

Andreas Janssen

Wirksamkeit tribologischer Mikrostrukturen bei extremen Einsatzbedingungen und Ableitung eines Fertigungsmodells für das UKP-Laserabtragen



Wirksamkeit tribologischer Mikrostrukturen bei extremen
Einsatzbedingungen und Ableitung eines Fertigungsmodells
für das UKP-Laserabtragen

Effectiveness of Tribological Microstructures at Extreme
Load Conditions and Derivation of a Manufacturing Model
for USP Laser Ablation

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

vorgelegt von

Andreas Janssen

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 2018

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Andreas Janssen

Wirksamkeit tribologischer Mikrostrukturen bei extremen Einsatzbedingungen und Ableitung eines Fertigungsmodells für das UKP-Laserabtragen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 11/2019



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Andreas Janssen:

Wirksamkeit tribologischer Mikrostrukturen bei extremen Einsatzbedingungen und Ableitung eines Fertigungsmodells für das UKP-Laserabtragen

1. Auflage, 2019

Apprimus Verlag, Aachen, 2019
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-708-5

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Für
Claudia & Katharina

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen.

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, in seiner Funktion als Leiter des Fraunhofer IPT und Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule RWTH Aachen für das Ermöglichen der Arbeit im Umfeld der industrienahen Forschung sowie für die akademische Betreuung.

Ebenfalls danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT und Inhaber des Lehrstuhls für Lasertechnik der RTWH Aachen, nicht nur für die Übernahme des Koreferats, sondern im Besonderen für die sehr hilfreichen Diskussionen zur Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

So eine Arbeit schreibt sich nicht im stillen Kämmerlein, insofern habe ich großen Dank zu richten an das geschäftige Abteilungsumfeld, indem diese Arbeit entstehen konnte. Es sind dies Dr. Kristian Arntz sowie die Kollegen der Abteilung *Nichtkonventionelle Fertigungsverfahren und Technologieintegration*, aber auch all die Kollegen aus anderen Abteilungen sowie den Dienstleistungsbereichen am Fraunhofer IPT. Ohne die fachliche Unterstützung sowie den stetigen anregenden, kritischen und konstruktiven Diskurs im Forschungsalltag kann eine solche Arbeit nur schwerlich gelingen. Danken möchte ich auch den ehemaligen Kollegen Andrés Castell-Codesal, Dr. Dmitri Donst, Sascha Bausch, Dr. Bettina Fischer, Dr. Guilherme Mallmann und Dr. Frank Bernhardt, die mich allesamt, besonders in der experimentellen Schaffenszeit, begleiteten. Mein besonderer Dank geht an die Kollegen Harald Schumacher, Christian Huschka und Dr. Sascha Frank. Durch deren tägliche geistige Konsultation war es mir erst möglich, neben einer wissenschaftlichen Schaffenskraft eine adäquate gesellschaftliche solche zu entwickeln und darin zu wirken. Besonders ersterer ist mitverantwortlich dafür, dass ich nach dieser Phase noch alle Sinne beisammen habe.

Die experimentellen Arbeiten zu einer solchen Dissertation erledigen sich beileibe nicht durch bloß zwei Hände. Daher danke ich an dieser Stelle mit Hochachtung den großartigen Wissenschaftlern, die in ihrer damaligen Funktion als wissenschaftliche Mitarbeiter die experimentellen Arbeiten zu dieser Dissertation unterstützt haben und von denen keiner namentlich unerwähnt zu bleiben verdient: Manuel Schüler, Wolfgang Wietheger, Ditmar Paulus, Eva-Maria Pohlmann, Nathalie Régis Farias, Patrícia Helena de Oliveira Teixeira, Muhammad Arif Reichling und Mohammad Dadgar.

Weiterhin möchte ich Dank aussprechen an verschiedene Menschen, die mir auf dem Weg der Promotion begegnet sind: Den Herren Marco Haesche, Dominic Linsler, Marko Petrik und Torsten Schmidt bei der Entwicklung der persönlichen Grundgedan-

ken dieser Thematik. Hans-Jörg Götzl, Michael Jung, Prof. Henara Costa und Dr. Benedict Korischem beim Studium interessanter Anwendungsfälle. Dr. Bihotz Pinedo, Dr. Amaya Igartua und Dr. Marcello Conte bei den Untersuchungen zu feststoffbeladenen Zwischenmedien. All jene haben zu entscheidenden Zeitpunkten entscheidende Impulse gegeben, sowohl fachliche als auch geistige. Im Besonderen danke ich hier Dr. Sergio Guerreiro und Herrn Günther Afflerbach, die ich als Inspiratoren und langjährige Begleiter meiner wissenschaftlichen Schaffenskraft sehr schätze.

