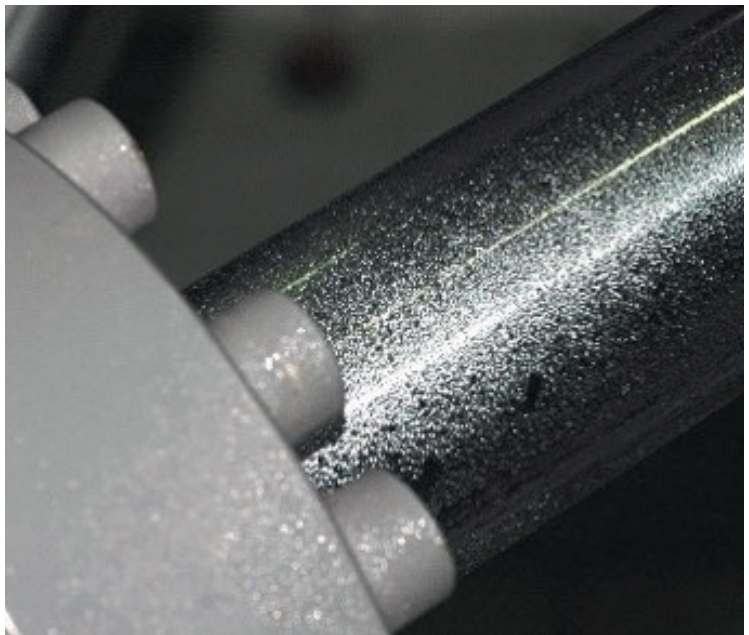


Tobias Mielke

***Wassereinzug über ölhydraulische
Stangendichtsysteme***



Wassereinzug über ölhydraulische Stangendichtsysteme

Water Entrainment via Oil-Hydraulic Rod Sealing Systems

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Tobias Mielke

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Bardow

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Reihe Fluidtechnik

D / Band 98

Tobias Mielke

**Wassereinzug über
ölhydraulische Stangendichtsysteme**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7250-1

ISSN 1437-8434

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meinen Vater,
Hans, Peter und Franz-Josef

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme der RWTH Aachen University. Ich danke dem ehemaligen Institutsleiter Herrn Prof. Hubertus Murrenhoff und der derzeitigen Institutsleiterin Prof. Katharina Schmitz für das entgegengebrachte Vertrauen und die freie Hand bei der Erarbeitung der vorliegenden Ergebnisse. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. André Bardow für die Übernahme des Koreferats und Frau Prof. Nitsch für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Erstellung der Arbeit wäre nur halb so effektiv gewesen ohne die beständige Unterstützung durch Kolleginnen und Kollegen. Stellvertretend danke ich Felix Fischer, Julian Angerhausen, Marcel Rückert, Yannick Duensing, Philipp Kratschun, Maximilian Waerder und Florian Schoemacker. Gleiches gilt für die Unterstützung der vielen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Hierbei möchte ich besonderes Reza Saljooghi, Peter Wintersohle und Nima Jafroudi danken.

Vielen Dank auch an Paul Vogel für die vielen Diskussionen und Ideen, die nicht immer nur die Fluidtechnik (eigentlich nie) betrafen.

Der größte Dank gilt meiner Frau Tina und meinen Kindern. Ohne eure Unterstützung wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Aachen, im Dezember 2019

T. Mielke

Zusammenfassung

Hydraulische Systeme sind in vielen Bereichen des Maschinenbaus unverzichtbar und sorgen dort für die notwendige Bereitstellung von Kräften und Momenten. Gleichzeitig sind hydraulische Systeme einem Trend zur Kostenreduktion und Effizienzsteigerungen unterworfen, wodurch unter anderem die Tanks der Systeme verkleinert werden bzw. teilweise komplett entfallen. Dadurch kann sich das im Umlauf befindliche Druckmedium nur unzureichend beruhigen und Fremdstoffe, wie Partikel oder Fremdflüssigkeiten, nicht oder nur unvollständig abgeschieden werden. Der Eintrag dieser Fremdstoffe muss daher im Voraus wirksam verhindert werden, um eine ausreichende Lebensdauer der Systeme garantieren zu können.

