

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Johannes Gütlinger

**Kraftübertragung
und Fahrbahnverschleiß
durch Spikereifen**



Scientific
Publishing

Johannes Gütlinger

**Kraftübertragung
und Fahrbahnverschleiß
durch Spikereifen**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 34**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den eigenständigen Lehrstühlen für Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen

von
Johannes Gültlinger

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2015

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0358-3

DOI: 10.5445/KSP/1000046299

Vorwort des Herausgebers

Die Fahrzeugtechnik ist gegenwärtig großen Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und -betrieb benötigter Rohstoffe, globaler Wettbewerb und das rapide Wachstum großer Städte erfordern neue Mobilitätslösungen, die vielfach eine Neudefinition des Fahrzeugs erforderlich machen. Die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsreduktion, erhöhter Fahr- und Arbeitssicherheit, Benutzerfreundlichkeit und angemessenen Kosten finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe für Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugsystemtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Der vorliegende Band behandelt die Wechselwirkung zwischen Spikereifen und Fahrbahn. Spikereifen werden in Gegenden mit langanhaltenden winterlichen Straßenzuständen eingesetzt, etwa in Skandinavien, Österreich oder der Schweiz. Sie liefern insbesondere auf vereister Fahrbahn eine erhöhte Kraftübertragung, schädigen jedoch bei direktem Kontakt der Spikes mit der Fahrbahnoberfläche den Straßenbelag. Sowohl für die Kraftübertragung als auch die Schädigung gab es bislang nur wenig differenzierte Kenntnisse über Wirkmechanismen und Einflussgrößen. Auch fehlte ein gut reproduzierbares experimentelles Untersuchungsverfahren. Herr Gültlinger erarbeitet eine Labormessmethode, wendet sie in umfangreichen Untersuchungen an und leitet aus den Ergebnissen physikalische Modellvorstellungen für Kraftübertragung und Fahrbahnschädigung ab.

Kraftübertragung und Fahrbahn- verschleiß durch Spikereifen

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

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Johannes Gültlinger

Tag der mündlichen Prüfung:	6. Februar 2015
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann

Kurzfassung

Spikereifen spielen eine wichtige Rolle für die Sicherheit im winterlichen Straßenverkehr, insbesondere in Nordeuropa. Die Spikes können sich auf vereisten Fahrbahnen mit dem Untergrund verzahnen und ermöglichen so eine verbesserte Kraftübertragung und ein stabileres Fahrzeugverhalten. Auf unbedeckten Fahrbahnen verursachen sie jedoch einen Verschleiß der Fahrbahndeckschicht. Dieser Zielkonflikt zwischen guter Kraftübertragung auf Eis einerseits und geringem Fahrbahnverschleiß andererseits stellt eine große Herausforderung in der Spikereifenentwicklung dar.

Vor diesem Hintergrund verfolgt diese Arbeit das Ziel, Verständnis über die Wirkmechanismen für die Kraftübertragung und den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen zu entwickeln und den Einfluss verschiedener Konstruktions- und Betriebsparameter zu identifizieren. Zu diesem Zweck wird ein grundlegendes physikalisches Modell der Interaktion zwischen Spikereifen und Fahrbahn entwickelt, von dem ausgehend Mechanismen abgeleitet werden, die für die Kraftübertragung auf Eis bzw. für den Verschleiß der Fahrbahn maßgeblich sind. Der Einfluss verschiedener Parameter kann anhand dieser Mechanismen abgeschätzt werden. In einem zweiten Teil werden Labormessverfahren vorgestellt, die im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelt wurden und mit denen sich die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eisfahrbahnen und der durch Spikereifen hervorgerufene Fahrbahnverschleiß experimentell bewerten lassen. Anhand umfangreicher Parameterstudien werden schließlich die aus der theoretischen Betrachtung abgeleiteten Einflüsse experimentell überprüft und die Modellvorstellungen auf diese Weise plausibilisiert.

Abstract

Studded tires are an important factor in winter traffic safety, especially in Northern Europe. The studs can intrude into icy road surfaces, thus improving force transmission and providing a more stable vehicle behavior. However, when running on bare roads they cause wear of the road surface. This target conflict between improved ice grip on the one hand and low road wear on the other hand is one of the main challenges in studded tire development.

Against this background the present thesis has the goal to develop understanding about the mechanisms involved in force transmission and road wear by studded tires and about the influence of different parameters in studded tire design and operation. Therefore, a basic physical model is developed. Based on this model, mechanisms decisive for ice grip and wear of the road surface are derived. These mechanisms allow an estimation of the influence of different parameters. The second part of the thesis presents test methods that were developed during the research project. They are used to experimentally investigate the force transmission of studded tires on ice tracks and the road wear caused by studded tires. Finally, the expected parameter influences from the theoretical approach are verified by extensive parameter studies.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin danke ich für ein interessantes Forschungsthema und für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Er initiierte das Forschungsprojekt, aus dem diese Arbeit entstanden ist, und gewährte mir großen Freiraum in der Bearbeitung des Themas. Für unsere vielen konstruktiven Gespräche, seine inhaltlichen Anregungen und seine Unterstützung meiner Ideen bin ich sehr dankbar.

Ebenso gilt mein Dank meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die freundliche Übernahme des Korreferats und seine Anmerkungen zu meiner Arbeit. Herrn Professor Dr. rer. nat. Michael J. Hoffmann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und für das Interesse an meiner Arbeit.

Den Rahmen für diese Arbeit bildete eine Forschungskooperation mit der Continental Reifen Deutschland GmbH. Herrn Prof. Dr.-Ing. Burkhard Wies danke ich dafür, dass er dieses Projekt ermöglichte und es stets mit großem Interesse und Freude an der wissenschaftlichen Arbeitsweise unterstützte. Mein besonderer Dank gilt Herrn Christian Brandau, der durch sein Engagement als Projektleiter und seinen fachlichen Input entscheidend zum Erfolg des Projekts beigetragen hat. Herrn Jan Schlittenhard und Herrn Klaus Wiese danke ich für die fachliche Unterstützung und viele hilfreiche Anregungen.

Dem Laborleiter des Instituts Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Unrau danke ich für sein unglaubliches Engagement, viele interessante und lehrreiche Diskussionen, seine geduldige Unterstützung wenn es Herausforderungen am Prüfstand zu meistern gab und seine wertvollen Anmerkungen zu meiner Arbeit.

Den Kollegen im Labor, Kerstin Dietrich und Markus Diehm, gilt mein Dank für die Unterstützung bei den Versuchen am Prüfstand und für Ihre Geduld beim Ausprobieren neuer Ideen und dem Ausmerzen von Kinderkrankheiten.

Herrn Dr.-Ing. Martin Gießler danke ich für die fachliche Unterstützung bei der Einarbeitung sowie für die Grundlagen, die er mit seiner Forschungsarbeit gelegt hat und auf die ich aufbauen konnte.