Nicht nur im beruflichen, sondern auch im privaten Umfeld findet sich die Unterstützung, die nötig ist, eine solche Arbeit erfolgreich abschließen zu können. So habe ich den Freunden zu danken, die fachmännisch die Last des Dissertationsalltags zu verdünnen wussten: Dr. Pamela Nienkemper, Michael Lothmann, Rüdiger Naas und Thorsten Faßbender. Den Herren Jose, Aront, Haemisch und Gneun danke ich für eine Vielzahl an erhebenden, entrückenden und zugleich erholsamen Reisen – als Gegenpol zu den realitätssatten Dissertationsmühen. Großen Dank richte ich an die beiden Freunde, die mich über zwei Jahrzehnte hinweg nicht nur als Freunde begleitet haben, sondern auch die Schulzeit, das Studium der Physik und die wissenschaftliche Laufbahn in der Fraunhofer-Familie mit mir teilten: Dr. Oliver Fitzau und Daniel Mahlmann. Letzterer war es, der mich mit wohlgewählten Worten in die Physik einlud.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Dazu zählen meine Eltern sowie meine Brüder und Schwestern, meine Schwägerinnen und Schwäger, meine Neffen und Nichten. Dazu zähle ich aber auch Walter und Rita Grehl sowie deren Familie. Neben all diesen war es vor allem meine wunderbare Frau Claudia, die es mit ihrer niemals (sic!) erschöpfenden Geduld geschafft hat, mir über die lange Zeit nicht nur Rückhalt zu geben, sondern ein spirituelles Refugium der Ruhe zu schaffen. Ohne Ihre Unterstützung hätte ich dieses Projekt nicht zu Ende bringen können.

Meinen Schwiegereltern Marianne und Klaus Marx danke ich von Herzen für die Unterstützung besonders in der Schreibphase der Arbeit. Sie ermöglichten es mir, mich eine derart lange Zeit nicht der Familie widmen und so das Projekt Promotion abschließen zu können. Besonders für die zeitintensive, akribische Durchsicht der Dissertation danke ich Ersterer ergebenst.

Während meiner Dissertation ist unsere Tochter Katharina geboren worden, die ich trotz der gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse als die bedeutendste Neuerung im zeitlichen Rahmen dieser Dissertation erachte. Sie lehrte mich Demut und Güte sowie die Fähigkeit, Wichtiges von Unwichtigem zu unterscheiden.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung und Motivation	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
2.1	Entstehung der Tribologie	5
2.2	Grundlagen der Tribologie	7
2.2.1	Reibung	7
2.2.2	Verschleiß	12
2.2.3	Kontaktmechanik als Ursprung für Reibung und Verschleiß	14
2.3	Einfluss von gezielt gefertigten Oberflächen-Mikrostrukturen auf Reibung und Verschleiß	15
2.3.1	Kavitationsmodell	17
2.3.2	Hydrodynamisches Modell	18
2.3.3	Schmierstoffreservoir	20
2.3.4	Kontaktflächenoptimierung	21
2.3.5	Partikelfalle	23
2.3.6	Auswertung und Zusammenfassung	25
2.4	Laserfertigung von tribologischen Mikrostrukturen	30
2.4.1	Der Abtragprozess mit gepulster Laserstrahlung	31
2.4.2	Fertigung von tribologischen Mikrostrukturen durch Laserabtrag	34
2.4.3	Fertigungsgenauigkeit von tribologischen Mikrostrukturen	37
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	39
4	Systemtechnik zur Fertigung und Messtechnik	43
5	Untersuchung der Temperaturabhängigkeit	47
5.1	Methoden und Materialien	48
5.1.1	Tribometer	48
5.1.2	Verwendete Werkstoffe und Proben	49
5.1.3	Laserbearbeitung	52
5.1.4	Testprozedur	62
5.2	Ergebnisse	66
5.3	Diskussion	72
5.4	Fazit	78
6	Untersuchung mit abrasivem Zwischenmedium	79
6.1	Methoden und Materialien	80
6.1.1	Tribometer	80
6.1.2	Verwendete Werkstoffe und Proben	81
6.1.3	Testprozedur	83
6.2	Ergebnisse	84
6.2.1	Näpftchendurchmesser	85