Ein Beispiel für den Eintrag solcher Fremdstoffe ist der Einzug von Wasser, welches über die dynamische Dichtstelle zwischen dem Dichtkörper und der Kolbenstange eines hydraulischen Zylinders eindringen kann. Hierbei kann zwischen dem Eintrag von freiem Wasser und dem Eintrag von im Schmierfilm gelöstem Wasser unterschieden werden.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die Mechanismen des Eintrags von gelöstem Wasser über Stangendichtsysteme systematisch erforscht. Ausgehend von den zugrundeliegenden Modellen des Dichtmechanismus wird der Einzug von im Schmierfilm gelöstem Wasser modelliert. Basis dafür ist die Kenntnis des Wasserlösevermögens der verwendeten Druckfluide sowie die Stoffdaten der Fluide in Abhängigkeit des gelösten Wasseranteils. Des Weiteren werden die Absorptionsmechanismen von Wasser in den Schmierfilm untersucht und der Sättigungsprozess modelliert, parametrisiert und mittels experimenteller Versuche validiert.

Im zweiten Teil wird der Einzug von freiem Wasser untersucht. Basierend auf dem Dichtmechanismus wird der Einzug modelliert. Mittels eines Prüfstands wird das Modell validiert und es werden gängige Dichtsysteme systematisch für verschiedene Betriebspunkte vermessen. Anschließend erfolgt die Erforschung des Einflusses von Abstreifern auf den Wassereinzug.

Die gewonnenen Ergebnisse werden abschließend auf den Anwendungsfall eines Minibaggers übertragen, wodurch die Abschätzung der eingezeichneten Wassermenge möglich ist.

Abstract

Hydraulic systems are indispensable in many areas of mechanical engineering, where those systems provide the necessary forces and moments. At the same time, hydraulic systems are subject to a trend towards cost reduction and increased efficiency, which means, among other things, that the tanks of the systems are reduced in size or in some cases completely omitted. As a result, the pressure medium in the circuit cannot rest sufficiently and foreign matter, such as particles or foreign liquids, cannot be separated or can only be separated incompletely. The entry of these foreign substances must therefore be effectively prevented in advance in order to guarantee a sufficient service life of the systems.

An example of the introduction of such foreign substances is the entrainment of water, which can enter via the dynamic sealing area between the sealing body and the piston rod of a hydraulic cylinder. A distinction can be made between the entry of free water and the entry of water dissolved in the lubricating layer.

In the first part of this work, the mechanisms of the entry of dissolved water via rod sealing systems are systematically investigated. Based on the underlying models of the sealing mechanism, the entrainment of water dissolved in the lubricating film is modelled. The basis for the model is the knowledge of the water dissolving capacity of the pressure fluids as well as the properties of the fluids as a function of the dissolved water content. Furthermore, the absorption mechanisms of water into the lubricating film are investigated and the saturation process is modelled, parameterised and validated by experimental tests.

In the second part the entrainment of free water is investigated. Based on the sealing mechanism, the entrainment is modelled. The model is validated by means of a test bench and common sealing systems are systematically measured for different operating points. Subsequently, the influence of wipers on the water entrainment is investigated.

The results obtained are then transferred to the application case of a mini-excavator, which makes it possible to estimate the amount of water entrained.