Außerdem gilt mein Dank den Studenten, deren Abschlussarbeiten ich betreuen durfte und die auf diesem Wege wichtige Erkenntnisse zu meiner Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin danke ich ganz herzlich meinen Doktoranden- und Institutskollegen für das großartige, immer wieder motivierende Arbeitsklima am Institut. Sie haben einen großen Anteil daran, dass ich die Jahre am Institut als etwas Außergewöhnliches in Erinnerung behalten werde. Ein besonderes Dankeschön gilt meinen drei Zimmerkollegen René Armbruster, Matthias Bürckert und Matthias Greiner für die vielen konstruktiven und zerstreuenden Diskussionen. Zudem ein dickes Dankeschön an Petra und Alois, die durch ihren unermüdlichen Einsatz ihren Anteil dazu beigetragen haben, die Moral am Institut hoch zu halten.

Meinen Freunden Mark und Richard gebührt mein herzlichster Dank für allzeit offene Ohren, viele interessante und motivierende Gespräche, ihre Hilfe bei der Korrektur der Arbeit und so manche wichtige Unterstützung auf dem Weg dahin.

Abschließend danke ich ganz besonders meiner Familie für die stete Unterstützung durch Studium und Promotion. Nur dadurch war all dies überhaupt möglich!

Karlsruhe, im Februar 2015

Johannes Gültlinger

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Verwendung von Spikereifen	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	10
1.4 Gliederung der Arbeit	12
2 Grundlagen	15
2.1 Spikereifen	15
2.1.1 Aufbau	15
2.1.2 Regulatorische Aspekte	17
2.2 Grundlagen der Reifenkraftübertragung	19
2.2.1 Kinematik des rollenden Reifens	19
2.2.2 Mechanismen der Reifenkraftübertragung	20
2.2.3 Umfangskraftcharakteristik von Reifen	22
2.3 Materialverhalten von Eis	25
2.3.1 Mechanische Eigenschaften	25
2.3.2 Aufschmelzen und Tribologie	26
2.4 Messverfahren für die Kraftübertragung von Spikereifen	27
2.4.1 Reifenuntersuchung bei winterlichen Fahrbahnbedingungen	28
2.4.2 Fahrzeugversuch	28
2.4.3 Sonstige Verfahren im Außenversuch	30
2.4.4 Laborversuch	30
2.5 Untersuchung des Fahrbahnverschleißes durch Spikereifen	33
2.5.1 Straßen- und Verkehrsbeobachtung	33
2.5.2 Experimentelle Untersuchung im Fahrzeug- und Laborversuch	34
2.6 Vergleich von Fahrzeug- und Laborversuch zur Reifenuntersuchung ..	35

3	Mechanismen der Kraftübertragung und des Fahrbahnverschleißes.	39
3.1	Interaktion zwischen Spikereifen und Fahrbahn	39
3.1.1	<i>Phasen der Interaktion</i>	40
3.1.2	<i>Aufschlagen</i>	42
3.1.3	<i>Vertikalkontakt</i>	46
3.1.4	<i>Horizontalkontakt und Schlupfzustände</i>	49
3.2	Mechanismen der Kraftübertragung auf Eis.....	53
3.2.1	<i>Komponenten der Kraftübertragung am Spikereifen</i>	53
3.2.2	<i>Eindringen der Spikes ins Eis</i>	55
3.2.3	<i>Horizontale Kraftübertragung am Spike</i>	61
3.2.4	<i>Einfluss der Mechanismen auf die Spikereifencharakteristik</i>	65
3.3	Mechanismen des Fahrbahnverschleißes.....	67
3.3.1	<i>Aufschlagsschädigung</i>	68
3.3.2	<i>Reibarbeit am kratzenden Spike</i>	70
3.3.3	<i>Druckversagen des Fahrbahnmaterials</i>	71
4	Entwicklung der Messverfahren	73
4.1	Messumgebung.....	73
4.1.1	<i>Der KIT-Innentrommelprüfstand</i>	74
4.1.2	<i>Datenerfassung</i>	76
4.2	Vorüberlegungen zur Untersuchung von Spikereifen auf Eis	77
4.2.1	<i>Bestehende Messverfahren</i>	77
4.2.2	<i>Besondere Herausforderungen</i>	79
4.2.3	<i>Möglichkeiten zur Reibwertcharakterisierung der Eisfahrbahn</i>	83
4.3	Messverfahren für die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis	90
4.3.1	<i>Messaufbau</i>	91
4.3.2	<i>Messprozedur</i>	93
4.3.3	<i>Auswertung</i>	94
4.3.4	<i>Reproduzierbarkeit des Verfahrens</i>	101
4.3.5	<i>Validierung</i>	103

4.3.6	<i>Erwartete Genauigkeit und Geltungsbereich</i>	<i>105</i>
4.3.7	<i>Bewertung und Abgrenzung zu bestehenden Verfahren.....</i>	<i>106</i>
4.4	Messverfahren für den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen.....	107
4.4.1	<i>Messaufbau.....</i>	<i>108</i>
4.4.2	<i>Messprozedur.....</i>	<i>110</i>
4.4.3	<i>Auswertung.....</i>	<i>111</i>
4.4.4	<i>Reproduzierbarkeit des Verfahrens.....</i>	<i>116</i>
4.4.5	<i>Validierung</i>	<i>118</i>
4.4.6	<i>Erwartete Genauigkeit und Geltungsbereich</i>	<i>120</i>
4.4.7	<i>Bewertung und Abgrenzung zu bestehenden Verfahren.....</i>	<i>121</i>
5	Versuch und Erläuterung der Ergebnisse	123
5.1	Kraftübertragung auf Eis.....	123
5.1.1	<i>Spikeüberstand</i>	<i>124</i>
5.1.2	<i>Spikemasse.....</i>	<i>126</i>
5.1.3	<i>Positivprofilanteil</i>	<i>128</i>
5.1.4	<i>Radlast und Reifenfülldruck.....</i>	<i>131</i>
5.1.5	<i>Temperatur.....</i>	<i>133</i>
5.2	Fahrbahnverschleiß	135
5.2.1	<i>Spikeüberstand</i>	<i>136</i>
5.2.2	<i>Spikemasse.....</i>	<i>137</i>
5.2.3	<i>Spikeanzahl</i>	<i>140</i>
5.2.4	<i>Umfangskraft.....</i>	<i>142</i>
5.2.5	<i>Fahrgeschwindigkeit.....</i>	<i>143</i>
5.2.6	<i>Radlast und Reifenfülldruck.....</i>	<i>145</i>
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
6.1	Zusammenfassung	147
6.2	Ausblick	150
A	Formelzeichen	153
B	Literaturverzeichnis.....	159

1 Einleitung

1.1 Verwendung von Spikereifen

Der Reifen stellt eine entscheidende Komponente für die Fahrsicherheit eines Kraftfahrzeugs dar. Er alleine überträgt Kräfte zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, die nötig sind, um das Fahrzeug zu beschleunigen, abzubremsen und in der Spur zu halten. Insbesondere auf winterlichen Fahrbahnen werden die Grenzen der Kraftübertragung oftmals erreicht und es wird deutlich, welche Folgen es nach sich zieht, wenn der Reifen diese Funktion nicht mehr erfüllen kann.