6.2.2	Näpfchentiefe / Aspektverhältnis	87
6.2.3	Flächenbedeckungsgrad	88
6.3	Diskussion	89
6.3.1	Allgemeine Diskussion der Verläufe	89
6.3.2	Diskussion möglicher Wirkzusammenhänge	91
6.3.3	Überprüfung der Reibphänomene mittels Verschleißbildern	94
6.4	Fazit	98
7	Bestimmung der Fertigungsgenauigkeit von Mikronäpfchen	101
7.1	Methoden der messtechnischen Bestimmung von Näpfchen	102
7.1.1	Bewertung der virtuellen Tastschnittmethode	102
7.1.2	Erweiterte Messmethoden	107
8	Fertigung von Mikronäpfchen mittels der Spiralstrategie	111
8.1	Randbedingungen an die Fertigungsparameter	111
8.2	Experimentelle Untersuchungen	112
8.2.1	Stationärer Abtrag	112
8.2.2	Linienabtrag	117
8.2.3	Versuche zur Näpfchenfertigung	120
8.2.4	Modellbildung	125
8.2.5	Methode zur Anordnung von Näpfchen	129
8.2.6	Fazit und Diskussion	133
9	Zusammenfassung und Ausblick	135
10	Literaturverzeichnis	141
11	Anhang	159
11.1	Literaturliste zum „Einfluss von gezielt gefertigten Oberflächen- Mikrostrukturen auf Reibung und Verschleiß“	159
11.2	Laser- und prozessspezifische Parameter bei der Oberflächenstrukturierung	178
11.3	EDX-Spektren	179
11.4	Bestimmung der Fertigungsgenauigkeit der Maschine	180
11.5	Versuche zur Modellbildung	187
11.6	Stokes-tool	193

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Buchstaben

a	$\mu\text{m}/^\circ$	Windungsabstand
A	-	Aspektverhältnis
A _D	%	Flächenbedeckung
b _B	μm	Bahnbreite Laserspurr
cw		Continous wave
d	μm	Durchmesser
d1, d2	mm	Laterale Nöpfchenabstände, Stokes-tool
E _P	J	Pulsenergie
F(z)	J/cm^2	Fluenz
F ₀	J/cm^2	Spitzenfluenz
F _N	N	Normalkraft
F _R	N	Reib(ungs)kraft
f _{rep}	Hz	Pulswiederholrate
f _s	s	Femtosekunde
F _{th}	J/cm^2	Schwellfluenz
h _D	μm	Nöpfchentiefe
H _{min}	-	Minimale Schmierfilmdicke
I(z)	W/cm^2	Strahlungsintensität
I ₀	W/cm^2	Spitzenintensität
l _t	μm	Teststrecke Rauheitsmessung
M ²	-	Beugungsmaßzahl
n	-	Anzahl Bearbeitungszyklen
n ₀	-	Zielwert für Wiederholungen
ns	s	Nanosekunde
Ø	μm	Durchmesser Nöpfchen
PAB	nm	Abtrag pro Puls
p%	-	„Distortion“, Wert der Verzerrung, Stokes-tool
P _A	Pa	Flächenlast, Anpressdruck, Flächenpressung

P_{av}	W	Mittlere Laserleistung
P_P	W	Pulsspitzenleistung
ps	s	Pikosekunde
r_{max}	μm	Maximaler Näpfchenradius
r_{sp}	μm	Spiralradius
T	$^{\circ}\text{C}$	Schmierstofftemperatur
t_H	s	Pulsdauer
t_P	s	Pulspause
\ddot{U}_B	%	Bahnüberlapp
\ddot{U}_P	%	Pulsüberlapp
\dot{V}	mm^3/s	Volumenabtragrate
v_f	mm/s	Strahlableitgeschwindigkeit
v_r	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
v_j	μm	Verjüngung pro Schicht
v_{rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit (im Tribokontakt)
$w(z)$	μm	Strahlradius
w_0	μm	Strahltaile
Zabl	μm	Abtragtiefe pro Puls
z_r	μm	Rayleigh-Länge