Inhaltsverzeichnis

I	Formelzeichen	III
II	Abkürzungen.....	XI
1	Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.1	Wirtschaftliche Problemstellung	2
1.2	Wissenschaftliche Problemstellung	2
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Schäden durch Wasser	5
2.2	Arbeiten zu Stangendichtungen	7
2.2.1	Aufbau von Stangendichtsystemen	9
2.2.2	Untersuchungen des Dichtvorgangs für unterschiedliche Reibzustände	11
2.2.3	Messungen der Schmierfilmhöhe	18
2.2.4	Berechnungen des Kontakts Kolbenstange und Dichtung	26
2.3	Zusammenfassung des Stands der Technik.....	29
3	Einfluss gelösten Wassers auf die Eigenschaften mineralölbasierter Fluide.....	31
3.1	Sättigungskurven.....	31
3.1.1	Bisherige Sättigungsuntersuchungen.....	31
3.1.2	Messprinzip	33
3.1.3	Messergebnisse	37
3.2	Viskositätsänderungen durch gelöstes Wasser.....	38
3.3	Dichteänderung durch gelöstes Wasser	41
4	Untersuchung des Sättigungsprozesses des Ölfilms	45
4.1	Modellbildung	45
4.2	Diffusionskoeffizient.....	47
4.2.1	Analytische Modelle für Diffusionskoeffizienten	48
4.2.2	Experimentelle Bestimmung des Diffusionskoeffizienten im Mikrokanal	50
4.3	Phasenübergang von Wasser in Öl.....	56
4.4	Gleichgewichtszustand der Luft- und Ölwassergehalte	58
4.4.1	Physikalische Grundlagen der Löslichkeit	58
4.4.2	Experimentelle Validierung.....	59
4.5	Berechnung des Sättigungsvorgangs.....	62
4.6	Experimentelle Untersuchung des dynamischen Sättigungsverhaltens	66
4.6.1	Übertragbarkeit der experimentellen Untersuchungen auf den Schmierfilm	66

4.6.2	Analytische Beschreibung des Wassermassenstroms.....	67
4.6.3	Experimentelle Untersuchung	68
4.7	Zusammenfassung.....	73
5	Einzug von freiem Wasser	74
5.1	Aufbau eines Fluideinzugsprüfstands	74
5.1.1	Entwicklung des Messprinzips für geringe Volumenströme.....	75
5.1.2	Temperaturanstiegskompensation	80
5.1.3	Einzugsfluidbereitstellung	82
5.2	Messablauf	86
5.3	Datenaufbereitung	89
5.4	Theoretischer Ansatz zu Berechnung der eingezogenen Wassermenge	91
5.4.1	Validierung des Modells.....	94
5.5	Ergebnisse des Wassereinzugs	95
5.5.1	Untersuchung eines Stufendichtrings mit Vorspannelement.....	95
5.5.2	Untersuchung eines Doppeldichtungssystems.....	98
5.5.3	Untersuchung eines Nutrings.....	102
5.6	Abstreiferwirkung	105
5.6.1	Doppeldichtsystem mit Abstreifer.....	106
5.6.2	Nutring und Abstreifer.....	107
6	Diskussion und Einordnung der Ergebnisse.....	109
7	Zusammenfassung	115
III	Literaturverzeichnis	XII
IV	Abbildungsverzeichnis	XX
V	Tabellenverzeichnis	XXIII
VI	Anhang.....	XXIV

I Formelzeichen

A	Querschnittsfläche eines Strömungskanals	[m ²]
A_{Kolben}	Querschnittsfläche des Messkolbens	[m ²]
A_{Masse}	Oberfläche Ölmasse	[m ²]
A_{Mat}	Koeffizientenmatrix eines linearen Gleichungssystems	[-]
a	Höhe des Kanals	[m]
a_{Fak}	Zusammengefasste Konstanten	[1/s]
a_{Para}	Zusammengefasste Konstanten	[-]
b	Breite des Kanals	[m]
b_{Fak}	Zusammengefasste Konstanten	[kg/kg]
b_{Mat}	Vektor mit berechneten Wassergehalten	[kg/kg]
C	Konstante	[-]
C_{H}	Hydraulische Kapazität	[m ³ /Pa]
c	Federsteifigkeit	[N/m]
c_{Fak}	Zusammengefasste Konstanten	[kg/kg]
c_{p}	Wärmekapazität des Öls	[J/K]
D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
D_{H}	Hydraulischer Durchmesser	[m]
$D_{\text{W,L}}$	Diffusionskoeffizient von Wasser in Luft	[m ² /s]
$D_{\text{W,öl}}$	Diffusionskoeffizient von Wasser in Öl	[m ² /s]
De	Deanzahl	[-]
d	Stangendurchmesser	[m]
d_{Kolben}	Durchmesser des Messkolbens	[m]

