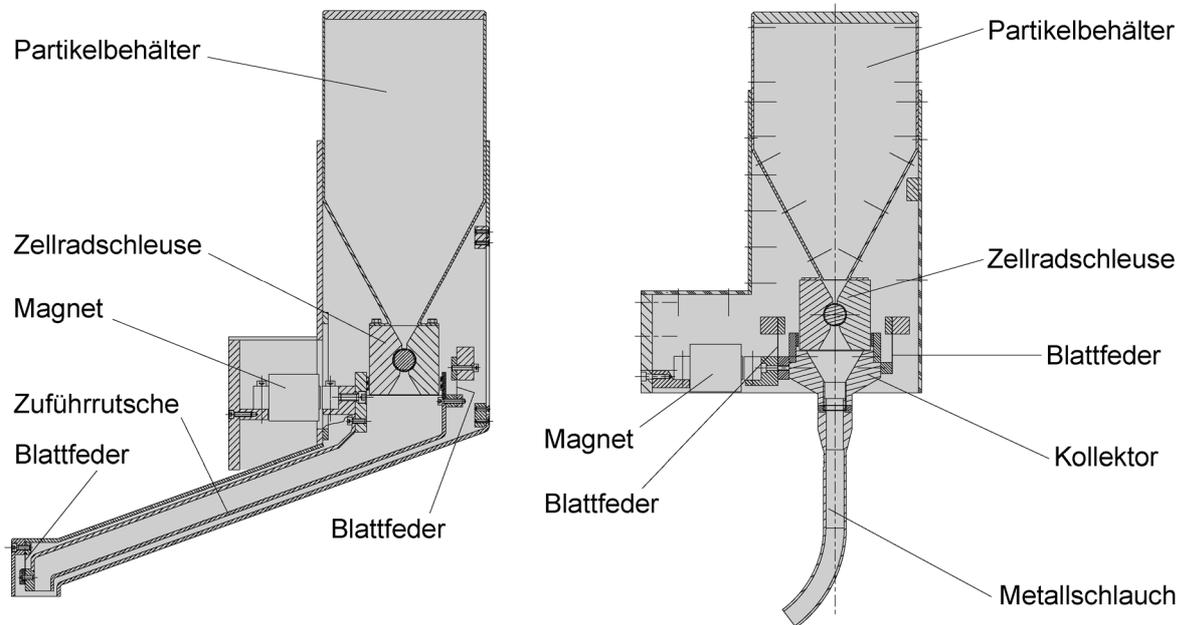


Bild 17: Partikeldosier- und Zuführeinrichtung PDZ I (links), PDZ II (rechts)

Das Bild 17 zeigt den konstruktiven Aufbau der PDZ I und PDZ II. Die im Partikelbehälter der PDZ I befindlichen Feststoffpartikel werden über die Zelleradschleuse dosiert. Die Drehzahl der Zelleradschleusen-Welle ist über einen Frequenz-Umrichter einstellbar und beträgt zwischen 1 und 46 Umdrehungen pro Minute. Das ausgeschleuste Metallpulver wird durch die Zuführrutsche vor den Abstreifer gestreut. Die über Blattfedern beweglich aufgehängte Rutsche wird durch einen Rüttelmagneten zu Schwingungen angeregt, wodurch das Metallpulver nach unten rutscht.

Insbesondere für Verschmutzungsuntersuchungen an Längsabstreifern wurde die Partikeldosier- und Zuführeinrichtung II (PDZ II) aufgebaut, /41/. Sie ist kleiner und leichter ausgeführt. Die Menge an ausgetragenen Partikeln ist geringer. Wie bei der PDZ I wird das Pulver über eine Zelleradschleuse dosiert. Der Drehzahlbereich liegt zwischen 1 und 31 Umdrehungen pro Minute. Anschließend wird das Pulver über einen Kollektor zu einem mit Blattfedern aufgehängten flexiblen Metallschlauch geführt. Der Metallschlauch wird durch einen Rüttelmagneten zum Schwingen angeregt und streut das Metallpulver vor den Abstreifer.

## 2.6 Ölkreislauf

Das Hydraulik-Aggregat dient zur Beaufschlagung der zu testenden Dichtung mit Schmierstoff und zur Bereitstellung von Spülöl, um die Verschmutzungs-

Untersuchungen durchführen zu können. Ausgelegt wurde das Aggregat für den Spül-öltrieb. Über einen Frequenz-Umrichter lässt sich die Drehzahl des Pumpenmotors einstellen. Dadurch sind Volumenströme zwischen 0,5 und 50 l/min einstellbar.

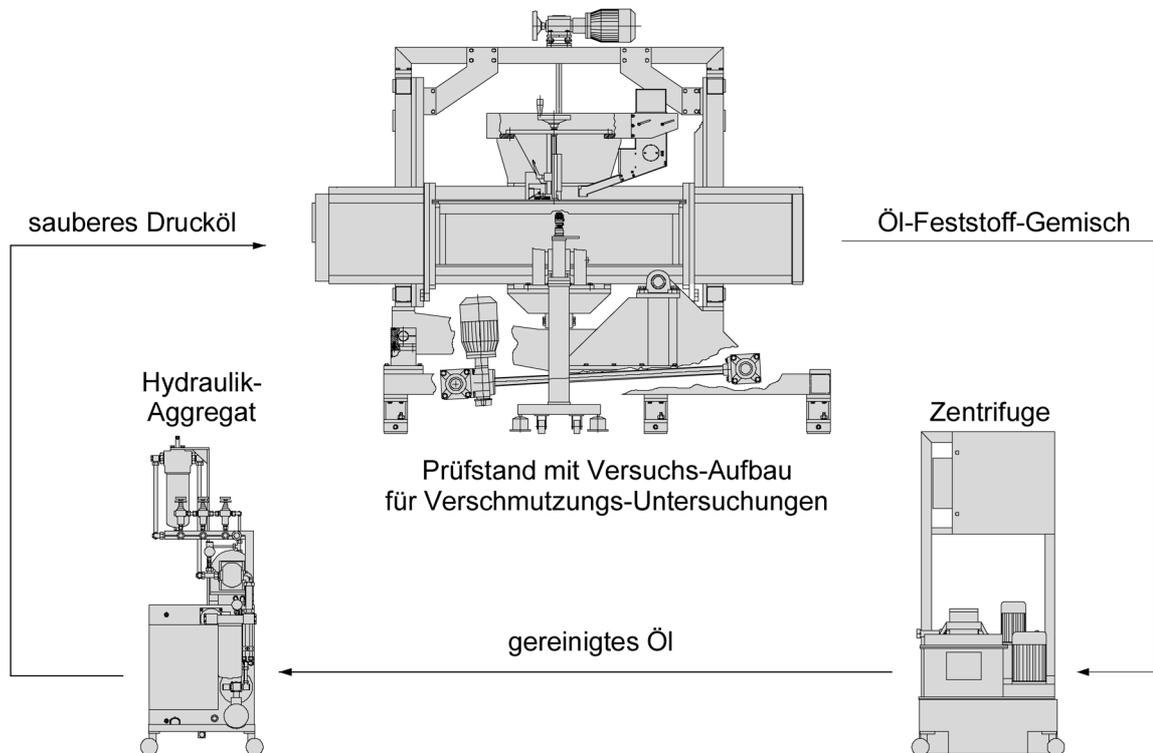


Bild 18: Ölkreislauf

Zur Aufbereitung des bei den Verschmutzungs-Untersuchungen am Prüfstand anfallenden Öl-Feststoff-Gemisches wird eine Zentrifuge eingesetzt. Über eine Pumpe wird das verschmutzte Öl am Prüfstand abgepumpt und der Zentrifuge zugeführt. Die im Öl enthaltenen schweren Feststoffe lagern sich in der Zentrifugentrommel ab und das gereinigte Öl läuft in den Sammelbehälter. Über eine weitere Pumpe wird das gereinigte Öl dem Hydraulik-Aggregat wieder zugeführt.

## 2.7 Video-Ausrüstung

Zur Beobachtung der Kontaktzone der Dichtlippe von Abstreiferleisten wird, statt der Tischplatte aus Stahl, eine Glasplatte eingebaut. Zur eigentlichen Beobachtung kommt eine Videokamera mit Mikroskop-Objektiv zum Einsatz. Zur Beobachtung der Dichtlippe durch die Glasplatte wird die Kamera vertikal eingebaut, zur Beobachtung der Stirnseite des Abstreifers horizontal, Bild 19. Erst bei entsprechender Vergrößerung lassen sich die Vorgänge an den Dichtlippen beobachten. Nur kleine Ausschnitte der Dichtlippe können betrachtet werden. Um mehrere Stellen längs der Dichtlippe anschauen zu können, ist die Kamera auf einem beweglichen Schlitten angeordnet. Dadurch ist es einerseits möglich, den Bildausschnitt längs der Dichtlippe zu verschieben und andererseits die Kamera exakt zu positionieren. Wegen der starken Vergrößerung führen schon kleinste Erschütterungen der Kamera zu „verwackelten“ Bildern. Er-

schütterungen der Geschosdecke durch das Begehen oder den Betrieb des Prüfstandes führen bereits zu unbrauchbaren Bildern.

Die schwingungsentkoppelte Aufstellung der Kamera ermöglicht die Beobachtung der Dichtlippen mit entsprechender Vergrößerung. Das Stativ ist auf eine schwere Grundplatte montiert und durch pneumatische Schwingungstilger von der Geschosdecke entkoppelt. Um die Partikelbewegung unter der Dichtlippe beobachten zu können, wird ein Mikroskop-Zoomobjektiv verwendet. Dieses Objektiv ermöglicht es, die in Tabelle 2.1 angegebenen Bildausschnitte zu betrachten.

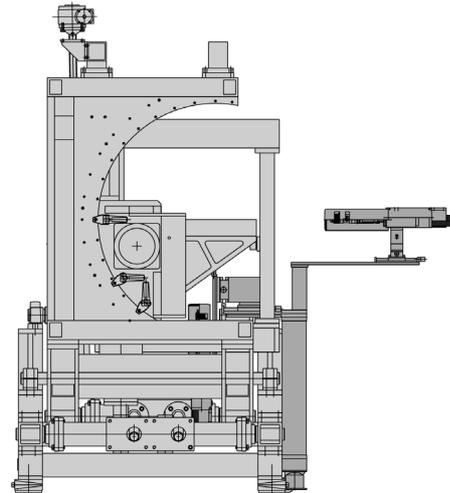


Bild 19: Video-Stativ

Tabelle 2.1: Aufbau und Vergrößerungen des Mikroskop-Objektivs

| Aufbau des Objektivs    | Arbeitsabstand | max. Bildausschnitt | min. Bildausschnitt |
|-------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| mit 0,25 x-Vorsatzlinse | 356 mm         | 42 x 32 mm          | 6,4 x 4,8 mm        |
| ohne Vorsatzlinse       | 92 mm          | 9,1 x 6,6 mm        | 1,4 x 1,1 mm        |
| mit 2 x-Vorsatzlinse    | 36 mm          | 4,6 x 3,4 mm        | 0,7 x 0,5 mm        |

Um den Bereich hinter der Abstreiferstirnplatte einer Profilschienenführung betrachten zu können, werden flexible Mikrofiberskope eingesetzt. Diese Fiberskope ermöglichen die in Tabelle 2.2 angegebenen Bildausschnitte.