Abkürzungen

CAD		Engl.: Computer aided design
EDX	-	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX = engl.: <i>energy dispersive X-ray spectroscopy</i>)
HD		Hydrodynamik
KP		Kurzpuls
LMB		Lasermaterialbearbeitung
SE	-	Sekundärelektronen (-bild)
UKP		Ultrakurzpuls

Griechische Buchstaben

Δ	μm	Fokusverfahrweg
δ	μm	Energieeindringtiefe
Δi	-	Abweichung Messwerte
Δd	μm	Offset auf den Modelldurchmesser
$\Delta z_{\text{Schicht}}$	μm	Abtrag pro Schicht
μ	-	Reib(ungs)koeffizient
η	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	Dynamische Viskosität
Θ	$^\circ$	Kantenglättungswinkel
θ	$^\circ$	Divergenzwinkel
λ	nm	Wellenlänge
λ_c	μm	Grenzwellenlänge Rauheitsmessung
φ	$^\circ$	Drehwinkel

1 Einleitung und Motivation

„Zusammenhänge sind ziemlich eigen. Sie verstecken sich manchmal vor unseren Augen.“

Dieses Zitat, das dem unter dem Pseudonym Thom Renzie veröffentlichenden Autor [RENZ17] zugeschrieben wird, beschreibt trefflich die Situation in dem Forschungsfeld, dem sich die vorliegende Arbeit widmet.

Mit der Entwicklung von kommerziell – oder zumindest für die Forschung ohne große Hindernisse – verfügbaren Lasern, wurde Mitte des 20. Jahrhunderts der Grundstein für ein völlig neues und neuartiges Feld der Fertigungstechnologien gelegt. Das zunächst unüberschaubare Feld möglicher Anwendungen für diese einzigartige Technologie wurde sukzessive durch Forschergruppen weltweit bearbeitet. Dabei kristallisierten sich viele Schwerpunktthemen heraus, die in ganz verschiedenen Fachgebieten – wie Medizin, Teilchenphysik, Fertigungstechnologie oder optischer Messtechnik – zum Keim jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit teilweise bahnbrechenden Errungenschaften wurden [RADL10].

Eine dieser Keimzellen war die neu gewonnene Möglichkeit, Oberflächen, die über die bloße Bauteilbegrenzung hinaus eine gewisse technische Funktion übernehmen, gezielt einzustellen bzw. für ihre spätere Aufgabe zu präparieren. Aus der konventionellen Fertigung heraus standen seit jeher begrenzte Optionen zur Oberflächengestaltung zur Verfügung, da diese im klassischen Sinn als ein Resultat aus der Summe der Fertigungsschritte in der Herstellungshistorie des Bauteils hervorgeht. Mit dem Laser stand nun ein Werkzeug zur Verfügung, das über nie dagewesene Eigenschaften verfügt, dazu zählen beliebige Formbarkeit, berührungs- und verschleißfreie Materialbearbeitung, beliebige Skalierbarkeit und daraus resultierend die Anwendbarkeit auf ein nahezu endloses Werkstoff- und Bauteilspektrum.

Eine der wohl bedeutendsten technischen Funktionen von Oberflächen fester Materialien ist die Fähigkeit, in Kontakt mit anderen festen, flüssigen oder gasförmigen Werkstoffen operativ bedingten Kräfteinflüssen zu widerstehen. Diese Fähigkeit und alle ihre ursächlichen und begleitenden Phänomene hat der Brite Peter Jost 1966 in dem seither verwendeten Begriff der „Tribologie“ [JOST66] zusammengefasst, der aus dem Griechischen mit „Reibungslehre“ übersetzt wird. Heute am häufigsten verwendete Definitionen [CZIC10] [CHAT14] beschreiben die Tribologie maßgeblich mit Bezug auf Reibung und Verschleiß. In diesem Zusammenhang entstand mit vermehrtem Einsatz des Lasers zur Oberflächenfunktionalisierung schnell eine Fülle an Publikationen, Forschungsergebnissen und anderweitig veröffentlichten Erkenntnissen. Kern nahezu aller Arbeiten und bis heute ein massiv bearbeitetes Forschungsfeld ist das Einbringen zusätzlicher Mikrostrukturen – die in dieser Verwendung häufig „*Tribostrukturen*“ oder „*tribologische Strukturen*“ genannt werden – durch Laserstrahlung in endgefertigte Oberflächen. Verschiedene Phänomene auf verschiedenen Größenskalen sollen dazu führen, dass Reibung und Verschleiß in den betroffenen Kontaktzonen reduziert werden, ohne dabei die operativen Eigenschaften des Gesamtsystems zu beeinflussen.