E'_{Fl}	Ersatzkompressionsmodul	[Pa]
F_{Feder}	Federkraft	[N]
F_{Reib}	Reibkraft	[N]
Fo	Fourierzahl	[-]
$F_{o\text{opt}}$	optimale Fourierzahl	[-]
g	Stoffübergangskoeffizient	[kg/sm ²]
g'	Proportionalitätsfaktor	[kg/m ² s]
H	Zurückgelegte Strecke, Gesamthub	[m]
h	Spalthöhe	[m]
h_{A}	Spalthöhe im Druckwendepunkt	[m]
h_{Masse}	Höhe der Ölmasse	[m]
h_{S}	Schmierfilmdicke	[m]
h_{a}	Schmierfilmhöhe auf der Stange, Ausfahren	[m]
h_{e}	Schmierfilmhöhe auf der Stange, Einfahren	[m]
$h_{0,\text{T}}$	Schmierfilmhöhe in der Tasche an der Stelle 0	[m]
h_{a}^*	Spalthöhe im Druckmaximum, Ausfahren	[m]
h_{e}^*	Spalthöhe im Druckmaximum, Einfahren	[m]
Δh	Schmierfilmhöhendifferenz	[m]
$h(x)$	Schmierfilmhöhe in Abhängigkeit von x	[m]
k_{B}	Boltzmannkonstante	[J/K]
L	Charakteristische Länge	[m]
L_{geo}	Geometriefaktor	[m]
L_{p}	Länge der Tasche	[m]
Le	Lewiszahl	[-]

l	Länge des Kanals	[m]
M	Molare Masse	[g/mol]
M_{HLP}	Molare Masse von HLP	[g/mol]
M_{W}	Molare Masse von Wasser	[g/mol]
M_i	Molare Masse des Stoffes i	[g/mol]
m	Masse des Fluids in der Kammer	[kg]
m_{Exp}	Exponent	[-]
m_{Fl}	Masse der Flüssigkeit	[kg]
m_{Rich}	Richtungskonstante	[-]
m_{W}	Masse des gelösten Wassers	[kg]
$m_{\text{W,max}}$	Masse des maximal löslichen Wassers	[kg]
$m_{\text{Öl}}$	Masse des Öls	[kg]
m_i	Masse des Stoffes i	[kg]
m_{ges}	Gesamtmasse	[kg]
$\dot{m}$	Wassermassenstrom in Ölschicht	[kg/s]
$\dot{m}_i$	Ölmassenstrom	[kg/s]
$\dot{m}''$	Flächenbezogener Massenstrom	[kg/sm ²]
$\dot{m}_{\text{Diff}}''$	Flächenbezogener Massenstrom durch Diffusion	[kg/sm ²]
$\dot{m}_{\text{Stoff}}''$	Flächenbezogener Massenstrom durch Stoffübertragung	[kg/sm ²]
$\Delta m_{\text{W},1}$	Wassergehaltsänderung des ersten Ölstroms	[kg]
$\Delta m_{\text{W},2}$	Wassergehaltsänderung des zweiten Ölstroms	[kg]
m'_{Film}	Hubbezogene Schmierfilmmasse	[kg/m]
m_{W}^*	Auf Ölmasse bezogene Masse des gelösten Wassers	[kg/kg]