Tabelle 2.2: Aufbau und Vergrößerung der Mikrofiberskope

| Typ                | Bildpunkte | Arbeitsabstand | Bildausschnitt |
|--------------------|------------|----------------|----------------|
| MTFS 1,0 (Ø1,0 mm) | 10000      | 5 – 50 mm      | Ø7 – Ø70 mm    |
| MTFS 1,5 (Ø1,5 mm) | 15000      | 5 – 50 mm      | Ø7 – Ø70 mm    |

Die Video-Kamera verfügt über einen RGB- und S-VHS-Ausgang. Wie in Bild 20 dargestellt, wird das höherwertige RGB-Signal durch den Video-Monitor und den Bild-Verarbeitungs-PC genutzt. Das S-VHS-Signal wird während der Versuchsdauer, das können auch mehrere Stunden sein, vom Video-Recorder aufgezeichnet. Folglich wird zur Wiedergabe der Aufzeichnung vom Monitor das S-VHS-Signal verwendet. Dieses liegt ebenfalls am Bild-Verarbeitungs-PC an.



## 3 Versuchsprogramm

Hier werden die durchgeführten Untersuchungen, Vorgehensweisen, Auswertungen und die Ergebnisdarstellungen vorgestellt. Alle untersuchten Abstreiferleisten und Abstreiferstirnplatten wurden im wesentlichen dem selben Versuchsprogramm bei einheitlichen Versuchsbedingungen unterzogen. Das gilt sowohl für handelsübliche als auch für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Abstreifer. Die einheitliche Durchführung, Ergebnisaufbereitung und Darstellung der Ergebnisse ermöglicht den Vergleich zwischen unterschiedlichen Abstreifern.

Das Versuchsprogramm bestand aus folgenden Einzeluntersuchungen:

- Profilanalyse der Abstreifer-Querschnitte
- Normalkraft-Vorspannweg-Messung (statische Messung)
- Reibkraft- und Normalkraft-Messungen (dynamische Messung)
- Untersuchungen zur Schmierstoff-Leckage
- Abdichtung von Feststoffen und Feststoff-Flüssigkeitsgemischen

Für die geschmiert durchgeführten Untersuchungen wurde FVA-Referenzöl /43/ (ISO VG 68) verwendet. Die Temperatur des zugeführten Schmierstoffs betrug  $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ , die Raumtemperatur  $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ .

### 3.1 Profilanalyse der Abstreifer-Querschnitte

Die Kontrolle der Profile von Abstreiferleisten und Abstreiferstirnplatten gibt Auskunft über die Gestalt von handelsüblichen Abstreifern und über die Fertigungsgenauigkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Abstreifer. Dazu wurden bei Abstreiferleisten längs der Dichtleisten mehrere Schnitte angefertigt. Die Umrisse der Querschnitte wurden am Profilprojektor abgezeichnet. Durch den Vergleich mit dem Soll-Querschnitt, im Bild 21 rechts dargestellt, lassen sich Abweichungen einfach erkennen.

Von Abstreiferstirnplatten wurden Schnitte mit und ohne zugehöriger Profilschiene angefertigt. Dazu wurden die Abstreiferstirnplatten in Kunstharz eingegossen und an

ausgewählten Stellen getrennt. Dabei waren vor allem die Bereiche der Abstreiferstirnplatte von Interesse, die Kontakt mit den Wälzbahnen der Profilschiene haben.

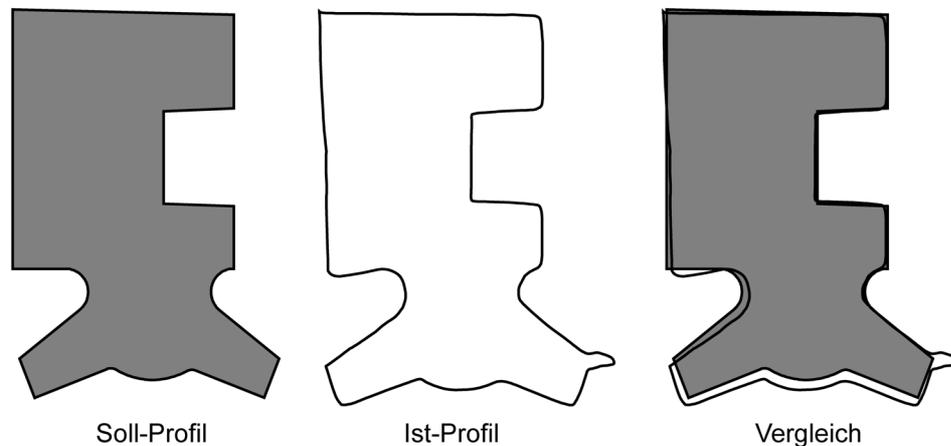


Bild 21: Profilanalyse der Abstreiferleisten-Querschnitte

Die Eingüsse ohne Profilschiene dienen der Kontrolle der Fertigungsgenauigkeit neuer Abstreiferstirnplatten. Anders als bei Abstreiferleisten wurden am Profilprojektor lediglich die Abmessungen des Profils kontrolliert. Die Schnitte wurden digital fotografiert. In diesen maßstabgetreuen Bildern wurden die Umrisse der Profile abgezeichnet und mit dem Sollprofil verglichen.

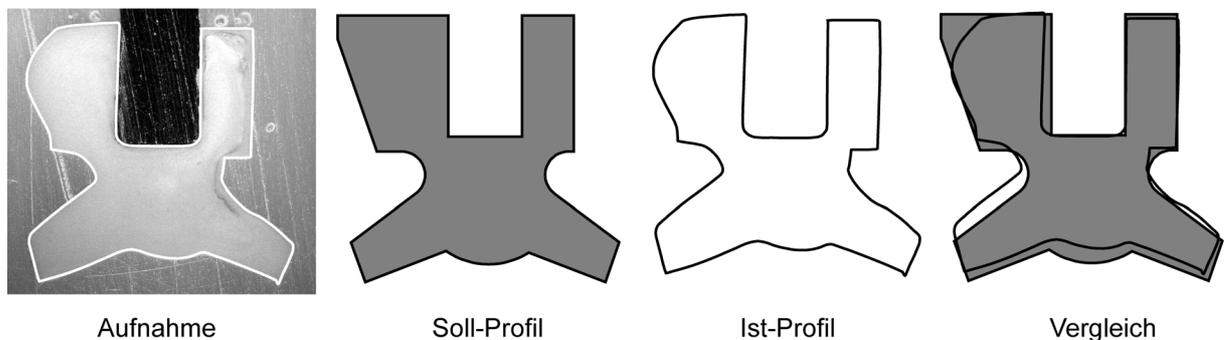


Bild 22: Profilanalyse der Abstreiferstirnplatten-Querschnitte

Die Eingüsse der Abstreiferstirnplatten mit den zugehörigen Profilschienen geben Auskunft über die Gestalt der Abstreifer im eingebauten Zustand und klären die Kontaktverhältnisse an den Dichtlippen. In Spalte a) sind die beiden Abstreiferstirnplatten, die das Dichtsystem einer Profilschienefführung bilden, mit und ohne Gegenfläche dargestellt. Die Spalten b) und c) zeigen Vergrößerungen der entsprechenden Dichtlippen. Die obere Bildreihe zeigt die Dichtungen ohne, die untere mit der zugehörigen Gegenfläche. Die Eingüsse mit Gegenfläche, besonders die Detailansichten der Dichtlippen geben Auskunft über die Kontaktverhältnisse der Abstreiferstirnplatten.

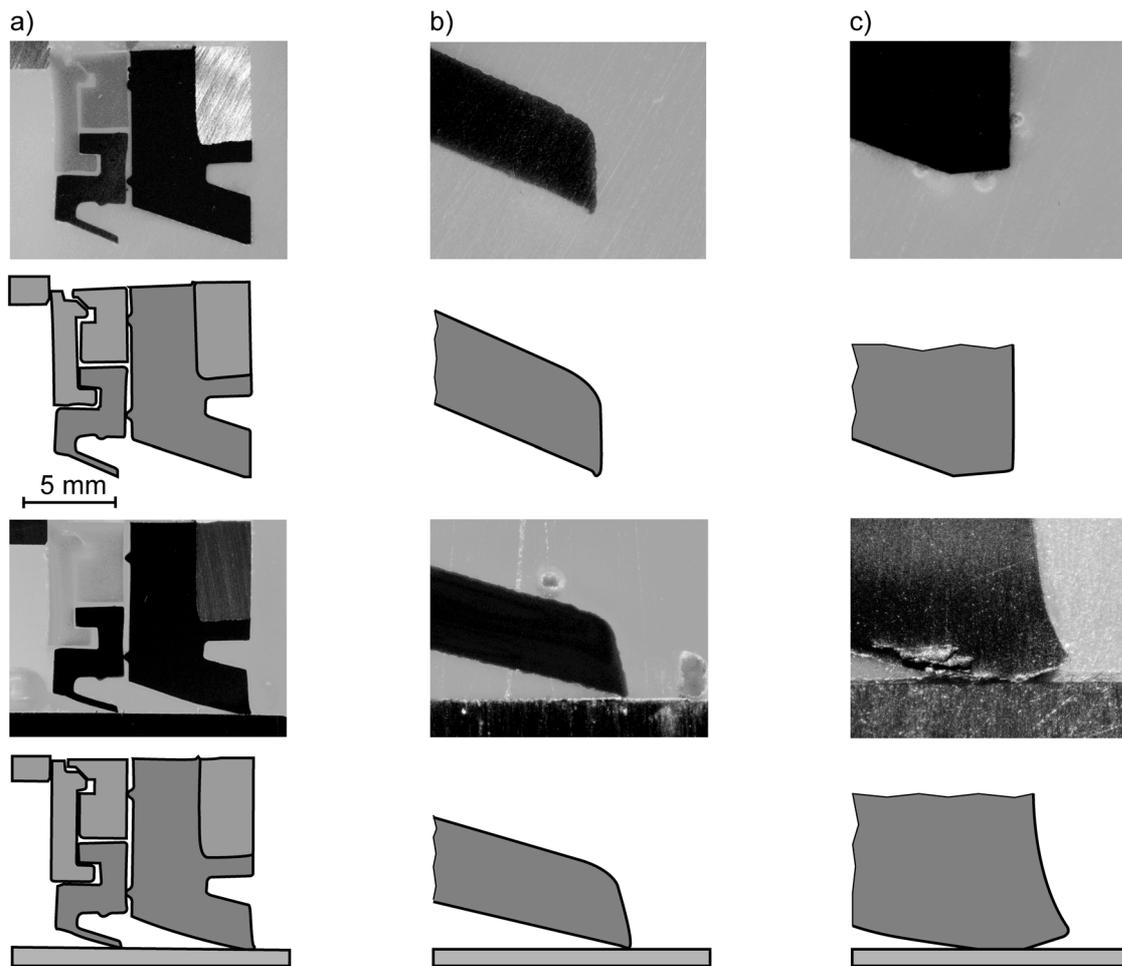


Bild 23: Eingüsse der Abstreiferstirnplatten mit ohne und mit Gegenfläche

Von den Abstreiferstirnplatten wurden zudem auch Durchlichtaufnahmen angefertigt. Dazu wurden die Abstreiferstirnplatten auf die Profilschiene gesetzt und beides auf einen Glastisch gelegt, der von unten beleuchtet wurde. Durch das Gegenlicht werden die Bereiche der Stirnplatten hervorgehoben, die keinen oder nur sehr geringen Kontakt mit der Gegenfläche haben.