Bei fertigungstechnologischer Betrachtung des Status Quo zeigt sich eine starke Diskrepanz zwischen der großen Menge wissenschaftlicher Erkenntnisse und dem geringen Ausmaß ihrer Anwendung im industriellen und kommerziellen Umfeld. Als Hauptgrund dafür wird die Fülle singulärer, stark fokussierter Versuchsergebnisse bei einem zu hohen Maß an Widersprüchlichkeit, kontroversen Ergebnissen und daraus resultierend die Unvereinbarkeit der Erkenntnisse ausgemacht.

So konnten grundlegende Einzelmechanismen identifiziert werden, die geeignet sind, die Reduzierung von Reibung und Verschleiß zu erklären. Diese Erklärungen jedoch sind stark an Randbedingungen der Untersuchungsmethoden gebunden, was zum einen dazu führte, dass zum aktuellen Zeitpunkt der Wissensstand zu den einzelnen Mechanismen stark unterschiedlich ausgeprägt ist. Zum anderen existiert bis dato kein ganzheitliches Modell, das die Wirksamkeit von Tribostrukturen für verschiedene Umgebungen und unter verschiedenen Belastungszuständen erklären kann.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Annahme, dass die vorhandene Wissensbasis, aufgrund ihres Umfangs und der Detailtiefe, in eine vollständige reduktionistische Beschreibung des Phänomens „Tribostrukturen“ überführt werden kann. Bei der Analyse des Kenntnisstands konnten Wissenslücken identifiziert werden, deren Schließung für die Annäherung an das Ziel eines vollständigen Erklärungsmodells notwendig ist.

Es sind diese die Wirksamkeit von tribologischen Strukturen unter stark abrasiven Bedingungen sowie der Einfluss der Temperatur auf die Funktionalität von Tribostrukturen. Beide Punkte werden in der vorliegenden Arbeit durch Versuchsreihen adressiert, die sich auf jeweils eine der Fragestellungen konzentrieren. Diese beiden Aspekte der Wirksamkeit von Tribostrukturen bilden die beiden ersten Forschungsschwerpunkte dieser Arbeit. Aus dem Studium des dazugehörigen Wissensstands heraus ergibt sich ein dritter Aspekt, der direkt die Herstellungsmethodik betrifft.

Es existieren weder Empfehlungen noch Vorschriften noch eine konsistente Wissensbasis für die Fertigung von tribologischen Mikrostrukturen. Dies führt zu einer Nichtvereinbarkeit großer Teile der verfügbaren Literatur, was die akkuraten Formen, die Dimensionen, die Toleranzen sowie die Reproduzierbarkeit der Mikrostrukturen betrifft. Daher wird in dieser Arbeit das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Herstellung von tribologischen Mikrostrukturen – gepulste Laserablation (auch: Laserabtrag) – untersucht. Ziel dabei ist es, ein Herstellungsprinzip zu entwickeln, das von allgemeiner deskriptiver Natur ist und somit in einem breiten Feld von Anwendungen und bei Verwendung verschiedener gängiger Laserfertigungssystemen anwendbar ist.

Introduction

A German quotation by Thom Renzie accurately describes the situation in the field of research to which this work is dedicated, it reads [RENZ17]:

“Interrelationships are quite peculiar. They tend to hide from our attention.”

With the development of lasers commercially available - or at least for research without major obstacles - the cornerstone for a completely new and novel field of manufacturing technologies was laid in the middle of the 20th century. The initially unmanageable field of possible applications for this unique technology was successively worked on by research groups worldwide. This has led to the emergence of many key topics that have become the seeds of decades of research and development work in a wide variety of fields - such as medicine, particle physics, manufacturing technology or optical metrology [RADL10].

One of these nuclei was the newly gained possibility of specifically adjusting or preparing surfaces for their later task if they assume a certain technical function beyond the physical limitation of the component. From conventional production, only limited options for surface design have been available, as it in the classical sense is a result of the sum of the manufacturing steps in the manufacturing history of the component. With the laser, a tool was now available that has unprecedented properties, including arbitrary formability, contact-free and wear-free material processing, any scalability and the resulting applicability to an almost endless range of materials and components.

