

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



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 INFRAROTSENSOREN	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 Kontaktkonduktivität	[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]

v	Querkontraktionszahl	
ρ	Dichte	[kg/m ³] [g/cm ³]
ρ_{qll}	Dichte des quasi flüssigen Filmes	[kg/m ³] [g/cm ³]
ρ_{W}	Dichte von Wasser	[kg/m ³] [g/cm ³]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$	[W/m ² · K ⁴]

0 Einleitung

Am Institut für Werkstofftechnik der Technischen Universität Ilmenau werden derzeit Untersuchungen zur Optimierung der Reibung von Werkstoffen gegen Eis durchgeführt. Als Optimierung wird hierbei die Verringerung der Reibung betrachtet, welche vor allem für Schneidwerkzeuge in der Lebensmittelindustrie, Eisbrecher oder Kufen für Wintersportgeräte von großer Bedeutung ist. Eine Optimierung im Sinne der Erhöhung der Reibung, zum Beispiel für Winterreifen wird hier nicht betrachtet.

Zu diesem Zweck wurde in Zusammenarbeit mit der Firma TETRA ein Tieftemperatur-Tribometer nach dem Stift-Scheibe-Prinzip gebaut. Die wesentlichen Merkmale sind der Durchmesser der feststehenden Eisscheibe von 1,2 m und das rotierende Messsystem, welches sowohl Messungen auf einer Kreisbahn als auch auf einer Spiralbahn ermöglicht. Mit dem Tieftemperatur-Tribometer können materialabhängige und materialunabhängige Einflussfaktoren auf das tribologische Verhalten verschiedener Werkstoffe auf Eis untersucht werden.

In dieser Diplomarbeit stehen die Abhängigkeiten der Reibungszahl von äußeren Einflussgrößen, wie Normalkraft, Eistemperatur und Gleitgeschwindigkeit im Vordergrund. Dabei sollen erstmals umfangreiche Messungen auf einer Spiralbahn und damit Bewegung auf einer unbenutzten Eisoberfläche weitere Einblicke in den Reibungsvorgang geben. Während des Reibungsprozess entsteht infolge des Schmelzens von Eis ein Wasserfilm an den Kontaktstellen zwischen Probe und Eis, welcher zu einem Schmierfilm führt der die Reibungszahl verändert. Da die Dicke des Wasserfilms noch nicht direkt gemessen werden kann, wurde ein Temperatur-Messsystem eingebaut. Damit sollen Abschätzungen der Wärmeströme in dem tribologischen System Probe / Eis möglich sein.

Des Weiteren soll begonnen, werden ein geeignetes FEM-Modell aufzubauen und mit den Experimenten zu vergleichen. Vordergründig geht es dabei um die Simulation der realen thermodynamischen Verhältnisse.

1 Grundlagen

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Grundlagen sollen einen Einblick in den Stand der Wissenschaft der einzelnen Themen geben. Um die Eistribologie zu verstehen, sind zu Beginn die Eigenschaften des Eises zu betrachten. Das betrifft zum einen die mechanischen Eigenschaften als auch das Schmelzen von Eis und das Phänomen eines Wasserfilmes zwischen Probe und Eis. Zum Verständnis des Reibungsvorganges sollen die Abschnitte zur Tribologie und Reibung auf Eis beitragen. Da in dieser Diplomarbeit die Wärmeströme mit zu betrachten sind, werden in den letzten Abschnitten die Möglichkeit der Wärmeübertragung und die Messung der entstehenden Wärmeströme beschrieben.

1.1 Strukturmechanische und thermodynamische Eigenschaften von Eis

Das mechanische Verhalten von Eis ist sehr komplex, da es von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig ist. Deshalb ist es wichtig, die Faktoren, die Größe ihres Einflusses und den Bereich ihrer Wirkung genau zu kennen. Weiterhin ist es für die Reibung auf Eis relevant wann und wodurch es zur Bildung eines Wasserfilmes kommt. Nur durch Kenntnis dieser Fakten ist es möglich, den Reibungsprozess auf Eis zu verstehen.

1.1.1 Physik von Eis

Eis ist einer der drei Aggregatzustände von Wasser und ein kristalliner Festkörper. Im Eis sind jedem Sauerstoffatom zwei Wasserstoffatome zugeordnet. Beim Wechsel des Aggregatzustandes von flüssig zu fest entsteht im Eis eine hohe Fernordnung durch Ausbildung eines Kristallgitters. Der kristalline Zustand gilt als thermodynamisch stabiler Zustand, bei dem sich die Anordnungen dreidimensional periodisch wiederholen.

Natürliches Eis kristallisiert in einem hexagonalen Kristallsystem, das bedeutet, es sind sechs Wasserstoffatome jeweils über Wasserstoffbrücken zu einem Ring verbunden. Dabei ist jedes Atom wiederum Teil von zwei benachbarten Ringen. Die hexagonale