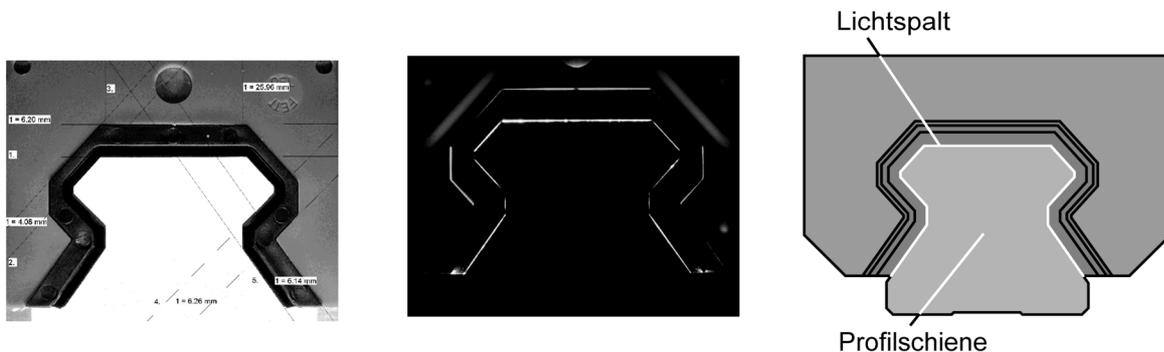


Bild 24: Abstreiferstirnplatte, Aufnahme mit Durchlicht, schematische Darstellung

### 3.2 Normalkraftmessungen (statisch)

Abstreifer benötigen zur Funktion eine Vorspannung. Diese Vorspannung wird durch eine elastische Deformierung der Dichtlippe erreicht. Der Zusammenhang zwischen Vorspannweg und Vorspannkraft wurde durch die wegabhängige Aufzeichnung der resultierenden Normalkraft ermittelt.

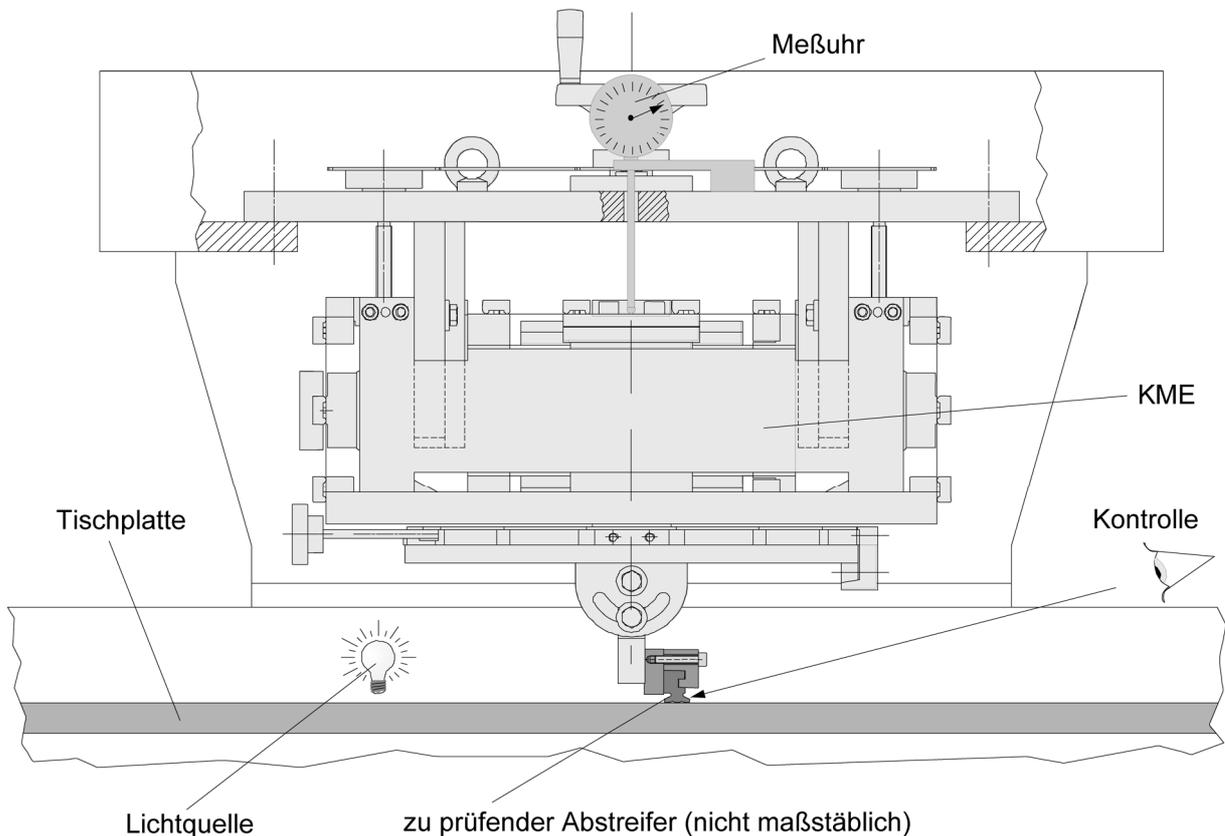


Bild 25: Normalkraft-Vorspannweg-Messung

Mit der höhenstellbaren Aufhängung der Kraftmess-Einrichtung wurde der Vorspannweg des Abstreifers eingestellt. Der Weg wurde über eine Messuhr kontrolliert und die zugehörige Kraft über den Normalkraft-Sensor gemessen, siehe Bild 25. Die Messungen wurden am Prüfstand bei stillstehendem Tisch durchgeführt. Zu Beginn der Messung wurde der Abstreifer so weit vorgespannt, bis zwischen Dichtlippe und abzustreifender Oberfläche kein Lichtspalt mehr zu sehen war. Diese Stellung des Abstreifers wurde dann als Vorspannweg 0 mm festgelegt. Während der Messung wurde der Vorspannweg in 0,1 mm-Schritten erhöht und die resultierende Normalkraft tabellarisch erfasst. Die Länge der untersuchten Abstreifer betrug 300 mm, weshalb die gemessenen Normalkräfte auf 300 mm zu beziehen sind.

### 3.3 Reibkraft und Normalkraftmessungen

Reib- und Normalkraftmessungen wurden an Abstreiferleisten und Längsabstreifern durchgeführt. Bei Abstreiferstirnplatten wurden lediglich Reibkräfte gemessen. Die Messung der Reib- und Normalkräfte ermittelt deren Größe und zeigt die Abhängigkeit der Kräfte von Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung. Zudem sind die Kräfte auch abhängig vom Querschnitt, vom Werkstoff und der Härte der Abstreifer, dem Vorspannweg und den Schmierverhältnissen.

Die Messungen wurden bei zwei unterschiedlichen Schmierzuständen durchgeführt, zum einen bei ungeschmierter (Trockenreibung), zum anderen bei gut geschmierter Gegenfläche (Nassreibung). Die Trockenreibungs-Untersuchungen zeigen die Tauglichkeit der Abstreifer bei sehr schlechten Schmierungsbedingungen. Von besonderem Interesse bei den Trockenreibung- und Normalkraftmessung sind:

- Formstabilität der Dichtlippe
- Reibschwingungen (stick-slip)
- Verstemmen der Dichtlippe und dadurch bedingte Normalkraft-Änderung
- Die Größe von Reib- und Normalkräfte

Die Nassreibungs-Untersuchungen stellen die Gegebenheiten in der realen Werkzeugmaschinen-Führung nach. Die Bedingungen sind bezüglich der Tribologie günstig. Dazu wird die Dichtung mit FVA-Referenzöl (ISO VG 68) beaufschlagt. Wichtige Beurteilungskriterien bei diesen Untersuchungen sind:

- Formstabilität der Dichtlippe (Einfluss der Reibkraft)
- Reibschwingungen (Stick-Slip)
- Verstemmen der Dichtlippe und dadurch bedingte Normalkraftänderung,
- Reibkräfte
- Leckage

#### 3.3.1 Reib und Normalkraftmessungen an Abstreiferleisten

Die Reib- und Normalkraft-Messungen wurden am Prüfstand mit der KME durchgeführt. Die abzustreifende Fläche war eine in Längsrichtung umfanggeschliffene Stahlplatte ( $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ ). Bei den geschmiert durchgeführten Untersuchungen wurde, wie im realen Einsatz an der Werkzeugmaschine, der Schmierstoff im Innenraum der Führung zugeführt.