One of the most important technical functions of surfaces of solid materials is the ability to withstand operational forces in contact with other solid, liquid or gaseous materials. This ability and all its causal and accompanying phenomena was summarized by the British Peter Jost in 1966 in the term *“tribology”* [JOST66], which is translated from Greek as *“friction theory”*. Today's most frequently used definitions [CZIC10][CHAT14] largely describe tribology in terms of friction and wear, and in this context the increased use of lasers for surface functionalization quickly led to a wealth of publications, research results and other published findings. The core of almost all work and still a massive research field is the introduction of additional microstructures - often called *“tribostructures”* or *“tribological structures”* in this application - into finished surfaces by laser radiation. Different phenomena on different size scales lead to a reduction of friction and wear in the affected contact zones without influencing the operative properties of the overall system.

An analysis of the status quo from a production technological view reveals a large discrepancy between the large amount of scientific findings and the small extent to which they are applied in industrial and commercial environments. The main reason for this is the abundance of singular, highly focused test results with a too high degree of contradiction, controversial results and the resulting incompatibility of findings.

In this way, basic individual mechanisms could be identified that are suitable to explain the reduction of friction and wear. However, these explanations are strongly tied to the

boundary conditions of the investigation methods, which led on the one hand to the fact that at the current time the state of knowledge on the individual mechanisms is strongly differently pronounced. On the other hand, no holistic model exists to date that can explain the effectiveness of tribostructures for different environments and under different load conditions.

The present work is based on the assumption that the existing knowledge basis, due to its scope and the depth of detail, can be transformed into a complete reductionistic description of the phenomenon "*tribostructures*". In the analysis of the state of knowledge, gaps in knowledge could be identified which need to be closed in order to approach the goal of a complete explanation model.

These are the effectiveness of tribological structures under highly abrasive conditions and the influence of temperature on the functionality of tribostructures. In this work, both points are addressed by series of experiments, each of which concentrates on one of the questions. These two aspects of the effectiveness of tribostructures are the first two focal points of this work. The study of the corresponding level of knowledge gives rise to a third aspect that directly affects the manufacturing methodology.

There are neither recommendations nor regulations nor a consistent knowledge base for the production of tribological microstructures. This leads to the incompatibility of large parts of the available literature with regard to the accurate forms, dimensions, tolerances and reproducibility of the microstructures. Therefore, the most frequently used method for the production of tribological microstructures - pulsed laser ablation - is investigated in this thesis. The aim is to develop a manufacturing principle that is of a general descriptive nature and can therefore be used in a wide range of applications and with the use of various common laser manufacturing systems.

2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

State of the art in research and industry

Die Forschungsschwerpunkte dieser Arbeit sind zum einen der Einfluss von Oberflächen-Mikronäpfchen auf das Reib- und Verschleißverhalten in Anwesenheit hochabrasiver Medien und bei erhöhten Temperaturen und zum anderen die Herstellung dieser Mikronäpfchen durch Puls laserablation. Der Klarheit halber werden die beiden Themenkomplexe nachfolgend separat einer wissenschaftlich-technologischen Bestandsaufnahme unterzogen, um den Rahmen und den Ausgangspunkt für die beschriebenen Arbeiten zu definieren. Aus beiden Gebieten werden anhand des gezeigten Wissensstands die jeweiligen Fragestellungen für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

2.1 Entstehung der Tribologie

The emergence of tribology

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung.“ [DETE02]