$m_{W,max}^*$	Auf Ölmasse bezogene Masse des maximal lös- baren Wassers	[kg/kg]
N	Fringe order	[-]
N_A	Avogardokonstante	[mol ⁻¹]
n	Brechungsindex	[-]
n_{Exp}	Exponent	[-]
n_i	Stoffmenge des Stoffes i	[mol]
n_W	Stoffmenge des Wassers	[mol]
Pe'	Pécletzahl	[-]
p	Druck	[Pa]
p_{HD}	Hochdruck, abzudichtender Druck	[Pa]
p_{ND}	Niederdruck, Umgebungsdruck	[Pa]
p_{Vor}	Vorspanndruck	[Pa]
$p_{W,max}$	Sättigungsdampfdruck von Wasser	[Pa]
p_c	Pressung in der Tasche	[Pa]
$p_{vor,1}$	Druck vor Speicherladung	[Pa]
$p_{vor,2}$	Druck nach Speicherladung	[Pa]
Δp	Druckdifferenz	[Pa]
Δp_{max}	maximale Kanaldruckdifferenz	[Pa]
Δp_{Ver}	Druckänderung durch Verschieben	[Pa]
Q	Volumenstrom	[m ³ /s]
R	Radius der Kolbenstange	[m]
R_0	Hydrodynamischer Durchmesser	[m]
Re	Reynoldszahl	[-]

Rh	Relativer Wassergehalt	[%]
r	Krümmungsradius des Kanals	[m]
r_K	Kugelradius	[m]
Sc	Schmidtzahl	[-]
Sh	Sherwoodzahl	[-]
s	Kanalbreite	[m]
T	Relative Temperatur	[°C]
T_{abs}	Absolute Temperatur	[K]
T_{ref}	Referenztemperatur	[°C]
T_1	Bezugstemperatur	[K]
T_2	Bezugstemperatur	[K]
t	Zeitkoordinate	[s]
t_{Kap}	Durchlaufzeit durch Kapillare	[s]
t_{Kon}	Durchlaufzeit durch Kanal	[s]
$t_{Sät}$	Zeitkoordinate des Sättigungsvorgangs	[s]
t_α	Zeitspanne bis zum α -Sättigungsgrad	[s]
Δt	Zeitschrittweite	[s]
U	Umfang eines Strömungskanals	[m]
u_a	Stangengeschwindigkeit, Ausfahren	[m/s]
u_e	Stangengeschwindigkeit, Einfahren	[m/s]
V	Volumen	[m³]
V_{Fl}	Volumen des Fluids	[m³]
$V_{L,Mol}$	Volumen eines Luftmoleküls	[m³]
V_W	Volumen des gelösten Wassers	[m³]

$V_{W,Mol}$	Volumen eines Wassermoleküls	[m ³]
$V_{W,max}$	Volumen des maximal lösaren Wassers	[m ³]
$V_{W,gel}$	Einzug gelösten Wassers des Beispiels	[μl]
V_0	Speichervolumen	[m ³]
$V_{0,S}$	Ursprüngliches Fluidvolumen	[m ³]
ΔV	Eingezogenes Fluidvolumen	[m ³]
ΔV_{Aus}	Ausgeschlepptes Volumen	[m ³]
ΔV_{Kolben}	Verdrängtes Volumen durch den Kolben	[m ³]
ΔV_{Ver}	Volumenänderung durch Verschieben	[m ³]
ΔV_{Wasser}	Eingezogenes Wasservolumen	[m ³]
ΔV_{Ol}	Eingezogenes Ölvolumen	[m ³]
ΔV_{ab}	Abgelöstes Fluidvolumen	[m ³]
ΔV_{therm}	Thermisch bedingte Volumenzunahme	[m ³]
ΔV_{max}	Maximal messbarer Einzug	[m ³]
ΔV_{min}	Auflösung des Einzugsensors	[m ³]
v	Stangengeschwindigkeit	[m/s]
v_{Mittel}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
w_{H_2O}	Wassermassenanteil	[kg/kg]
X	Wasserbeladung der Luft	[kg/kg]
x	Allgemeine Variable	[-]
x	Laufkoordinate im Dichtspalt	[m]
x_{Grenz}	Laufkoordinate in der Grenzschicht	[m]
x_{Kolben}	Verschobener Weg des Kolbens	[m]
x_{Mat}	Lösungsvektor mit gesuchten Wassergehalten	[kg/kg]