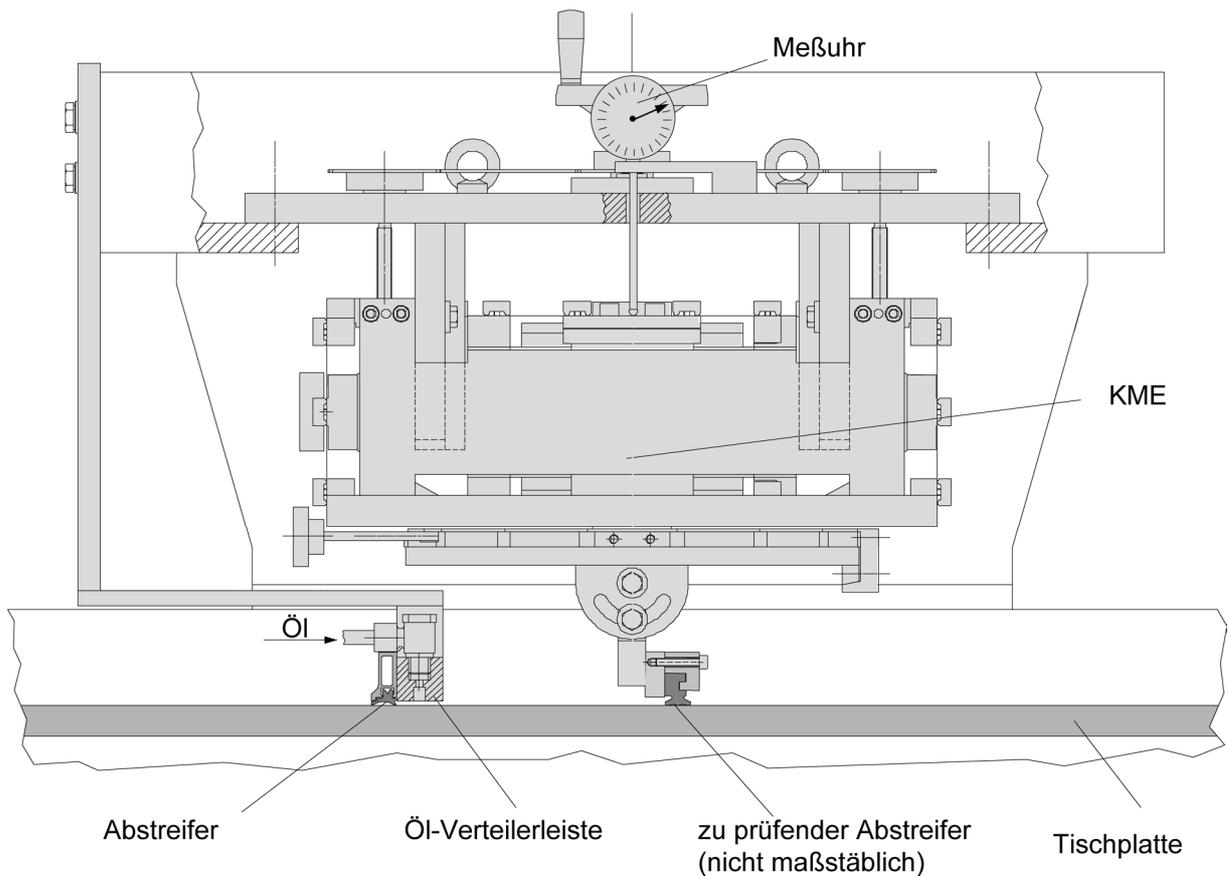


Bild 26: Versuchsaufbau zur Reibungsmessung, KME ohne Blechabdeckungen

Der Vorspannweg 0 mm wurde auf die gleiche Art festgelegt, wie bei der statischen Normalkraftmessung vorgestellt. Beginnend mit 0 mm wurde der Vorspannweg in 0,1 mm Schritten bis zum jeweiligen Maximum gesteigert. Für jeden der eingestellten Vorspannwege wurde die Geschwindigkeit stufenweise von 1 mm/s bis 1500 mm/s erhöht. Für jede dieser Vorspannweg-Geschwindigkeits-Kombinationen wurden die Reib- und Normalkräfte erfasst, die Messdaten aufbereitet und jeweils in einem Reibkraft- und Normalkraft-Diagramm dargestellt. Die zu prüfenden Abstreifer hatten eine Länge von 300 mm. Die Messdaten beziehen sich auf 300 mm.

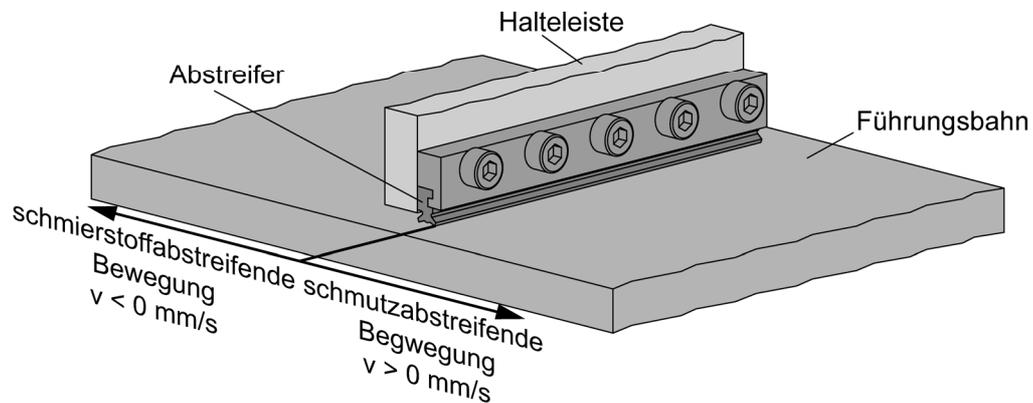


Bild 27: Bewegungsrichtungen der Abstreiferleiste

Bei der Bewegung von Abstreiferleisten kann der jeweiligen Richtung eine Funktion des Abstreifer zugeordnet werden:

- *Schmutzabstreifende Bewegung*: Bewegt sich der Abstreifer im Bild 27 nach rechts, streift er in allen Versuchsaufbauten Schmutz ab. Dabei übt er Druck auf die Kraftmessdose aus. Der Kraft- und der Geschwindigkeitsvektor werden als positiv definiert.
- *Schmierstoffabstreifende Bewegung*: Bewegt sich der Abstreifer im Bild 27 nach links, streift er in den Versuchen immer Schmierstoff ab. Dabei zieht er an der Kraftmessdose. Der Kraft- und der Geschwindigkeitsvektor werden als negativ definiert.

### 3.3.2 Reibkraftmessungen an Abstreiferstirnplatten

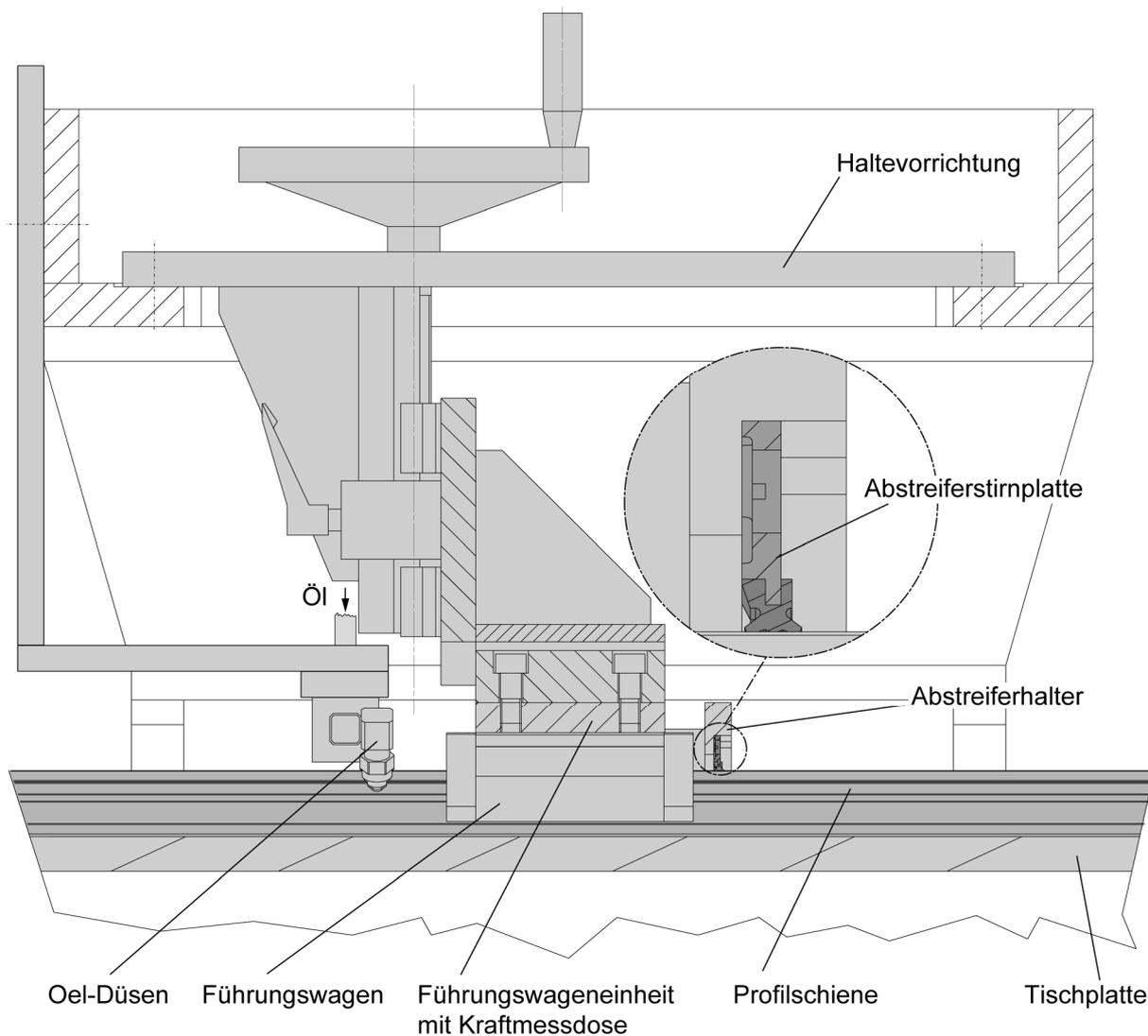


Bild 28: Versuchsaufbau Reibkraftmessung

Für die Reibkraftmessungen an Abstreiferstirnlatten wurde die Zustelleinrichtung II und die Führungswageneinheit mit Kraftmessdosen verwendet (siehe Kapitel 2). Die Messungen wurden mit und ohne Schmierstoffbeaufschlagung durchgeführt. Bei Messungen im geschmierten Zustand wurden die Profilschienen über zwei Öldüsen mit Schmierstoff beaufschlagt. Der Aufbau ist im Bild 28 dargestellt. Die abzustreifende Profilschiene und der Führungswagen wurden vorab mit Lösungsmittel gereinigt.

### 3.3.3 Reib und Normalkraftmessungen an Längsabstreifer

Die Versuche wurden alle mit einer ebenen umfanggeschliffenen Stahlplatte ( $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ ) als Gegenfläche durchgeführt. Die Reib und Normalkräfte wurden mit der Kraftmesseinrichtung KME ermittelt. Die Abstreiferaufnahme der KME wurde um  $90^\circ$  gedreht, so dass die Längsabstreifer in ihrer Laufrichtung montiert werden konnten. Im Vergleich zu den Untersuchungen an Querabstreifern kann bei den Längsabstreifern nicht mehr von schmierstoff- und schmutzabstreifender Bewegung gesprochen werden. Mit Hinblick auf die Reaktion, die der Längsabstreifer auf die Kraftmessdosen bewirkt, werden die Bewegungsrichtung wie im folgendem Bild 29 definiert.

