

Rene Kallmeyer

**Abschätzung der Wärmeströme bei der
Reibung von metallischen Werkstoffen auf
Eis**

Diplomarbeit

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Impressum:

Copyright © 2007 GRIN Verlag
ISBN: 9783638838993

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/79512>

Rene Kallmeyer

Abschätzung der Wärmeströme bei der Reibung von metallischen Werkstoffen auf Eis

GRIN - Your knowledge has value

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite www.grin.com ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

Besuchen Sie uns im Internet:

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

http://www.twitter.com/grin_com

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Werkstofftechnik

Diplomarbeit

zum Thema

**Abschätzung der Wärmeströme bei der Reibung
von metallischen Werkstoffen auf Eis**

eingereicht von

Kallmeyer, René

Ilmenau, Juni 2007

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde während meines 11. Semesters am Fachgebiet Metallische Werkstoffe und Verbundwerkstoffe an der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Kern danke ich für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Frank Albracht, Herrn Dr.-Ing. Volker Winkler und Frau Dipl.-Ing. (FH) Susen Reichel für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, ihre ständige Diskussionsbereitschaft und die freundliche Unterstützung bei der Bearbeitung des Themas.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebietes möchte ich mich für die freundliche Aufnahme bedanken. Dank auch an den Meister der mechanischen Werkstatt Herrn Frank Oßmann.

Weiterhin möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Marc Schalles bedanken für seine Hilfestellung im FEM-Bereich.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Christine und Karl-Heinz, meiner Schwester Anja sowie meiner Freundin Gesine, die mich während dieser Arbeit immer unterstützten und motivierten.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| VERZEICHNIS VON ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN..... | VI |
| 0 EINLEITUNG | 1 |
| 1 GRUNDLAGEN | 2 |
| 1.1 STRUKTURMECHANISCHE UND THERMODYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN VON EIS .. | 2 |
| 1.1.1 PHYSIK VON EIS..... | 2 |
| 1.1.2 SCHMELZEN VON EIS | 6 |
| 1.1.2.1 DRUCKSCHMELZEN | 7 |
| 1.1.2.2 GRENZFLÄCHENSCHMELZEN | 8 |
| 1.1.2.3 OBERFLÄCHENSCHMELZEN | 9 |
| 1.1.2.4 REIBSCHMELZEN..... | 10 |
| 1.1.2.5 QUASI FLÜSSIGER FILM | 11 |
| 1.2 TRIBOLOGISCHE SYSTEME MIT EIS | 12 |
| 1.2.1 TRIBOLOGIE ALLGEMEIN..... | 12 |
| 1.2.1.1 REIBUNG | 13 |
| 1.2.1.2 VERSCHLEIß..... | 15 |
| 1.2.1.3 SCHMIERUNG..... | 15 |
| 1.2.2 REIBUNG AUF EIS..... | 16 |
| 1.3 WÄRMEÜBERTRAGUNG UND TEMPERATURMESSUNG | 18 |
| 1.3.1 WÄRMEAUSBREITUNG | 18 |
| 1.3.1.1 WÄRMELEITUNG..... | 19 |
| 1.3.1.2 WÄRMEKONVEKTION..... | 20 |
| 1.3.1.3 WÄRMESTRAHLUNG | 21 |
| 1.3.1.4 WÄRMEÜBERTRAGUNG IM REIBSPALT | 21 |
| 1.3.2 TEMPERATURMESSUNG | 25 |
| 1.3.2.1 THERMOELEMENT..... | 25 |
| 1.3.2.2 WIDERSTANDSTHERMOMETER | 26 |
| 1.3.2.3 INFRAROTSSENSOREN..... | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2 | UNTERSUCHUNGEN ZUR REIBUNG AUF EIS | 29 |
| 2.1 | TRIBOMETER UND MESSSYSTEM..... | 29 |
| 2.2 | HERSTELLUNG UND PRÄPARATION DES EISES..... | 31 |
| 2.3 | AUSWAHL UND MODIFIZIERUNG DES PROBEKÖRPERS | 33 |
| 2.4 | VERSUCHSPLAN | 34 |
| 2.4.1 | BEMERKUNGEN ZUR REIBUNGSZAHL | 36 |
| 2.4.2 | BEMERKUNGEN ZUR TEMPERATURMESSUNG | 37 |
| 3 | ERGEBNISSE UND DISKUSSION | 40 |
| 3.1 | REIBUNGSZAHL IN ABHÄNGIGKEIT DER NORMALKRAFT, GLEITGESCHWINDIGKEIT UND EISTEMPERATUR | 40 |
| 3.1.1 | ALLGEMEINES REIBUNGSVERHALTEN | 40 |
| 3.1.2 | BELASTUNGS- ODER GLEITGESCHWINDIGKEITSABHÄNGIGE REIBUNGSZAHL | 41 |
| 3.1.3 | REPRODUZIERBARKEIT DER ERGEBNISSE | 44 |
| 3.1.4 | ABHÄNGIGKEIT DER REIBUNGSZAHL VON DER EISTEMPERATUR..... | 45 |
| 3.1.5 | REIBUNGSZAHL IN DEN KRITISCHEN BEREICHEN..... | 47 |
| 3.2 | TEMPERATURMESSUNG IM REIBSPALT | 49 |
| 3.2.1 | GESCHWINDIGKEITSABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR..... | 49 |
| 3.2.2 | BELASTUNGSABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR | 51 |
| 3.2.3 | TEMPERATURVERHALTEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN EISTEMPERATUREN..... | 53 |
| 3.2.4 | TEMPERATURVERHALTEN UND REIBUNGSZAHL..... | 57 |
| 3.2.5 | STATISCHE TEMPERATURMESSUNG..... | 58 |
| 3.3 | FAZIT DER UNTERSUCHUNGEN ZUR REIBUNG AUF EIS | 60 |
| 4 | MODELLBILDUNG MITTELS FEM | 64 |
| 4.1 | GRUNDLAGEN | 64 |
| 4.2 | THEORETISCHES FEM-MODELL | 65 |
| 4.3 | AUFBAU DES FEM-MODELLS | 67 |
| 4.4 | ERGEBNISSE DER SIMULATION | 69 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 71 |
| 6 | LITERATURVERZEICHNIS | 74 |
| 7 | INTERNETVERZEICHNIS..... | 80 |
| 8 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | 81 |
| 9 | TABELLENVERZEICHNIS | 83 |
| 10 | ANHANG | 84 |