$x_{öl}$	Laufkoordinate im Öl	[m]
$x_{\text{thermisch}}$	Thermisch bedingte Auslenkung des Messkolbens	[m]
x_W^L	Stoffmengenkonzentration von Wasser in Luft	[mol/mol]
$x_{W,\max}^L$	Stoffmengenkonzentration von Wasser in Luft im Sättigungszustand	[mol/mol]
$x_W^{öl}$	Stoffmengenkonzentration von Wasser in Öl	[mol/mol]
$x_{W,\max}^{öl}$	Stoffmengenkonzentration von Wasser in Luft im Sättigungszustand	[mol/mol]
$\dot{x}$	Geschwindigkeit in x-Richtung	[m/s]
Δx	Schichtmittenabstand	[m]
$\Delta x_{\text{eingezogen}}$	Einzugsbedingte Verschiebung des Messkolbens	[m]
$\Delta x_{\text{gemessen}}$	Gemessene Verschiebung des Messkolbens	[m]
$\Delta x_{\max}$	maximaler Messkolbenweg	[m]
y	Allgemeine Variable	[-]
y_{Spalt}	Laufkoordinate im Spalt	[m]
γ	Wärmeausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹]
$\gamma_W^{öl}$	Aktivitätskoeffizient von Wasser in Öl	[-]
γ_W^L	Aktivitätskoeffizient von Wasser in Luft	[-]
η	Dynamische Viskosität	[Pas]
η_{Wasser}	Dynamische Viskosität von Wasser	[Pas]
$\eta_{öl}$	Dynamische Viskosität von Öl	[Pas]
θ	Temperaturdifferenz	[K]
λ	Wellenlänge	[m]

λ_Q	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
ν	Kinematische Viskosität	[m ² /s]
ν_{HLP}	Kinematische Viskosität von HLP	[m ² /s]
ν_{H_2O}	Kinematische Viskosität von Wasser	[m ² /s]
ν_1	Bezugsviskosität	[m ² /s]
ν_2	Bezugsviskosität	[m ² /s]
ξ	Wassermassenanteil	[kg/kg]
$\xi_{öl,0}$	Wassermassenanteil im Öl zu Beginn	[kg/kg]
ξ_∞	Wassermassenanteil in der Luft am äußeren Ende der Grenzschicht	[kg/kg]
ξ_0	Wassermassenanteil in der Luft an der Phasengrenze	[kg/kg]
ξ_i^n	Wassermassenanteil an der Stelle i zum Zeitpunkt n	[kg/kg]
ξ_{inf}	Wassermassenanteil nach unendlicher Zeit	[kg/kg]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ_{Ges}	Dichte des Gesamtgemischs	[kg/m ³]
ρ_{HLP46}	Dichte von HLP 46	[kg/m ³]
ρ_W	Dichte von Wasser	[kg/m ³]
$\rho_{öl}$	Dichte des Öls	[kg/m ³]
ρ_0	Bezugsdichte von HLP 46	[kg/m ³]
ϕ	Konstanter Faktor	[-]
φ	relative Luftfeuchte	[%]

II Abkürzungen

GPC	Gel-Permeations-Chromatographie
HLP	Hydrauliköl
HLP-D	Hydrauliköl mit D-Additiven
ifas	Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme
IHL	Inverse Hydrodynamische Theorie
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MiF	Gemittelte Schmierfilmdicke
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk
ppm	parts per million
PTFE	Polytetrafluorethylen
PU	Polyurethan
SmF	Schmierfilmdicke