So geht eine der größten Gefahren im winterlichen Straßenverkehr von der verschlechterten Kraftübertragung auf schneebedeckten und vereisten Fahrbahnen aus. Gemäß einer Studie, die von HJORT ET AL. im Auftrag des schwedischen Straßen- und Verkehrsforschungsinstituts (VTI) durchgeführt wurde, stellt dabei instabiles Fahrverhalten und insbesondere das Übersteuern der Fahrzeuge die Hauptunfallursache dar [32].

Um dieser Gefahr entgegenzuwirken, kommen vor allem in den nordeuropäischen Ländern, wo während der Wintermonate sehr häufig schneebedeckte und vereiste Fahrbahnen anzutreffen sind, Spikereifen zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Reifen, in deren Lauffläche kleine Metallstifte eingebracht sind. Diese ermöglichen eine Verzahnung mit der vereisten Fahrbahn und sorgen so für eine verbesserte Kraftübertragung. Spikereifen bieten auf eisigen Fahrbahnen ein stabileres Verhalten als reguläre Winterreifen und leisten so einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von Unfällen [32].

Während der Nutzen von Spikereifen auf vereisten Fahrbahnen unbestritten ist, ergeben sich Probleme für die Straßendecke, wenn ein mit Spikereifen ausgestattetes Fahrzeug auf einer nicht schnee- oder eisbedeckten Fahrbahn bewegt wird. Die Spikes, die sich sonst ins Eis eingraben und die Kraftübertragung verbessern, schlagen nun auf die Fahrbahndeck-

schicht und verschleifen diese in einem deutlich höheren Maße als reguläre Reifen. Um dem entgegenzuwirken, wurden in der Vergangenheit durch die Gesetzgebung verschiedene konstruktive Parameter der Spikereifen mit dem Ziel der Reduktion der Fahrbahnschädigung immer stärker eingeschränkt.

Seit Sommer 2013 ist in Finnland ein neues Gesetz wirksam, das weitere Beschränkungen in der Konstruktion der Spikereifen fordert, die auch eine Verschlechterung der Kraftübertragung auf Eis erwarten lassen. Im Gegensatz zur bisherigen Gesetzgebung finden diese Einschränkungen jedoch keine Anwendung, wenn nachgewiesen werden kann, dass der Spikereifen die Fahrbahn nicht übermäßig schädigt [95]. Dies bringt einerseits eine deutlich größere Freiheit in der Gestaltung von Spikereifen mit sich, andererseits wird die Schädigung der Fahrbahn nun zum Gegenstand der Spikereifenentwicklung: Während bisher nur gesetzliche Randbedingungen bezüglich der Konstruktion der Spikereifen einzuhalten waren, kann eine gezielt fahrbahnschonende Auslegung der Spikereifen nun entscheidende Vorteile bringen.

Wichtig für die Optimierung des Spikereifens im Konflikt aus den Forderungen nach guter Kraftübertragung auf Eis einerseits und geringem Fahrbahnverschleiß andererseits ist eine genaue Kenntnis über die Auswirkung verschiedener konstruktiver Parameter und über die Mechanismen hinter *Eisgriff*¹ und Fahrbahnverschleiß. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Untersuchung der Kraftübertragung und des Fahrbahnverschleißes durch Spikereifen, um Verständnis zu den zu Grunde liegenden Vorgängen aufzubauen.

1.2 Stand der Forschung

Seit um das Jahr 1959 die ersten Spikereifen auf den Markt kamen [54], werden deren Eigenschaften untersucht sowie die Vor- und Nachteile dieser Technologie diskutiert. Im Folgenden werden ausgewählte Studien

¹ Unter Eisgriff wird im Folgenden die Fähigkeit zur Kraftübertragung auf Eis bzw. vereisten Fahrbahnen verstanden

und deren für die vorliegende Arbeit relevanten Ergebnisse kurz vorgestellt.

Experimentelle Untersuchung der Kraftübertragung von Spikereifen

Die Untersuchung der Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis stellt seit deren erstem Erscheinen einen wichtigen Forschungsaspekt dar. Dabei steht insbesondere der Vergleich von Spikereifen zu (Winter-)Reifen konventioneller Bauart im Vordergrund. BURNETT vergleicht in [13] die Bremskraftübertragung an identischen Grundreifen mit und ohne Spikes. Dafür führte er Versuche mit blockiertem Rad an einem Messanhänger durch, als Bewertungsgröße dient ihm die erzielte Bremskraft. In der Auswertung zeigt er für vereiste Fahrbahnen deutliche Vorteile für den Spikereifen gegenüber dem unbespikten auf, für Messungen auf hochverdichtetem Schnee fällt der Vorteil für den Spikereifen geringer aus.

WHITEHURST stellt Vergleiche zwischen Spikereifen und unbespikten Reifen auf Glatteis („glare ice“) mit einem Messanhänger und einem entsprechend bereiften Fahrzeug an [105]. Er verwendet als Bewertungsgröße die ermittelten Reibwerte beim Bremsen. Für die Untersuchung mit dem Messanhänger zeigen sich deutliche Vorteile für den Spikereifen, bis hin zu einer Verdopplung der Reibwerte. Bei den Fahrzeugversuchen fallen die Vorteile geringer aus, was darauf zurückzuführen ist, dass das Versuchsfahrzeug nur an der Hinterachse mit den jeweils zu untersuchenden Reifen ausgestattet war. Allgemein wird eine Verringerung der Wirksamkeit der Spikereifen bei der Untersuchung von benutzten Reifen festgestellt.

WEBER führte Versuche mit verschiedentlich bewehrten Reifen auf Eis an einem Innentrommelprüfstand durch [103]. Er berichtet, dass die Schädigung der Eisfahrbahn einen starken Einfluss auf die erzielbaren Reibwerte hat. In den aufgezeichneten Charakteristiken stellt er kein ausgeprägtes Maximum der Kraftübertragung über dem Schlupf fest, weshalb er im weiteren Verlauf Blockierbremsmessungen zur Beschreibung der Umfangskraftübertragung verwendet. Die Temperatur wirkt sich in seinen Versuchen nicht merklich auf die Gleitreibbeiwerte zwischen Spikereifen

und Eis aus, während die Reibwerte für unbespikte Reifen mit tieferen Temperaturen bekanntermaßen deutlich zunehmen. Das führt dazu, dass für Temperaturen unterhalb von -10°C die unbespikten Reifen höhere Gleitreibwerte erreichen als der Spikereifen. Für WEBER widerspricht dies den Erfahrungen aus der Fahrpraxis. Er begründet dies durch die Versuchsbedingungen mit sehr ebenem und sauberem Eis, das in der Realität so nicht vorliegt und auch am Prüfstand nur für die unbespikten Reifen vorhanden ist. Bei Versuchen mit Spikereifen ergebe sich eine Verschmutzung der Fahrbahnoberfläche durch Eisgrieß. Für unterschiedliche Spikeüberstände beschreibt WEBER einen Anstieg des Gleitreibwerts mit zunehmendem Überstand. Bis zu einem Überstand von ca. 1mm ergibt sich jedoch keine Verbesserung gegenüber einem unbespikten Reifen.

