

Zur Tribologie von strukturierten Skibelägen auf Eis und Schnee

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. (FH) Roman Böttcher

Tag der mündlichen Prüfung: 29.07.2015

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Scherge

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Heilmaier

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	XV
Abkürzungen	XV
Lateinische Formelzeichen	XV
Griechische Formelzeichen	XVIII
1 Einleitung und Motivation der Arbeit	1
2 Grundlagen	3
2.1 Wasser	3
2.2 Eis	3
2.2.1 Entstehung und Kristallform	3
2.2.2 Quasi-flüssige Schicht	6
2.2.3 Härte	7
2.3 Schnee	10
2.4 Skibelag	13
2.5 Wachs	15
2.6 Tribologie auf Eis und Schnee	15
2.6.1 Einführung	15
2.6.2 Wasserfilm beim Skifahren	16
2.6.3 Reibungsbereiche	17
2.6.4 Umgebungstemperatur	18
2.6.5 Gleittemperatur	22
2.6.6 Geschwindigkeit	23
2.6.7 Normalkraft	25
2.6.8 Pressung	27
2.6.9 Kontaktfläche	28
2.6.10 Kapillarkraft und Hydrophobie	31
2.7 Reibungsmodelle	34
2.7.1 Reibungsmodell von BOWDEN und TABOR	34
2.7.2 Übersicht relevanter Arbeiten der Eis- und Schneetribologie	35
2.7.3 MAKKONEN-TIKANMÄKI-Modell der Eisreibung	38
3 Herstellung und Charakterisierung von Belagsproben	45
3.1 Herstellung einer Belagsprobe	45
3.2 Charakterisierung des Belagmaterials	46
3.2.1 Präparation und Durchführung der Messung	46
3.2.2 Ergebnisse	46
3.3 Herstellung von Prägungen	49
3.4 Herstellung von Schlifren	49

3.5	Herstellung ultrahydrophober Oberflächen	50
3.6	Charakterisierung der Oberflächentopographie	51
3.6.1	Konfokalmikroskopie	51
3.6.2	Ergebnisse der Topographiemessungen	53
3.7	Kontaktwinkelmessungen der Belagsproben	59
3.7.1	Durchführung der Messung	59
3.7.2	Ergebnisse der Messungen	59
3.8	Zusammenfassung	61
4	Reibungsmessungen auf Eis und Schnee	63
4.1	Messmittel und Präparation	63
4.1.1	Lineartribometer	63
4.1.2	Radialtribometer	69
4.2	Charakterisierung der Eisoberfläche	73
4.2.1	Röntgendiffraktometrie	73
4.2.2	Ergebnisse der diffraktometrischen Charakterisierung	76
4.3	Ergebnisse der Reibungsmessungen	77
4.3.1	Lineartribometer	77
4.3.2	Radialtribometer	83
4.4	Zusammenfassung	88
5	Modellierung und Diskussion des tribologischen Systems	91
5.1	Anwendung von Reibungsmodellen im Bereich der Eistribologie	91
5.2	M-T-Modell der Trockenreibung im PE-Eissystem	92
5.3	M-T-Modell im Temperaturbereich nahe der Schmelztemperatur im PE-Eissystem	94
5.4	Berechnung realer Kontaktflächen	99
5.4.1	Kontaktmodell nach HERTZ	99
5.4.2	Berechnung realer Kontaktflächen	100
5.4.3	Zusammenfassung	108
5.5	Einfluss der Kontaktfläche auf den Reibungsvorgang	109
5.5.1	Reibung in Abhängigkeit der Art des strukturierten Interfaces	109
5.5.2	Einfluss der mikroskopischen Kontaktfläche auf den Reibungsvorgang . .	114
5.6	Einflussgrößen auf das tribologische System	129
5.6.1	Einfluss der Temperatur	129
5.6.2	Einfluss der Normalkraft	132
5.6.3	Einfluss der Geschwindigkeit	134
5.6.4	Einfluss der Hydrophobie	136
5.7	Zusammenfassung	138
5.8	Optimierungsmöglichkeiten für den Skitechniker	139
5.8.1	Temperatur des Skibelags	139
5.8.2	Wärmeleitfähigkeit des Skibelags	140
5.8.3	Härte des Skibelags	141
5.8.4	Struktur des Skibelags	142
5.8.5	Zusammenfassung	143
6	Fazit und Ausblick	145

Literaturverzeichnis	147
Abbildungsverzeichnis	155
Tabellenverzeichnis	159
A Anhang	161
A.1 Dimensionsanalyse des M-T-Modells	161
A.2 Wiederholungsmessung Prägung	163
Publikationen	165
Lebenslauf	167