Im Angesicht dieser Definition begann die Geschichte der Tribologie bereits in den frühesten Stadien menschlicher Evolution. Schon seit der Nutzung von Feuersteinen vor ca. 700 000 Jahren spielte das Phänomen der Reibung im Alltag des Menschen und seiner Vorfahren eine mehr als entscheidende Rolle – wenn auch von einem Verständnis dessen nicht ausgegangen wird. Spätestens jedoch mit der Herstellung von lagerähnlichen Kontakten zur Kraftaufnahme, wie beispielsweise bei der Nutzung von natürlichen Vertiefungen in Steinen als Türangelpanne vor etwa 7 000 Jahren im Assyrischen Reich, hatte das aktive Gestalten von Reibung Einzug in das technische Denken der Menschen gefunden. Bemerkenswert ist die Beobachtung, dass diese Art der Türaufhängung mindestens 3 000 Jahre verwendet wurde, wobei die Vertiefungen zu späteren Zeitpunkten mit Kupfer ausgelegt waren. Hier lässt sich bereits die Denk- und Vorgehensweise erkennen, die den modernen Ingenieurwissenschaften zu eigen ist. Die Wiege der Tribologie als Erfahrungswissenschaft liegt im Mesopotamien ab 3 500 v. Chr. Mit der Entwicklung von Lagern, Bohrgeräten und auf Rädern rollenden Fahrzeugen zeigten die frühen Zivilisationen ein bereits fundiertes Verständnis von Reibung, dessen wohl bedeutungsvollste Folge die Verwendung von flüssigen Schmiermitteln zur Reibungsreduzierung bei hohen Lasten war. So wurde beispielsweise beim Bau der ägyptischen Pyramiden die Positionierung der im Schnitt 2,5 Tonnen schweren Steinblöcke bis auf 0,5 mm genau dadurch bewerkstelligt, dass Mörtel zwischen den Blöcken eingefügt wurde. Solch ein Mörtel übt bei diesen Megalithbauten aufgrund des hohen Gewichts der Blöcke nicht die bekannte stabilisierende verbindende Funktion aus, sondern diente dabei als Schmiermittel für die oft sehr glatt behauenen Steine. Es lässt sich dieses Vorgehen als eindrucksvolle – vielleicht erste – Auslegung eines geschmierten tribologischen Systems interpretieren, bei dem das Zusammenspiel von Schmiermittel und Oberfläche berücksichtigt wurde. [DOWS79a]

Aus diesem historischen Abriss lässt sich – auch mit Blick auf die nachfolgenden Ausführungen – ein Paradigmenwechsel bezüglich der Intention und Motivation von Fertigungsinnovation erkennen. Dieser Wechsel, der initiiert wurde durch den rasanten Anstieg der Erdbevölkerung einhergehend mit Industrialisierung, Konsumgesellschaften und Globalisierung, lenkte die Intention zur Entwicklung von neuen Fertigungsmöglichkeiten und technischen Neuerungen weg vom persönlichen Antrieb des Einzelnen, sein lokales Umfeld gestalten zu können und hin zu globalen Interessen. Doch obschon die Herbeiführung von Innovationen in erster Linie beruflicher Natur war und somit – ebenso wie heute – dem Erhalt der Lebensgrundlagen diene, waren sowohl die Notwendigkeit als auch die Rahmenbedingungen für Fortschritt und Entwicklung beim vorindustriellen Forscher noch im persönlichen Alltagsumfeld. In der modernen Forschung erstrecken jene sich auf mindestens nationale, in der Regel aber globale Bedürfnisse und Fragestellungen, wie etwa Massenproduktion, globaler Arbeitsmarkt sowie Umweltschutz und Ressourceneffizienz.

Lag – um bei den genannten Beispielen zu bleiben – der Erfolg vergangener Tage noch in der Verfügbarkeit einer beweglich gelagerten Türe, die mehr Schutz vor Wetter und ungebeten Gästen aus der lokalen Fauna bot als eine Tierhaut oder in der Entwicklung einer Vorrichtung, die die Herstellung von Töpfereiwaren erleichterte, so sind die Ziele heutiger Entwicklungen maßgeblich geprägt durch ökonomische und ökologische Kriterien, die in einem großen gesellschaftlichen Maßstab bewertet werden.