NORDSTRÖM liefert in [64] eine Zusammenfassung von Versuchen, die am schwedischen Straßen- und Verkehrsforschungsinstitut (VTI) durchgeführt wurden. Als Datenbasis dienen Reibwertmessungen, die mit einem Mess-Lkw, einem entsprechend bereiften Fahrzeug und am Flachbettprüfstand des VTI (vgl. [58]) durchgeführt wurden. Untersuchungsziel war der Vergleich von Winterreifen, Sommerreifen und Spikereifen in verschiedenen Abnutzungszuständen auf glattem und durch Spikereifen aufgerautem Eis. Dabei wurden verschiedene Temperaturen und verschiedene Betriebsbedingungen der Reifen untersucht. Neben der Erhöhung der übertragbaren Kräfte, vor allem bei Fahrbahnzuständen, bei denen die Reibwerte der unbespikten Reifen gering sind, stellt dieser Autor ähnlich wie WEBER (s. oben) bei den Spikereifen einen geringeren Abfall der übertragbaren Kräfte bei hohem Schlupf bzw. Schräglaufwinkel fest. Das Aufrauen der Fahrbahn durch die Spikereifen führt vor allem für die Reifen ohne Spikes zu gesteigerten Reibwerten. Für die Kraftübertragung der Spikereifen, sowohl in neuem als auch in abgefahrenem Zustand, identifiziert NORDSTRÖM den Spikeüberstand als entscheidenden Faktor.

Der Vergleich zwischen Spikereifen und konventionellen Winterreifen ist auch Gegenstand der Arbeit von MÄKELÄ ET AL. [53]. Dazu werden Brems- und Beschleunigungsmessungen aus dem Fahrzeugversuch herangezogen. Die Autoren identifizieren auch hier den Spikeüberstand als entscheidenden Faktor für die übertragbaren Kräfte an einem Spikereifen.

Da sich der Spikeüberstand während der Versuche oft veränderte, wird dessen Einfluss über einen linearen Ansatz korrigiert. Der größte Vorteil für Spikereifen ergibt sich in den Untersuchungen auf Glatteis bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt, während auf Schnee und rauem Eis ein unbespikter Winterreifen das Niveau von Spikereifen erreichen kann. Weiterhin stellen die Autoren fest, dass der Verschleiß, der sich über die Laufzeit ergibt, sich bei Spikereifen deutlicher auf die übertragenen Kräfte auswirkt als bei unbespikten Reifen.

LU untersuchte in mehreren Versuchsreihen Spikereifen und Ganzjahresreifen sowie ein spezifisches Winterreifenmodell [49], [50] (zitiert in [78]). Dabei bewertet er die Bremskraftübertragung über den Bremsweg, die Antriebs- und Seitenkraftübertragung über die Zeit zum Erreichen einer vorgegebenen Geschwindigkeit bzw. die Kurvengrenzgeschwindigkeit. Die erzielten Ergebnisse sind von SCHEIBE in [78] zusammengefasst. Demnach ermöglicht der Spikereifen bei Bremsen und Antreiben auf Eis deutlich höhere übertragbare Kräfte, auf Schnee fällt der Vorteil geringer aus. In der Seitenführung hingegen verhält sich der Spikereifen durchweg etwas schlechter als der Winter- bzw. der Ganzjahresreifen. Eine Begründung für dieses Verhalten liefert SCHEIBE nicht.

NORDSTRÖM beschreibt in mehreren Veröffentlichungen Versuche, die am Flachbettprüfstand des VTI durchgeführt wurden. Dabei wurde ein großes Programm von Winterreifen, Spikereifen und Sommerreifen auf rauem Eis [59], Glatteis [60] und nassem Glatteis [61] untersucht. In [62] liefert NORDSTRÖM eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Er stellt fest, dass die Gruppe der Spikereifen den normalen Winterreifen allgemein überlegen ist, wobei die Unterschiede auf nassem Glatteis am höchsten, auf rauem Eis am geringsten ausfallen. Als wichtige Parameter für die Kraftübertragung eines Spikereifens identifiziert er den Spikeüberstand und, eng damit verbunden, die Spikekraft. Er postuliert eine untere Grenze für diese Parameter, unterhalb derer die Spikes nicht mehr für eine deutliche Reibwerterhöhung sorgen. Im Gegensatz zu konventionellen Winterreifen erkennt er bei Spikereifen kaum einen Einfluss der Gummimischung. Des Weiteren ergibt sich auch in dieser Untersuchung für die Spikereifen eine flachere Form der Charakteristik gegenüber konventionellen Winterrei-

fen, die bei einem bestimmten Schlupfwert ein sehr ausgeprägtes Maximum der übertragbaren Kräfte aufweisen.

Experimentelle Untersuchung der Fahrbahnschädigung durch Spikereifen

Mit zunehmender Verbreitung der Spikereifen rückten die Problemstellungen bezüglich der Fahrbahnschädigung ins Zentrum des Interesses. Sowohl von Seiten der Reifen- und Spikehersteller als auch von Seiten des Straßenbaus wurde der durch die Spikereifen verursachte Fahrbahnverschleiß gezielt untersucht.

SCHULZE bestimmt dazu in [84] den Verschleiß von in eine Fahrbahn eingelassenen Bohrkernen unter verschiedenen Beanspruchungen. Dazu führte er auf verschiedenen Bereichen der Fahrbahn unterschiedliche Fahrmanöver durch, um Bremsen, Antreiben, Kurvenfahrt und freies Rollen abzubilden. Als Maß für den Verschleiß dient die Höhenabnahme der Bohrkern. Die Verschleißwerte beim Bremsen und Beschleunigen liegen deutlich höher als bei der Kurvenfahrt, beim freien Rollen ist der Verschleiß nochmals geringer. Dementsprechend folgert SCHULZE, dass das Kratzen der Spikes für den Verschleiß entscheidender ist als die Schlag- bzw. Druckbeanspruchung der Fahrbahn.