- *Stemmende Bewegung:* Bewegt sich der Abstreifer im Bild 29 nach rechts, übt er Druck auf die Kraftmessdose aus. Der Kraft- und der Geschwindigkeitsvektor werden als positiv definiert.
- *Ziehende Bewegung:* Bewegt sich der Abstreifer im Bild 29 nach links, zieht er an der Kraftmessdose. Der Kraft- und der Geschwindigkeitsvektor werden als negativ definiert.

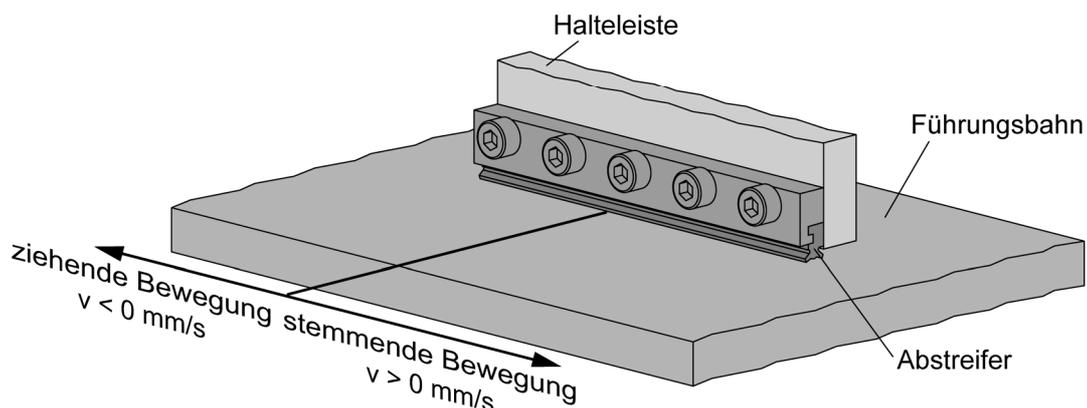


Bild 29: Bewegungsrichtungen des Längsabstreifers

Für jede dieser Vorspannweg-Geschwindigkeits-Kombination wurden die Reib- und Normalkräfte erfasst und in einem Reib- und Normalkraftdiagramm dargestellt. Da die zu prüfenden Abstreifer eine Länge von 100 mm hatten, beziehen sich die Messdaten auf 100 mm.

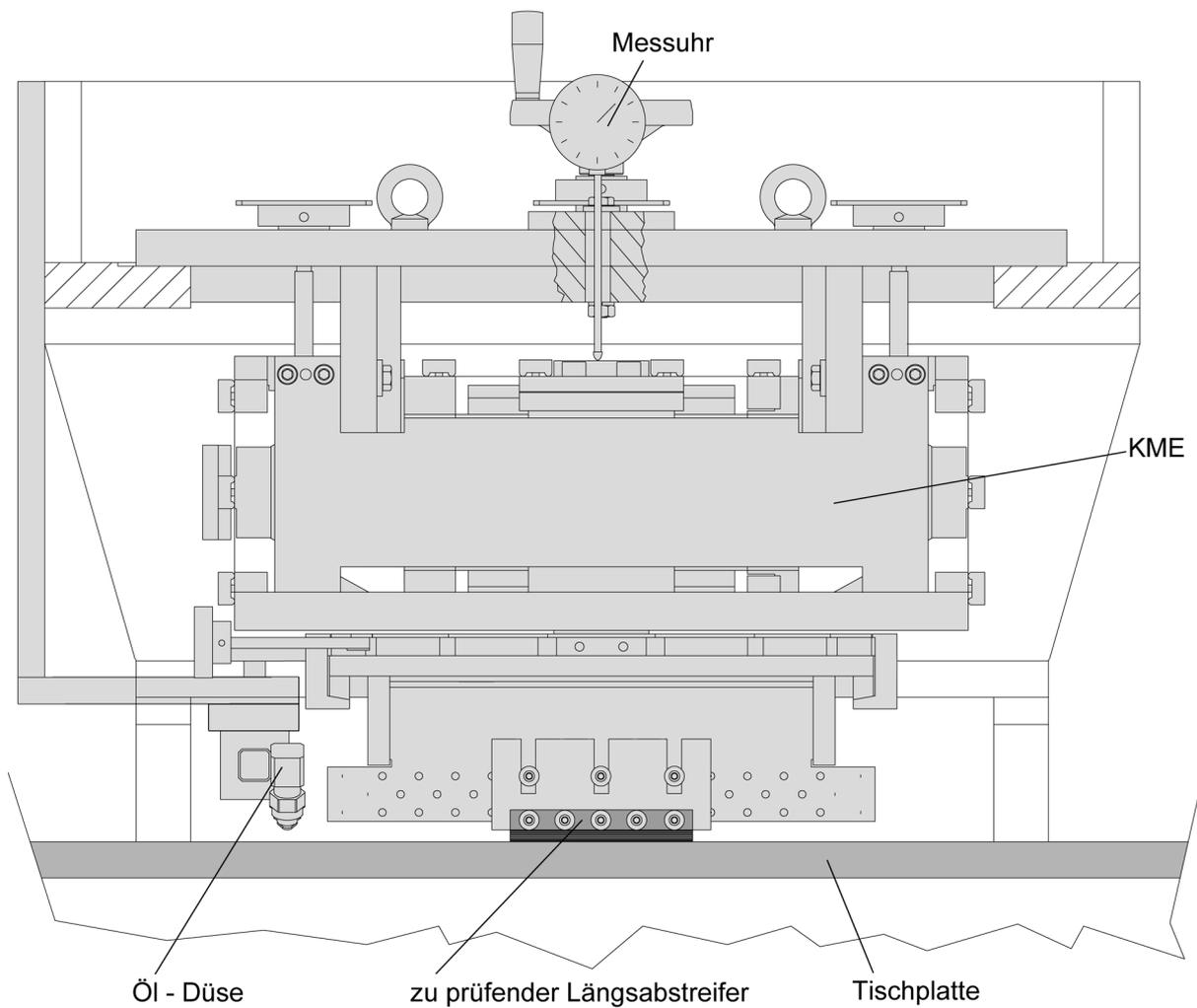


Bild 30: Versuchsaufbau Reibkraftmessung

### 3.4 Untersuchungen zur Schmierstoffleckage

Eine der Hauptaufgaben des Abstreifers ist es, den Schmierstoff im Innenraum der Führung zu halten. Um die Funktion bei Abstreiferleisten und Abstreiferstirnplatten zu prüfen, wurde bei den Untersuchungen zur Nassreibung parallel eine Bewertung der Schmierstoffleckage durchgeführt. Eine Bestimmung der Leckage, wie sie bei den Untersuchungen der Querabstreifer stattgefunden hat, war bei der Untersuchung der Längsabstreifer nicht möglich. Die Versuche wurden alle mit der Glasplatte als Gegenfläche durchgeführt und der Schmierstoffaustrag mit der Videokamera beobachtet.

### 3.4.1 Leckage an Abstreiferleisten und -stirnplatten

Im Versuch muss gewährleistet werden dass die Leckage durch den Abstreifer selbst bestimmt wird und nicht durch das vorhandene Schmiermittel-Angebot. Wie in Bild 26 und Bild 28 dargestellt, wird dem Abstreifer dazu mehr Öl zugeführt, als unter dem Abstreifer hindurchgeschleppt werden kann.

Um die Ergebnisse verschiedener Abstreifer miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig die Reib- und Normalkräfte immer nach dem gleichen Muster aufzunehmen. Deshalb wurde die Länge des Hubwegs und die Anzahl der Hübe einheitlich festgelegt. Für Abstreiferleisten wurden für die Leckage-Beurteilung folgende Randbedingungen gewählt:

- bei den Geschwindigkeiten 1 und 10 mm/s: Hubweg 210 mm, Hubanzahl 3
- bei alle anderen Geschwindigkeiten: Hubweg 900 mm, Hubanzahl 23

Gewählte Randbedingungen für die Leckage-Beurteilung bei Abstreiferstirnplatten:

- bei den Geschwindigkeiten 1 und 10 mm/s: Hubweg 100 mm, Hubanzahl 3
- bei den Geschwindigkeiten 100 bis 500 mm/s: Hubweg 900 mm, Hubanzahl 3
- bei alle anderen Geschwindigkeiten: Hubweg 900 mm, Hubanzahl 11

Durch die Gegebenheiten am Prüfstand kann die Leckage nicht in ein Sammelgefäß abfließen. Stattdessen wird, wie im Bild 31 dargestellt, die Breite  $b$  des abgelagerten Schmierstoffs gemessen.

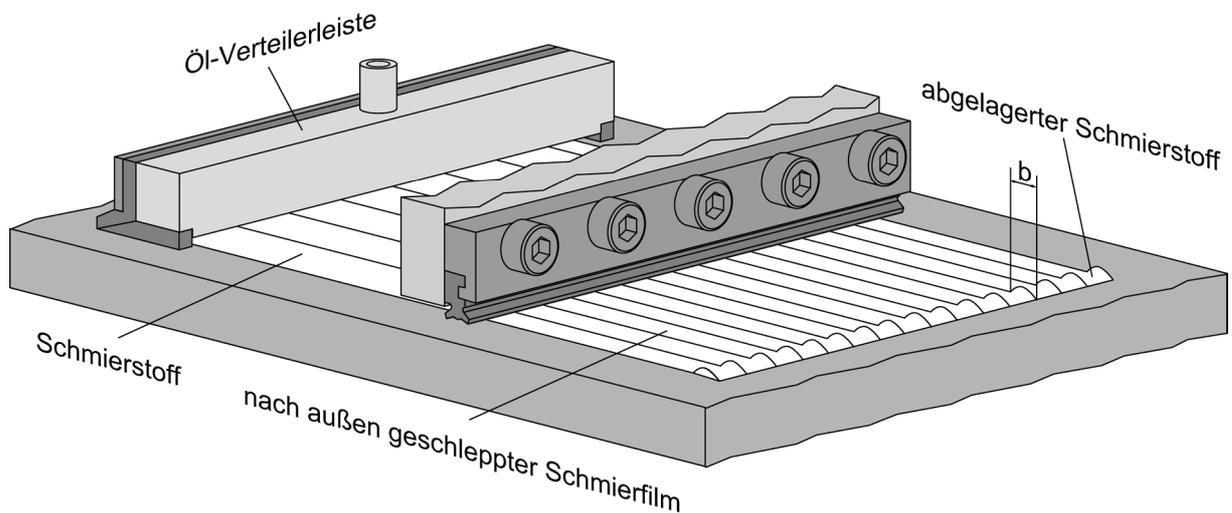


Bild 31: Am Umkehrpunkt abgelagerter Schmierstoff

Bei der schmierstoff-abstreifenden Bewegung kann ein relativ dicker, nach außen geschleppter Schmierfilm zurückbleiben. Wird dieser Schmierfilm bei der darauffolgenden schmutz-abstreifenden Bewegung teilweise abgestreift, so lagert sich der abgestreifte Schmierstoff am Umkehrpunkt der Tischbewegung ab. Vorausgesetzt, die Versuchsdurchführung findet immer nach dem gleichen Schema statt, lässt sich eine

qualitative, untereinander vergleichbare Aussage zur Leckage machen. Die Bewertung der Leckage findet gemäß Tabelle 3 statt.