Verzeichnis von Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

| | |
|-------|-----------------------------|
| gradT | Temperaturgradient |
| PMMA | Polymethylmethacrylat |
| TCC | Thermal Contact Conductance |

Formelzeichen

| | | |
|-----------------|---|--|
| I ... XII | chronologische Laufnummer des Eises | |
| I_c | Eis mit hexagonaler Kristallstruktur | |
| I_h | Eis mit kubischer Kristallstruktur | |
| A | Fläche | [m ²] [mm ²] |
| A_i | Fläche des Strahlers | [m ²] |
| A_K | Kontaktfläche | [mm ²] |
| $a(0)$ | Konstante = 0,84 | [nm] |
| c | spezifische Wärmekapazität | [J/kg · K] |
| E | Elastizitätsmodul | [N/m ²] [N/mm ²] |
| E_{AB} | Thermospannung | [mV] |
| e_x, e_y, e_z | Elementkoordinatensystem | |
| F_{ij} | Formfaktor zwischen Strahler- und Empfängerfläche | |
| F_N | Normalkraft | [N] |
| F_R | Reibungskraft | [N] |
| f | Reibungszahl | |
| G | Schermodul | [N/m ²] |
| H | Enthalpie | [J] |
| h | Schmelzwärme | [kJ/kg] |
| h_c | thermische Kontaktleitfähigkeit | [W/m ² · K] |
| k | Materialfaktor | |
| L | Dicke des quasi flüssigen Filmes | [nm] [Å] |
| l_d | Wachstumsamplitude | [Å] |

| | | |
|--------------|---|------------------------|
| P | Reibleistung | [W] |
| P_M | Reibleistungsanteil durch Materialveränderung | [W] |
| P_Q | Reibleistungsanteil durch Wärme | [W] |
| P_V | Reibleistungsanteil durch Materialverlust | [W] |
| p | Druck | [bar] |
| \dot{Q} | Wärmestrom | [W] |
| \dot{Q}_K | Wärmestrom durch Wärmekonvektion | [W] |
| \dot{Q}_L | Wärmestrom durch Wärmeleitung | [W] |
| \dot{Q}_S | Wärmestrom durch Wärmestrahlung | [W] |
| R_a | Mittenrauwert | [μm] |
| T | Temperatur | [K] [°C] |
| T_0 | Starttemperatur | [K] [°C] |
| T_A | Starttemperatur | [K] [°C] |
| T_F | Fluidtemperatur | [K] [°C] |
| T_i | Temperatur des Strahlers | [K] |
| T_j | Temperatur des Empfängers | [K] |
| T_m | Schmelztemperatur | [K] [°C] |
| T_{qll} | Temperatur des quasi flüssigen Filmes | [K] [°C] |
| T_{ref} | Referenztemperatur | [K] [°C] |
| T_S | Temperatur an der Messstelle | [K] [°C] |
| T_U | Endtemperatur | [K] [°C] |
| T_W | Wandtemperatur | [K] [°C] |
| ΔT | Temperaturdifferenz | [K] |
| t | Zeit | [s] |
| v_G | Gleitgeschwindigkeit | [m/s] |
| v_S | Vorschubgeschwindigkeit | [mm/s] |
| x, y, z | kartesische Koordinate | |
| α | Wärmeausdehnungskoeffizient | [1/K] |
| α_K | konvektiver Wärmeübergangskoeffizient | [W/m ² · K] |
| ϵ_i | Emissionsgrad der Strahlerfläche | |
| κ | Kompressionsmodul | [N/m ²] |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | [W/m · K] |