SPRINGENSCHMID und SOMMER führten in den 70er Jahren Versuche zum Verschleiß von Betonfahrbahnen unter Beanspruchung durch Spikereifen durch. Zum Einsatz kam ein Verschleißprüfstand, wie in [91] beschrieben. Dabei handelt es sich um eine kleine Trommel, auf deren Innenseite zwei Reifen frei oder mit definiertem Schlupf rollen. Die Trommel ist mit Segmenten, bestehend aus den interessierenden Betonfahrbahnen, ausgekleidet. Als Maß für den Verschleiß dient der Gewichtsverlust der Betonplatten. Da keine axiale Verstellung der Reifen möglich ist, kommen spezielle Versuchsreifen zum Einsatz, bei denen die Spikes gleichmäßig über die Breite verteilt sind, um eine ebenso gleichmäßige Abnutzung der Fahrbahn zu gewährleisten. Erste Versuche an dem Prüfstand zeigen, dass sich der Verschleiß stark mit der Fahrgeschwindigkeit erhöht. Eine Verdoppelung der Fahrgeschwindigkeit resultiert im vierfachen Ver-

schleiß. Der Schlupf sorgt für eine von der Geschwindigkeit unabhängige Erhöhung des Verschleißes [91].

In einer folgenden Veröffentlichung beschreiben die Autoren weiterführende Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Reifenparameter, um Möglichkeiten zur Reduktion des Fahrbahnverschleißes zu identifizieren [92]. Dabei werden verschiedene Spikeabmessungen, -gewichte und -überstände untersucht. Es bestätigt sich der in [91] vermutete quadratische Einfluss der Fahrgeschwindigkeit. Weiterhin wird der Spikeüberstand als wichtiger Einflussparameter identifiziert. Der Einfluss der Spikemasse fällt geringer aus als von den Autoren erwartet, was sie zu der Folgerung bringt, dass nicht die gesamte Schädigung über die kinetische Energie der Spikes erklärt werden kann.

SCHEUBA identifiziert in [80] den Schlupf und damit die Fahrweise als entscheidenden Faktor für den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. In [81] stellt er die These auf, dass der Fahrbahnabrieb auf der Reibarbeit aus Kraftschluss und Relativbewegung beruht und belegt seine These mit den Ergebnissen von SPRINGENSCHMID und SOMMER [91], [92]. Die Spikemasse sieht er nicht als entscheidende Größe.

CANTZ führte Versuche zum Fahrbahnverschleiß mit einem Spikereifen auf einem Tellerprüfstand durch [14]. Er beschreibt einen eindeutigen linearen Einfluss der Spikeanzahl und des Spikeüberstands auf den Fahrbahnverschleiß. Weiterhin beobachtet er einen erhöhten Verschleiß an einem Spike mit scharfkantiger Geometrie zu Beginn des Versuchs, der mit Abnutzung der Kanten am Spike zurückging.

Ein Verfahren zur Ermittlung des Fahrbahnverschleißes durch handelsübliche Spikereifen beschreibt HORZ in [35]. Dabei rollt der Reifen auf einer Asphalt- oder Betonfahrbahn ab, die in einem Innentrommelprüfstand installiert ist. Die Quantifizierung des Verschleißes erfolgt über die Höhenabnahme der Fahrbahn. Dazu wird mit einem Tastmessgerät das Querprofil der Fahrbahn nach Überrollung mit dem jeweiligen Spikereifen vermessen. Obwohl sich die untersuchten Spikereifen teilweise stark im verursachten Fahrbahnverschleiß unterscheiden, geht HORZ allgemein von einem deutlichen Einfluss der Fahrgeschwindigkeit aus.

UNHOLA untersucht die Auswirkung verschiedener fahrzeugseitiger Einflussparameter auf den Fahrbahnverschleiß mit dem Ziel, die Entwicklung des Verschleißes unter zukünftigen Veränderungen im Spikereifeneinsatz vorherzusagen [96]. Dafür setzt er ein Prüfverfahren ein, bei dem Probenkörper aus Gestein, deren Oberfläche mit einer definierten Struktur versehen ist, von einem mit Spikereifen ausgestatteten Fahrzeug überrollt werden. Der Verschleiß wird über den Gewichts- bzw. den Volumenverlust der Probenkörper bestimmt. Als wichtige Einflussgrößen identifiziert er die Fahrgeschwindigkeit und die Radlast bzw. die Fahrzeugmasse sowie in späteren Untersuchungen die Spikemasse [97].

Neben der gezielten experimentellen Untersuchung werden im Zusammenhang mit dem Fahrbahnabrieb durch Spikereifen oft auch Verkehrs- und Straßenbeobachtungen beschrieben. ANGERINOS ET AL. liefern in [3] eine Übersicht verschiedener, hauptsächlich deskriptiver Studien, die sich mit der Beobachtung des Fahrbahnverschleißes von mit Spikereifen befahrenen Straßen beschäftigen.

Modellierung bzw. theoretische Beschreibung der Kraftübertragung und des Fahrbahnverschleißes von Spikereifen

Neben der experimentellen Untersuchung des Verhaltens von Spikereifen und des Einflusses verschiedener Parameter wurden auch Ansätze zur theoretischen Beschreibung der Kraftübertragung und des Fahrbahnverschleißes durch Spikereifen entwickelt.

SLIBAR und SPRINGER stellen grundlegende physikalische Modelle vor, um die Kraftübertragung und den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen zu beschreiben und entsprechende experimentelle Untersuchungen theoretisch zu untermauern [89]. Für die Kraftübertragung entwickeln sie ein Modell, das die Radlast auf Spikes und Gummi aufteilt und mit Hilfe verschiedener, je nach Kontaktbedingungen konstant definierter Reibwerte zwischen Spike bzw. Gummi und Fahrbahn eine Aussage über erzielbare Reifenkräfte auf verschiedenen Fahrbahnen zulässt. Zur Modellierung des Fahrbahnverschleißes identifizieren sie das Aufschlagen und das durch Schlupf und Reifenverformung bedingte Kratzen der Spikes über die

Fahrbahn als Wirkmechanismen. Die Modelle werden anhand von qualitativen Vergleichen mit experimentellen Untersuchungen validiert.

Die Kraftübertragung zwischen Gummi und Eis wurde bereits in vielen Arbeiten thematisiert. Im Bereich der Reifenkraftübertragung werden die Reibkräfte dabei üblicherweise über viskose Scherkräfte in einer flüssigen Grenzschicht zwischen Gummi und Eis beschrieben. OKSANEN und KEINONEN formulieren in [66] einen entsprechenden Ansatz zur Beschreibung des Reibwerts an einem Gummigleitkörper. Die Autoren gehen davon aus, dass die Reibwärme, die im Kontakt zwischen Gummi und Eis entsteht, zu einem Teil in die beiden Kontaktpartner abgeleitet wird, während der verbleibende Anteil zu einem Aufschmelzen des Eises und somit zu einer Zunahme der Wasserfilmdicke führt. Über einen thermodynamischen Ansatz werden in Abhängigkeit der anliegenden Reibkraft die Dicke des Wasserfilms im Gleichgewichtsfall und basierend darauf eine Gleichung für die realisierbaren Reibwerte zwischen Gummi und Eis hergeleitet.