Tabelle 3: Bewertung der Leckage

| Bewertung | Bedeutung                           | Ölsaumbreite     |                       |
|-----------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|
|           |                                     | Abstreiferleiste | Abstreiferstirnplatte |
| ++        | sehr geringe Leckage                | 0 bis 10 mm      | 0 bis 5 mm            |
| +         | geringe Leckage                     | 11 bis 20 mm     | 6 bis 10 mm           |
| 0         | mittlere Leckage                    | 21 bis 30 mm     | 11 bis 15 mm          |
| -         | große Leckage                       | 31 bis 40 mm     | 16 bis 20 mm          |
| --        | sehr große Leckage                  | 41 bis 50 mm     | 21 bis 25 mm          |
| ---       | Überflutung und abfließende Leckage |                  |                       |

Die Ergebnisse wurden tabellarisch zusammengefasst, die Benotung der Leckage dem jeweiligen Vorspannweg zugeordnet.

### 3.4.2 Schmierstoffleckage an Längsabstreifern

Eine Bestimmung der Leckage, wie sie bei den Untersuchungen der Querabstreifer stattgefunden hat, war bei den Untersuchungen der Längsabstreifer nicht möglich da die Dichtung sowohl von der Schmutz- als auch von der Schmierstoffseite mit Öl beaufschlagt wurde. Bild 32 zeigt den Versuchsaufbau zur Untersuchung des Schmierstoffaustrags.

Der Montageblock mit den befestigten Abstreifern wurde zur Gegenfläche des Prüfstands parallel ausgerichtet. Als Gegenfläche wurde eine Glasplatte eingesetzt. Mit Hilfe der Zustelleinrichtung wurde der Montageblock abgesenkt, bis der untersuchte Abstreifer auf der Glasplatte auflag. Der Abstreifer wurde dabei mit der Kamera beobachtet und die Position des ersten Kontakts mit der Glasplatte als Vorspannweg 0 mm festgelegt. Die Positionen der zur Nebenabdichtung eingesetzten Quer- und der Längsabstreifer spielten eine untergeordnete Rolle, solange diese Abstreifer abdichteten. Zwischen Montageblock, Glasplatte und Abstreifer hat sich ein geschlossener Raum gebildet, der mit Schmierstoff gefüllt wurde. Eingesetzt wurde FVA-Referenzöl (ISO VG 68). Das Öl wurde mit gelben dispersiven Farbpigmenten eingefärbt um es bei den Aufnahmen sichtbar zu machen. Damit das Öl an den untersuchten Abstreifer gelangte, wurde die Tischplatte des Prüfstandes um 20° bzw. 90° geneigt, wie in Bild 32 dargestellt. Der Schmierstoff drückte bei 20° Neigung mit einem Teil oder bei 90° Neigung mit seiner gesamten Gewichtskraft gegen den Längsabstreifer.

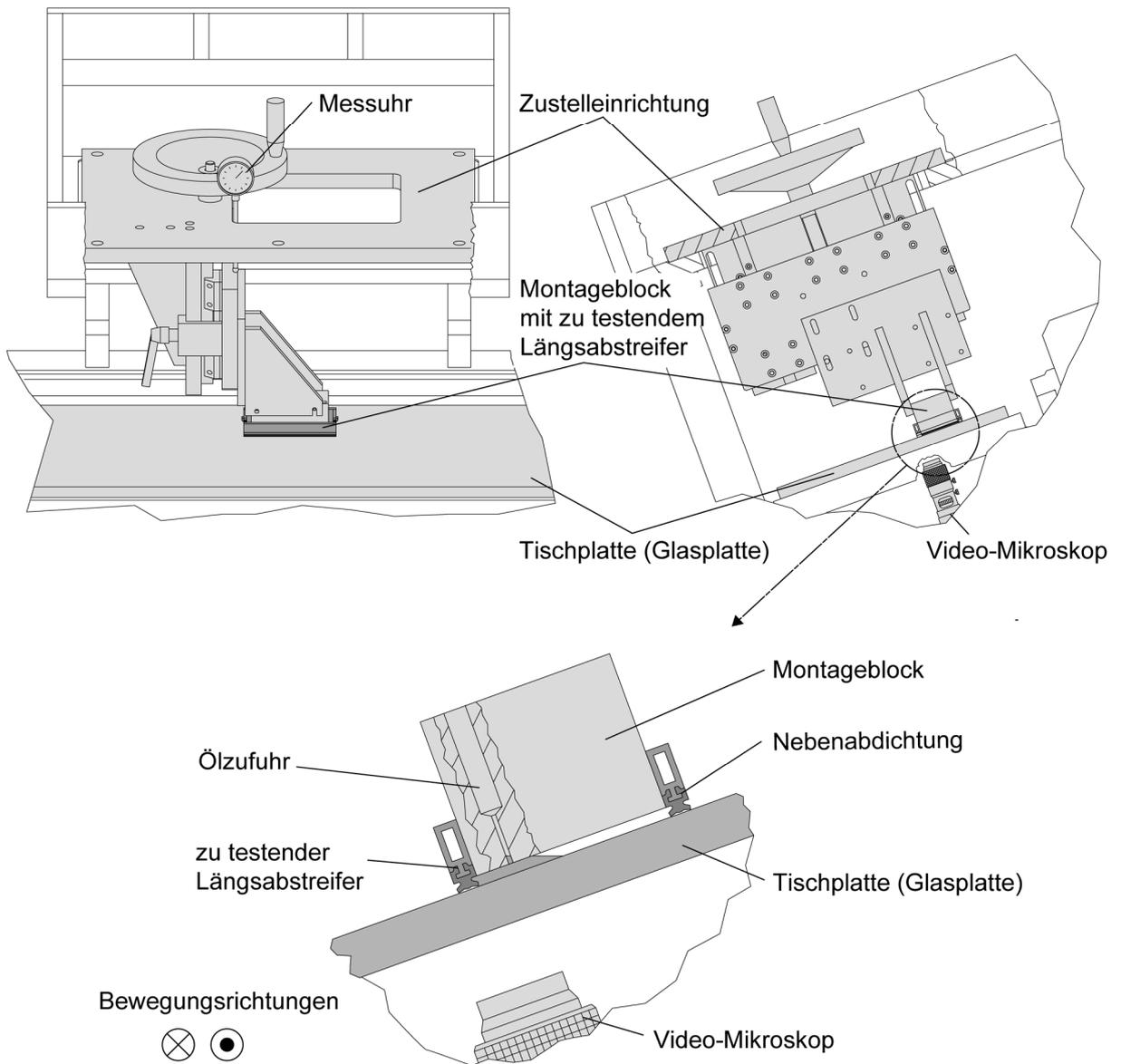


Bild 32: Versuchsaufbau für Untersuchungen zum Schmierstoffauftrag

Der Vorspannweg wurde beginnend mit 0,1 mm in Schritten von 0,1 mm bis zum jeweiligen Maximum gesteigert. Bei jedem dieser Vorspannwege das folgende Geschwindigkeits- Hubweg-Programm durchlaufen

Die Länge und Anzahl der Hübe wurde an die Geschwindigkeit angepasst. Maximal war bei diesem Versuchsaufbau eine Hublänge von 700 mm möglich. Wie in Bild 32 schematisch dargestellt, wurde bei den Untersuchungen zum Schmierstoffauftrag immer der untere Abstreifer beobachtet, die Schmierstoffkammer befand sich in einer höheren Position.

Tabelle 4: Geschwindigkeits-Hubweg-Programm

| Schritt | Geschwindigkeit [mm/s] | Hubweg [mm] | Anzahl Hübe |
|---------|------------------------|-------------|-------------|
| 1       | 1                      | 100         | 4           |
| 2       | 10                     | 100         | 4           |
| 3       | 50                     | 500         | 12          |
| 4       | 100                    | 500         | 12          |
| 5       | 500                    | 700         | 12          |
| 6       | 1000                   | 700         | 12          |

### 3.5 Abdichtung von Feststoffen

Außenseitig anstehende Fremdstoffe abzudichten ist die andere Hauptaufgabe von Abstreifern. Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt, um zu überprüfen, inwieweit Abstreifer diese Aufgabe erfüllen. Der im Versuch eingesetzte Feststoff soll die abzustreifenden Partikel, wie sie an realen Führungen abzustreifen sind, repräsentieren. „Reale Partikel“ können Späne unterschiedlichster Form und Größe und Stäube (Grauguss-Staub) sein. Die Vielfalt dieser realen Partikel macht es notwendig, sich bei den Untersuchungen auf schwierig abzustreifende bzw. abzudichtende Feststoffe zu konzentrieren.

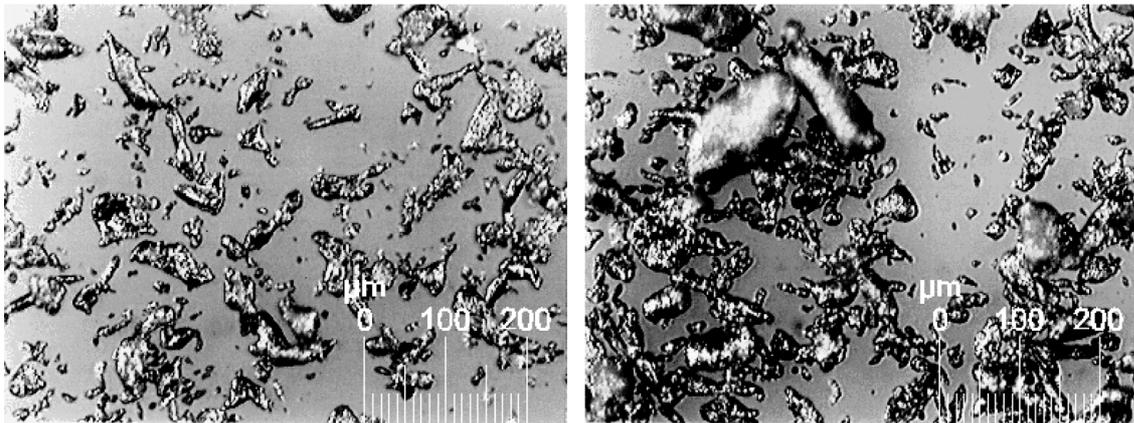


Bild 33: eingesetztes Messingpulver

Vorversuche mit unterschiedlichen Feststoffen zeigen, dass vorwiegend kleine Partikel schwierig abzustreifen sind. Als Ersatzstoff für Späne aus Zerspanungsprozessen und sonstigen abzustreifenden Feststoffen wurde ein Messing-Pulver ausgewählt. Die Partikelgrößen dieses Messing-Pulvers liegen zwischen 1 und 100  $\mu\text{m}$ . Die Vorgestellten Untersuchungsmethoden ermöglichen eine qualitativ gute Aussage zum Ein-

trag fester Fremdstoffe. Die Anzahl der eingedrungenen Partikel kann jedoch nicht gemessen werden.