Um ein Verständnis dafür zu bekommen, lohnt ein Studium dessen, was Verbesserungen von tribologischen Eigenschaften technischer Oberflächen bewirken können. Es beträgt der ökonomische Gesamtverlust, der durch Reibung und Verschleiß verursacht wird, allein in Deutschland aktuell bis zu 250 Mrd. Euro jährlich, während es Mitte der 1980er Jahre noch rund 40 Mrd. DM waren [GÜLK86]. Untersuchungen zeigen für Deutschland Verluste von etwa 5 – 8 % des Bruttoinlandsprodukts (BIP) [CHAT14]. Dabei lassen sich viele direkte Auswirkungen (Bauteilschaden, -verlust oder -überarbeitung) und indirekte (Produktionsausfälle, Wartungskosten, Lagerhaltung, verteuerte Produktion und verminderte Qualität) bestimmen, die in Summe zu einem Verlust von etwa 10 % der eingesetzten Primärenergie führen [DIEN17]. Bei direkter Investition in bestehende Technologien schätzt man das Einsparpotenzial in den Industrienationen auf 1,6 % des jeweiligen BIP [KATO14]. Eine ähnliche, aber detailliertere Studie ermittelte für die Vereinigten Staaten von Amerika USA jährliche Verluste von 500 Mrd. US-Dollar. Für einen Zeitraum von 32 Jahren (1978 bis 2010) wurde unter Berücksichtigung des industriellen Wirtschaftswachstums ein energetischer Verlust von bis zu 18,4 Brd. Btu (1 *british thermal unit* \approx 1055 J) errechnet [CHAT14], was umgerechnet ca. 5,4 Mrd. kWh entspricht. Diese Zahlen spiegeln die Ambitionen wider, mit denen seit vielen Jahren das Thema Tribologie und Verbesserung von tribologischen Eigenschaften bestimmter technischer Systeme forschungsseitig verfolgt wird.

2.2 Grundlagen der Tribologie

Fundamentals of tribology

Die nachfolgenden Ausführungen sollen einen Einblick geben in den aktuellen Stand des Wissens bezüglich allgemeiner Prinzipien der modernen Tribologie. Darüber hinaus werden die grundlegenden Zusammenhänge und Kenntnisse zu solchen tribologischen Systemen gegeben, die neben den beiden Reibkörpern ein flüssiges Medium beinhalten. Dazu sollen zunächst die allgemeine Vorstellung eines „*Tribologischen Systems (Tribosystem)*“ und die Begrifflichkeiten dargelegt werden.

Ein Tribosystem ist kein eigenständiges technisches System, sondern der Teil eines technischen Systems, dessen „*Funktion definitionsgemäß mit tribologischen Vorgängen, d. h. mit Kontaktvorgängen und aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung, verbunden*“ ist [JACO12]. Die Konstellation der Komponenten eines Tribosystems sowie die relevanten Begrifflichkeiten sind in Abbildung 2-1 illustriert. Ein Tribosystem wird grundsätzlich gebildet aus dem *Körper* (auch *Grundkörper* genannt), dem *Gegenkörper* sowie beteiligten Zwischenmedien. Für die Benennung Grund- und Gegenkörper gibt es keine einheitliche Vorgabe. Die Gesamtheit der Eigenschaften eines Tribosystems kann interpretiert werden als Funktion, die die Eingangsgrößen, welche gebildet werden durch das Beanspruchungskollektiv, auf einen Satz von Ergebnisgrößen abbildet. Die tribologischen Messgrößen können dabei ausgewertet werden im Sinne einer Analyse der Systemperformance (*Tribometrie*).

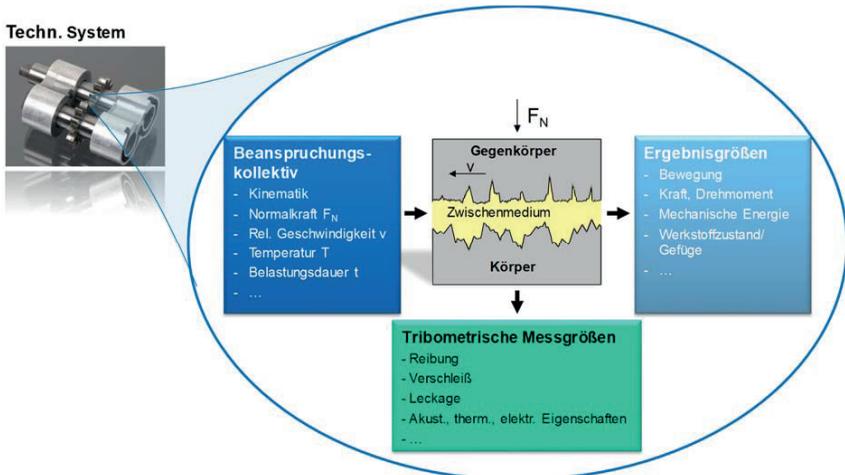


Abbildung 2-1: Schema und Begriffe des Tribosystems (Beispielfoto: Zahnradpumpe)

2.2.1 Reibung

Friction

Die Ausgangssituation für die moderne Forschung in der Tribologie, speziell hinsichtlich der Reibung, und somit ihre Begründung als Ingenieurwissenschaft wurde in den