WIESE ET AL. liefern in [106] einen Ansatz zur expliziten Bestimmung der Wasserfilmdicke im Kontakt. Dazu gehen sie davon aus, dass die Reibwärme im Kontakt einzig und alleine durch viskose Scherung verursacht wird. Darüber hinaus berücksichtigen die Autoren die Drainagewirkung („squeeze out“) an den Rauigkeiten der Gummioberfläche. Ausgehend davon liefern sie eine Vorgehensweise zur Berechnung der Reibwerte und überprüfen diese durch Versuche an einem Linearprüfstand.

Einen anderen Ansatz verfolgen GIEBLER ET AL. [26]. Sie postulieren eine thermische Kraftschlussgrenze für die Kraftübertragung eines Reifens auf Eis. Wiederum basierend auf einem thermodynamischen Ansatz wird der Reibwert bestimmt, für den während der Kontaktzeit eines Gummielements mit der Eisfahrbahn eine Temperatur von 0 °C erreicht wird. Der Reibwert, der gerade noch ohne Aufschmelzen im Kontakt übertragen werden kann, stellt für die Autoren den maximalen Reibwert durch Kraftschluss, d. h. die Kraftschlussgrenze, dar.

Zur Vorhersage des Verschleißes von Fahrbahnoberflächen durch Spikereifenverkehr beschreiben JACOBSON und WÄGGER ein mathematisches

Modell [36], [37]. Dieses stützt sich auf empirische Untersuchungen an Fahrbahnproben, die sowohl an einem Prüfstand als auch im Straßenverkehr durchgeführt wurden. Daraus wird eine statistische Beanspruchung der jeweiligen Fahrbahn bestimmt. Einige konstruktive Parameter an Spikereifen werden in Form von Korrekturfaktoren berücksichtigt, die wiederum auf empirischen Untersuchungen beruhen.

1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Wie eingangs dargestellt, ist zur Optimierung eines Spikereifens im Zielkonflikt aus geringem Fahrbahnverschleiß und gutem Eisgriff ein umfassendes Verständnis über die Einflüsse verschiedener Konstruktions- und Betriebsparameter erforderlich. Um dieses Verständnis aufzubauen, sind zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze denkbar: Zum einen können die Parametereinflüsse experimentell untersucht und basierend auf den Messergebnissen ein empirisches Modell erstellt werden, das die beobachteten Einflüsse beschreibt. Zum anderen besteht die Möglichkeit der physikalischen Modellbildung. Diese bietet die Grundlage, um die Vorgänge im Kontakt zu erklären, die zugrundeliegenden Mechanismen zu identifizieren und die Auswirkungen verschiedener Parametervariationen vorauszusagen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein kombinierter Ansatz verfolgt. Ziel ist der Aufbau eines grundlegenden physikalischen Modells der Interaktion zwischen Spikereifen und Fahrbahn. Basierend auf diesem Modell werden verschiedene Mechanismen abgeleitet, die für die Kraftübertragung auf Eis bzw. für den Verschleiß der Fahrbahn maßgeblich sind. Der Einfluss verschiedener Parameter kann anhand dieser Mechanismen abgeschätzt werden. Um die Modellvorstellungen zu validieren, soll der Einfluss verschiedener Parameter experimentell untersucht werden. Hierzu war, wie im Folgenden erläutert, die Entwicklung von Labormessverfahren erforderlich, mit denen umfangreiche Parameterstudien durchgeführt wurden.

Aus der Literaturrecherche wird deutlich, dass in der Vergangenheit bereits einige experimentelle Untersuchungen zur Kraftübertragung und zum Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen angestellt wurden. Insbeson-

dere die Untersuchungen aus den Anfängen der Spikereifengeschichte beziehen sich dabei allerdings auf Reifen- und Spikekonstruktionen, die sich stark von den heute üblichen unterscheiden. Aus diesem Grund lassen sich die Ergebnisse der damaligen Untersuchungen nicht ohne weitere Überprüfung auf heutige Spikereifen übertragen. Auch die Spannbreite der untersuchten Parametervariationen wurde oft anders gewählt, als es in der heutigen Zeit aufgrund geänderter technischer und gesetzlicher Randbedingungen sinnvoll erscheint. Deshalb wurden zur Beschreibung der aktuellen Spikereifentechnologie neue Parameterstudien basierend auf aktuellen Reifenmodellen durchgeführt.

Für die in der Vergangenheit getätigten Untersuchungen wurden hauptsächlich Fahrzeugversuche im Außenversuch durchgeführt. Diese bieten einerseits eine große Realitätsnähe, sind andererseits aber starken Einflüssen durch veränderliche Umgebungsbedingungen unterworfen. Außerdem können Betriebsparameter für den Reifen nur in einem begrenzten Rahmen durch Veränderungen am Fahrzeug variiert werden. Um diesen Nachteilen entgegenzuwirken, wurden im Rahmen dieser Arbeit Labormessverfahren entwickelt, die eine effiziente Untersuchung der Spikereifen unter kontrollierten Umgebungs- und verschiedensten Betriebsbedingungen ermöglichen. Die neu entwickelten Messverfahren wurden anhand bestehender Messverfahren aus dem Außenversuch validiert.

Für die Beschreibung des Eisgriffs ist davon auszugehen, dass die Kräfte an einem Spikereifen zum Teil vom Profilgummi und zum Teil von den Spikes übertragen werden. Während für die Kraftübertragung zwischen Gummi bzw. unbespiktem Reifen und Eis wie im vorigen Abschnitt dargestellt bereits verschiedene Ansätze existieren, fand die theoretische Beschreibung der Kraftübertragung am Spike bisher kaum Beachtung. Folglich wird in dieser Arbeit der Fokus auf die durch die Spikes bestimmten Aspekte der Kraftübertragung gelegt. Dementsprechend beziehen sich die vorgestellten Parameterstudien in erster Linie auf Betriebsparameter und den Spike betreffende konstruktive Parameter.

Wie die Literaturrecherche zeigt, ergibt sich vor allem auf glattem Eis ein deutlicher Vorteil für Spikereifen. Deshalb beschränkt sich diese Arbeit

auf die Untersuchung der Kraftübertragung auf glattem Eis, da hier die Mechanismen der Kraftübertragung an den Spikes am deutlichsten zum Tragen kommen.