### 3.5.1 Untersuchungen zum Feststoffeintrag an Abstreiferleisten

Um Aussagen über die Abdichtung von Feststoffen machen zu können, wird der Abstreifer mit Feststoff-Partikeln beaufschlagt, wie im Bild 34 dargestellt. Die Feststoff-Partikel werden über die PDZ dosiert und durch die Tischbewegung beim schmutzabstreifenden Hub dem Abstreifer zugeführt. Der Öldüsenblock führt Schmierstoff zu und spült seitlich vorbeitransportierte und unter dem Abstreifer hindurchgeschleppte Partikel weg. Die bei der schmutzabstreifenden Bewegung unter der Dichtlippe hindurchgeschleppten Partikel können sich nicht bei der schmierstoffabstreifenden Bewegung an der Dichtlippe anlagern. Somit ist die Beobachtung der Mechanismen möglich, wie Feststoffe in das System eingetragen werden. Partikel, die sich schon im System befinden, beeinflussen die Beobachtung nicht.

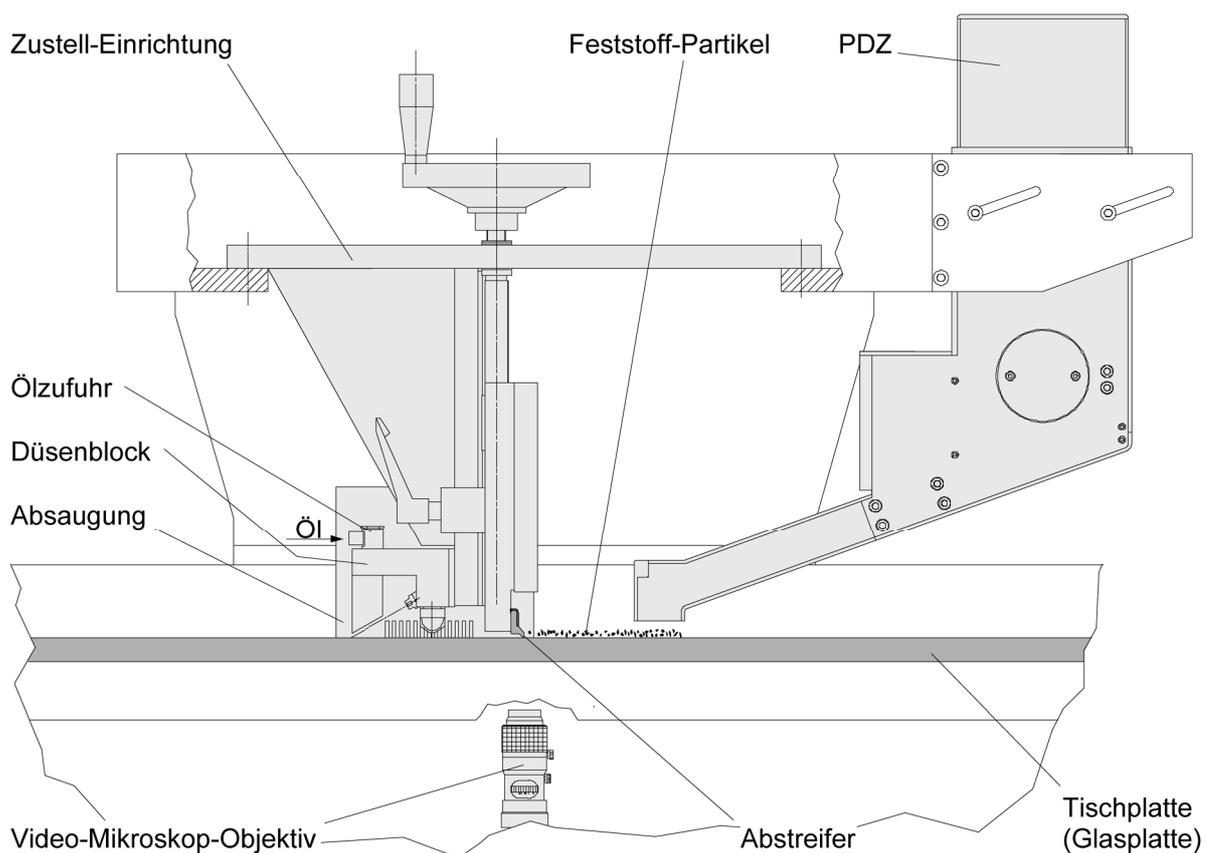


Bild 34: Versuchsaufbau zur Feststoff-Beaufschlagung

Als Tischplatte wird eine 19 mm dicke Glasplatte verwendet. Dadurch können die Kontaktverhältnisse an den Dichtlippen, die Transportvorgänge unter den Dichtlippen, und die reibungsbedingten Bewegungen der Dichtlippen mit der vertikal eingebauten Video-Kamera beobachtet werden. Die Abstreiferprofile wurden mit der Video-

Einrichtung systematisch untersucht. Die Ergebnisse wurden auf Videoband aufgezeichnet. Im Versuch durchläuft die Abstreiferleiste das in Tabelle 5 dargestellte Geschwindigkeits-Hubweg-Programm. Die Anzahl der Hübe variiert mit der Anzahl der Einstellungen, die aufgenommen werden.

Tabelle 5: Geschwindigkeits-Hubweg-Programm

| Schritt | Geschwindigkeit [mm/s] | Hubweg [mm] | Anzahl der Hübe |
|---------|------------------------|-------------|-----------------|
| 1       | 1                      | 100         | 3-9             |
| 2       | 10                     | 200         | 3-9             |
| 3       | 100                    | 900         | 5-15            |
| 4       | 500                    | 900         | 11-33           |
| 5       | 1000                   | 900         | > 800           |
| 6       | 1500                   | 900         | 31-93           |

### 3.5.2 Untersuchungen zum Feststoffeintrag an Abstreiferstirnplatten

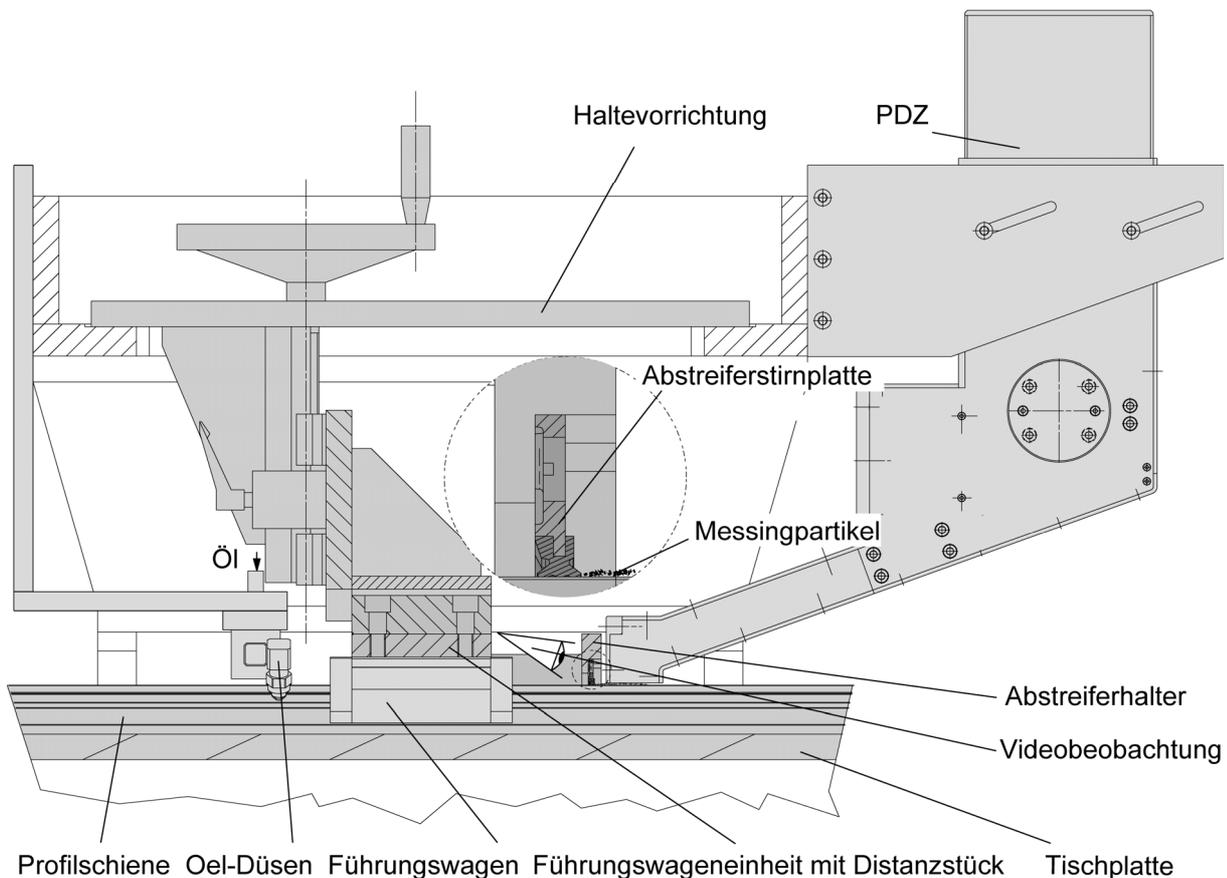


Bild 35: Versuchsaufbau zur Feststoff-Beaufschlagung

Für die Untersuchungen wurde die gesamte Profilschienenführung auf der Tischplatte des Prüfstandes montiert. Die Profilschienen waren, soweit dies möglich ist, entfettet. Auf dem Führungswagen der Profilschiene ist die Führungswageneinheit aufgesetzt. An der Führungswageneinheit ist über zwei Distanzstücke der sogenannte Abstreiferhalter befestigt, der die zu untersuchenden Abstreiferstirnplatten aufnimmt und relativ zur Schiene positioniert. Vor dem Abstreifer, auf der Schmutzseite des Versuchsraums, befindet sich die Partikeldosier- und Zuführeinrichtung. Die Feststoff-Partikel werden über die PDZ dosiert und durch die Tischbewegung beim schmutzabstreifenden Hub dem Abstreifer zugeführt. Um zu vermeiden, dass Partikel um die eigentliche Dichtung herum in den „Ölraum“ gelangen, wurde der Bereich hinter dem Abstreifer mit Folien abgedeckt und die Tischfläche mit einem Spülstrom aus Öl beaufschlagt. Auf eine zusätzliche Schmierung der Laufrollen und der Dichtung wurde verzichtet. Damit sollte vermieden werden, dass Messingpartikel, die sich hinter dem Abstreifer ansammeln, vom Schmierstoff weggespült werden. Durch diesen Aufbau ist es möglich die Abstreiferstirnplatte während des Versuchsbetriebs von der Ölseite her zu betrachten, bzw. Schmutzpartikel, die unter der Dichtung hindurch geschleppt werden, zu erfassen. Das geschieht mit einem flexiblen Mikrofiberskop sowie der Video-Einrichtung. Die Versuche wurden auf Videoband aufgezeichnet sowie einzelne Szenen über einen PC dokumentiert. Für alle Kombinationen von Abstreiferstirnplatten und Profilschienen wurde ein einheitliches Geschwindigkeits-Hubweg-Programm durchlaufen, das in Tabelle 6 dargestellt wird:

Tabelle 6: Geschwindigkeits-Hubweg-Programm

| Schritt | Geschwindigkeit [mm/s] | Hubweg [mm] | Anzahl der Hübe |
|---------|------------------------|-------------|-----------------|
| 1       | 1                      | 100         | 4               |
| 2       | 10                     | 100         | 4               |
| 3       | 100                    | 800         | 10              |
| 4       | 500                    | 800         | 400             |
| 5       | 1000                   | 800         | 800             |

Somit wird sichergestellt, dass alle Abstreiferstirnplatten die gleiche Wegstrecke bei Verschmutzungsbeaufschlagung durchlaufen.

### 3.5.3 Untersuchungen zum Feststoffeintrag an Längsabstreifern

Zur Untersuchung des Partikeleintrags wurde der gleiche Versuchsaufbau verwendet wie zur Untersuchung des Schmierstoffaustrags an Längsabstreifern. Allerdings wurde dabei, wie in Bild 36 dargestellt, der obere Längsabstreifer beobachtet. Mit Hilfe der Zustelleinrichtung wurde der Montageblock abgesenkt, bis der untersuchte Abstreifer

auf der Glasplatte auflag. Der Abstreifer wurde dabei mit der Kamera beobachtet. Die Position des ersten Kontakts mit der Glasplatte wurde als Vorspannweg 0 mm festgelegt. Bei den Versuchen wurde die Ölkammer mit Schmierstoff gefüllt und von außen wurden mit der PDZ II Messingpartikel an die Dichtkante gebracht. Durch Neigung des Tisches um  $20^\circ$  bzw.  $90^\circ$  gelangen die Partikel zu dem beobachteten Abstreifer. Der Vorspannweg wurde beginnend mit 0,1 mm in Schritten von 0,1 mm bis zum jeweiligen Maximum gesteigert.

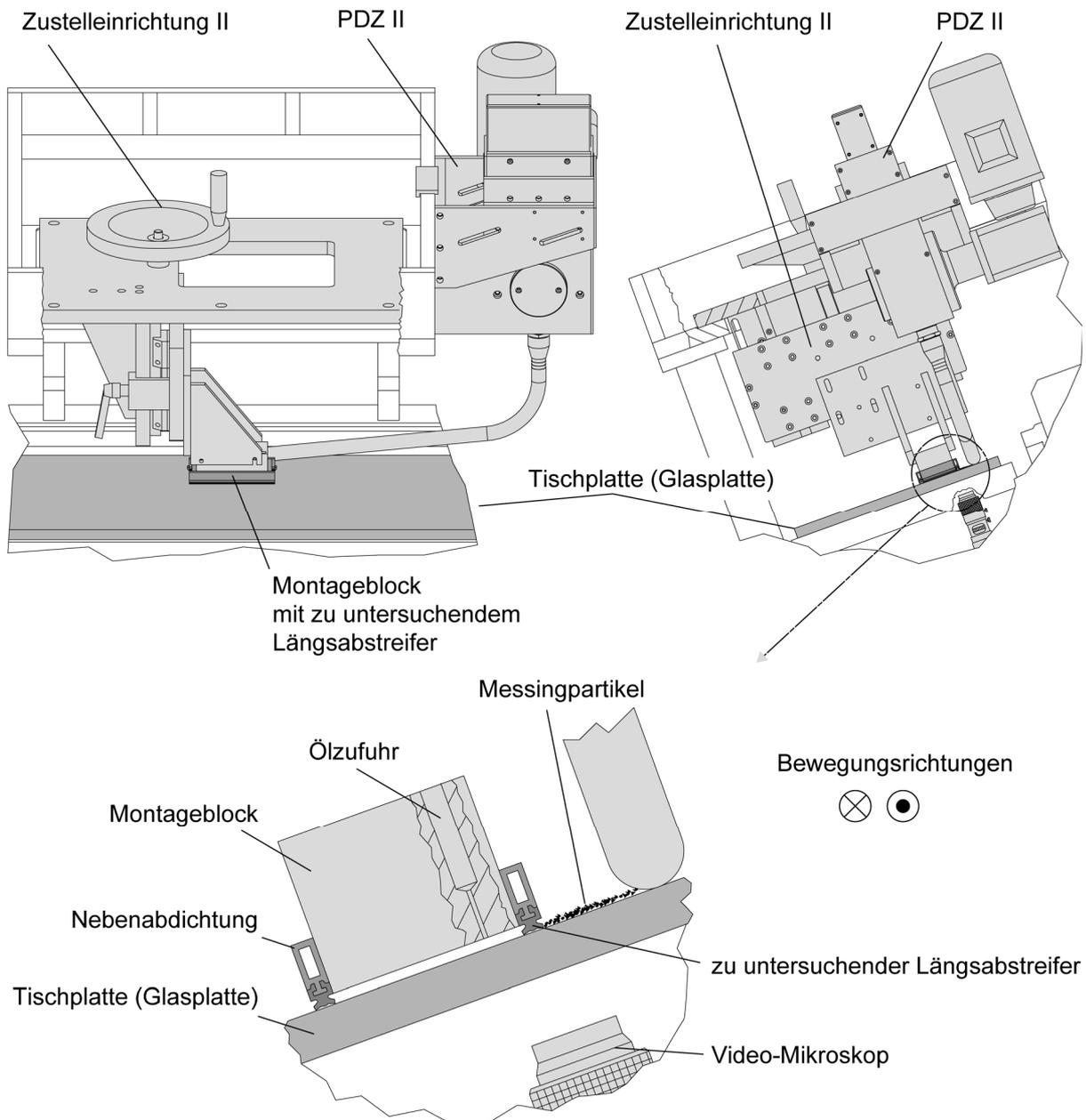


Bild 36: Versuchsaufbau zur Feststoffbeaufschlagung

Die Länge des Hubweges wurde der Geschwindigkeit angepasst. Um den Abstreifer ausreichend lange der Verschmutzung auszusetzen, wurden ab Geschwindigkeiten von 100 mm/s eine große Anzahl an Hieben gefahren. Um die Ergebnisse verschiedener

Abstreifer miteinander vergleichen zu können wurde ein einheitliches Geschwindigkeits- Hubweg-Programm durchlaufen.

Tabelle 7: Geschwindigkeits- Hubweg-Programm

| Schritt | Geschwindigkeit [mm/s] | Hubweg [mm] | Anzahl der Hübe |
|---------|------------------------|-------------|-----------------|
| 1       | 1                      | 100         | 4               |
| 2       | 10                     | 100         | 12              |
| 3       | 100                    | 500         | 100             |
| 4       | 500                    | 700         | 400             |
| 5       | 1000                   | 700         | 800             |

### 3.6 Aufbereitung der Video-Aufnahmen

Aufgrund der schwierigen Lichtverhältnisse, der hohen Geschwindigkeiten und der starken Vergrößerung sind die Aufnahmen der Abstreifer teilweise nur sehr schwer zu interpretieren. Um die Situationen in den einzelnen Bildern besser beschreiben zu können, wurden von den Aufnahmen stark vereinfachte Illustrationen angefertigt.

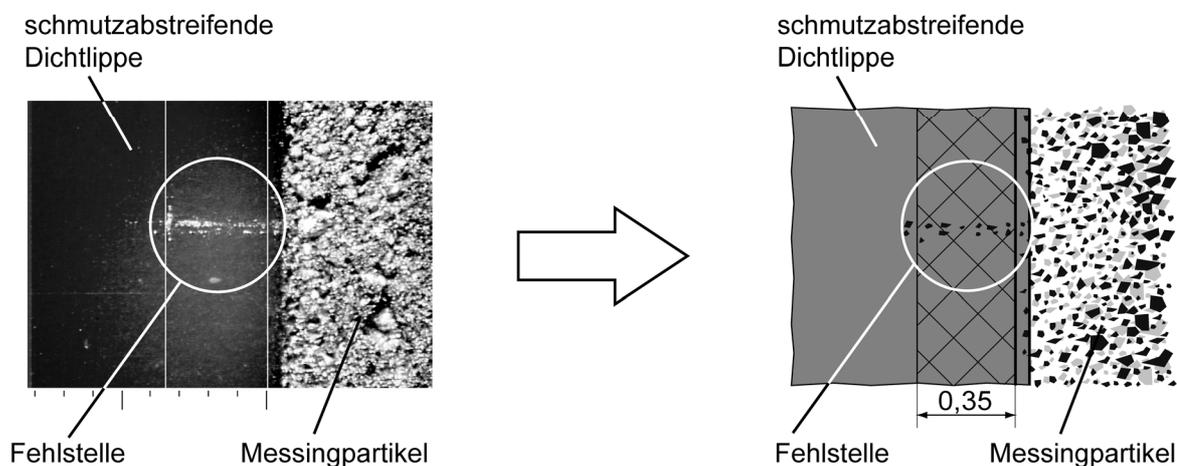


Bild 37: Gegenüberstellung Originalaufnahme, Illustration

Die Illustrationen sind alle nach dem selben Schema aufgebaut. Die Kontaktzonen der Dichtlippen sind mit einer Kreuzschraffur versehen. Werden die Abstreifer quer zur Laufrichtung eingesetzt, befindet sich die Schmutzseite mit den Partikeln immer rechts, der Schmierstoff immer links im Bild. Die Bilder der Längsabstreifer sind so ausgerichtet, dass die Partikel immer oben sind und der abzudichtende Schmierstoff immer unten.