Die Arbeit legt den Schwerpunkt auf Spikereifen, wie sie an Pkw zum Einsatz kommen. Dementsprechend wurden auch die verschiedenen Betriebs- und Konstruktionsparameter für die Untersuchungen gewählt. Für Spikereifen zum Einsatz an Nutzfahrzeug gelten andere gesetzliche Randbedingungen, Konstruktions- und Betriebsgrößen unterscheiden sich. Die grundlegenden Erkenntnisse der Arbeit sind jedoch auch in diesem Fall anwendbar. Zudem wurden nur Reifen im Neuzustand untersucht. Der Einfluss des Reifenverschleißes auf den Eisgriff bzw. die Fahrbahnschädigung ist nicht Gegenstand der Arbeit.

Ein Teil der vorgestellten Ergebnisse zum Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen wurde vom Verfasser dieser Arbeit bereits als Hauptautor einer weiteren Publikation veröffentlicht [29].

1.4 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst Grundlagen aufbereitet, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit zurückgegriffen wird. Nach einer kurzen Darstellung des Aufbaus aktueller Spikereifen und der regulatorischen Aspekte, die in der Spikereifenentwicklung zu berücksichtigen sind, sowie einer Einführung in die Grundlagen der Reifenkraftübertragung erfolgt eine Zusammenfassung der relevanten Aspekte des Materialverhaltens von Eis. Im Anschluss werden bestehende Messverfahren vorgestellt, mit denen die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis und die Fahrbahnschädigung durch Spikereifen untersucht werden kann. Abschließend wird erläutert, wie die Ergebnisse verschiedener Messverfahren im Fahrzeug- und Laborversuch verglichen werden können. Neben dieser allgemeinen Wissensgrundlage wird im weiteren Verlauf an verschiedenen Stellen der Arbeit auf spezifische Forschungsergebnisse anderer Autoren zurückgegriffen.

In Kapitel 3 werden ein physikalisches Modell für die Interaktion zwischen Spikereifen und Fahrbahn vorgestellt und verschiedene Phasen der

Interaktion abgeleitet. Ausgehend davon werden Mechanismen hergeleitet, die für die Kraftübertragung und den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen verantwortlich sind. Zur Quantifizierung der Wirkmechanismen werden in einem nächsten Schritt erste mathematische Formulierungen für die übertragbaren Kräfte an einem Spikereifen bzw. den Verschleiß einer Fahrbahn unter Spikereifenbeanspruchung aufgestellt und darüber die relevanten Einflussparameter identifiziert. Zudem werden Verknüpfungen zu bestehenden Forschungsbereichen außerhalb der Reifenentwicklung aufgezeigt, deren Ergebnisse die entwickelten Mechanismen plausibilisieren bzw. die sich für die weiterführende Behandlung der Thematik als dienlich erweisen können.

Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Messverfahren sind in Kapitel 4 detailliert beschrieben. Hierzu wird zunächst der Prüfstand vorgestellt, in dem die Versuche durchgeführt wurden, sowie die Vorüberlegungen und -versuche zum Messverfahren für die Kraftübertragung auf Eis. Anschließend werden jeweils in einem Abschnitt die neu entwickelten Messverfahren für die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis und den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen vorgestellt. Neben Aufbau, Durchführung und Auswertung der Versuche wird dabei auf die Reproduzierbarkeit der Messungen und die Validierung der Verfahren anhand etablierter Messverfahren eingegangen. Abschließend erfolgt jeweils eine Bewertung und Abgrenzung der neu entwickelten Verfahren.

In Kapitel 5 sind die Ergebnisse der Parameterstudien dargestellt, die im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurden. Im Anschluss an die Vorstellung der durchgeführten Versuche werden die ermittelten Daten vorgestellt, die beobachteten Einflüsse identifiziert und mit den in Kapitel 3 vorgestellten Mechanismen plausibilisiert sowie, wo möglich, eingehend erklärt. Wie schon die vorangegangenen Kapitel ist auch Kapitel 5 thematisch in Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß unterteilt.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen. Die Ergebnisse werden in den Stand der Forschung eingeordnet, der Erkenntnisgewinn durch die Arbeit wird herausgestellt und es werden Ansätze für die weitere wissenschaftliche Vertiefung des Themas gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Spikereifen

Spikereifen sind in den Ländern Nordeuropas weit verbreitet und tragen dort zur Sicherheit im winterlichen Straßenverkehr bei. Im Folgenden wird der Aufbau eines typischen Spikereifens aktueller Bauart beschrieben. Des Weiteren wird auf die gesetzlichen Randbedingungen eingegangen, die bei der Entwicklung von Spikereifen zu beachten sind.

2.1.1 Aufbau

Bei Spikereifen handelt es sich um Reifen ähnlich konventionellen unbespikten Winterreifen, in deren Lauffläche Metallstifte, die *Spikes*, eingesetzt sind. Dazu werden in die Lauffläche des Reifens bei der Vulkanisierung neben der Profilgeometrie Montagepositionen für die Spikes eingepreßt, bestehend aus einem unprofilierten Bereich mit einer Vertiefung, in die der Spike eingesetzt wird. Abbildung 2.1 zeigt einen Spikereifen, bevor die Spikes eingesetzt wurden.

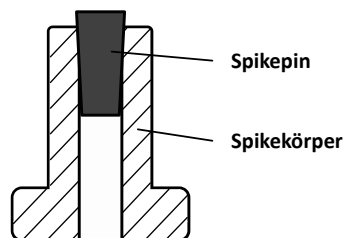


Abbildung 2.1: Spikereifen vor Montage der Spikes (links) und Querschnitt durch einen Spike (rechts)

Die einzelnen Spikes sind, wie in Abbildung 2.1 zu erkennen, mehrteilig aufgebaut. Der *Spikepin* ist der Teil des Spikes, der primär mit der Fahr-

bahn in Kontakt steht. Er dringt ins Eis ein, ermöglicht so formschlüssige Kraftübertragung und muss hohen Belastungen standhalten, insbesondere, wenn die Fahrbahn nicht mit Schnee oder Eis bedeckt ist. Deshalb ist der Spikepin üblicherweise aus Hartmetallen gefertigt, was dafür sorgt, dass er in gleichem Maße verschleißt wie das Profilmgummi des Reifens [54].

Der *Spikekörper* stellt die Verbindung zwischen Spikepin und Reifen her. Der Spikepin ist in den Spikekörper eingepresst, dieser wird durch die Klemmwirkung des umgebenden Gummis im Reifen gehalten. Der ausladende Flansch an der Unterseite² des Spikes unterstützt dies. Aus Gründen der Gewichtersparnis wird der Spikekörper in aktuellen Konstruktionen für den Pkw-Einsatz aus Aluminium gefertigt.

So, wie die Profiltrillen eines Reifens in Umfangsrichtung ungleichmäßig verteilt sind, um Resonanzphänomene zu vermeiden und die Tonalität des Abrollgeräusches zu verringern [74], sind auch die Spikes in unregelmäßigem Abstand über den Umfang des Reifens angeordnet. In Querrichtung verteilen sich die Spikes üblicherweise auf mehrere Spuren entlang des Reifenumfangs, wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist.



Abbildung 2.2: Anordnung der Spikes auf einem handelsüblichen Spikereifen. Die gestrichelten Linien markieren beispielhaft die Spuren für die Queranordnung der Spikes.

² Bezogen auf den Spike als einzelnes Bauteil wird in dieser Arbeit der zur Radmitte gewandte Teil als Unterseite bezeichnet, die von der Radmitte weggewandte Seite, die aus dem Reifen ragt, als Oberseite.

Wird der Spike ordnungsgemäß in den Reifen eingebracht, so ragt er über das Profil des Reifens hinaus. Der Abstand zwischen der Spitze des Spikepins und der Profilloberfläche des Reifens wird als Spikeüberstand h_p (p für engl.: „protrusion“) bezeichnet. Belastet man den Spike mit einer Kraft entlang seiner Hochachse, wie es zum Beispiel bei der Belastung eines Spikereifens durch das Fahrzeuggewicht geschieht, so wird der Spike in das Reifenprofil hineingedrückt. Die Kraft, die benötigt wird, um die Oberseite des Spikepins auf eine Höhe mit der Profilloberfläche zu bringen, wird als Spikekraft F_{Spike} bezeichnet. Der Spikeüberstand und die Spikekraft spielen eine wichtige Rolle bei der Zulassung von Spikereifen, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird. In Abbildung 2.3 sind die beiden Größen nochmals anschaulich dargestellt.

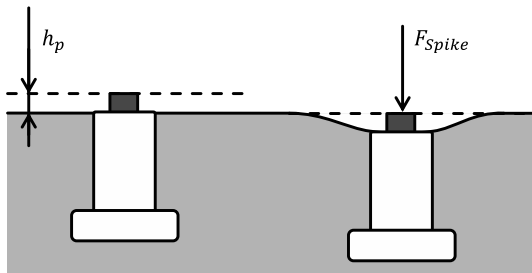


Abbildung 2.3: Spikeüberstand h_p und Eindrückung des Spikes in den Reifen durch die Spikekraft F_{Spike}

2.1.2 Regulatorische Aspekte

Spikereifen sind in verschiedenen Ländern der Welt für den Straßenverkehr zugelassen. Eine Übersicht über die Zulassungsbedingungen in verschiedenen europäischen Ländern gibt [76]. Neben nordeuropäischen Ländern und den Alpenregionen sind Spikereifen demzufolge auch in einigen südeuropäischen Ländern zugelassen, wie z. B. in Spanien. In Nordamerika ist die Zulassung von Spikereifen in den einzelnen Staaten unterschiedlich geregelt. Eine Übersicht hierzu gibt [78].

Obwohl eine Spikebereifung also in vielen Ländern zumindest zeitweise zulässig ist, kommen Spikereifen in erster Linie in Nordeuropa zum Ein-

2 Grundlagen

satz. Auch die für die Reifenentwicklung maßgeblichen gesetzlichen Randbedingungen ergeben sich aus den Anforderungen dieser Länder. In Tabelle 2.1 sind die jeweiligen gesetzlichen Anforderungen der verschiedenen nordeuropäischen Länder für Pkw-Spikereifen dargestellt. Neben dem Einsatzzeitraum sind auch konstruktive Größen wie Anzahl der Spikes, Spikeüberstand sowie die Masse der Spikes und die Spikekraft beschränkt.

Tabelle 2.1: Gesetzliche Einschränkungen konstruktiver Größen von Spikereifen für den Einsatz an Pkw in den Ländern Nordeuropas. Quelle der Daten: [75]

Größe	Dänemark	Finnland	Norwegen	Schweden
Nutzungszeitraum	1. Nov – 15. Apr.	1. Nov – 1. Montag nach Ostern	1. Nov – 1. Montag nach Ostern ³	1. Okt – 15. Apr.
Maximale Spikeanzahl ⁴	Keine Beschränkung			
≤ 13“		90	90	90
14“-15“		110	110	110
≥ 16“		130	130	130
Maximaler Spikeüberstand	Keine Beschränkung	1,2 mm 2,0 mm (gebrauchte Reifen)	1,2 mm 2,0 mm (gebrauchte Reifen)	1,2 mm 2,0 mm (gebrauchte Reifen)
Maximale Spikekraft	Keine Beschränkung	120 N	120 N	120 N
Maximale Spikemasse	Keine Beschränkung	1,1 g	1,1 g	1,1 g

³ In Nordnorwegen: 16. Okt. – 30. Apr.

⁴ Ab dem 1.7.2013: Maximal 50 Spikes pro Meter Abrollumfang

In Finnland wurde ein Gesetz verabschiedet, das zudem für alle ab dem 1. Juli 2013 produzierten Spikereifen eine weitere Einschränkung der Spikeanzahl vorsieht [95]. Die Beschränkungen für Spikeüberstand, -kraft und -masse bleiben bestehen. Davon abweichend kann ein Spikereifen auch zugelassen werden, wenn er die oben genannten Anforderungen nicht erfüllt. Dafür muss nachgewiesen werden, dass dieser Spikereifen die Fahrbahn nicht stärker schädigt als einer, der die genannten Beschränkungen erfüllt. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Gesetz neben Finnland auch in den anderen Ländern Nordeuropas Anwendung finden wird.

2.2 Grundlagen der Reifenkraftübertragung

Sämtliche Kräfte, die zwischen Fahrzeug und Fahrbahn wirken, müssen über die Reifen übertragen werden. Diese Kraftübertragung basiert vorrangig auf Kraftschluss, jedoch liegen andere Vorgänge zu Grunde, als dies beispielsweise bei der COULOMB'schen Reibung der Fall ist. Im Folgenden wird auf die grundlegenden Zusammenhänge eingegangen, die für ein Verständnis der Reifenkraftübertragung unabdingbar sind. Die Darstellung legt den Fokus auf die Umfangskraftübertragung, da die auch im weiteren Verlauf der Arbeit vorwiegend betrachtet wird. Für eine ausführlichere Beschreibung der Seitenkraftübertragung und zur weiteren Vertiefung wird auf einschlägige Literatur verwiesen, so z. B. [31], [46].

2.2.1 Kinematik des rollenden Reifens

In Abbildung 2.4 ist die Abrollsituation eines Reifens schematisch skizziert. Der Reifen dreht sich dabei mit der Winkelgeschwindigkeit ω um seine eigene Achse, der Reifenmittelpunkt bewegt sich mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZG} . Der dynamische Rollhalbmesser r_{dyn} stellt einen fiktiven Radius⁵ dar, der den Zusammenhang zwischen Reifenumfangs- und -winkelgeschwindigkeit beschreibt. Eine absolut starre Walze, deren

⁵ Der dynamische Rollhalbmesser lässt sich nicht direkt am rollenden Reifen messen. Stattdessen muss er aus dem Verhältnis zwischen Abrollstrecke und Verdrehwinkel bzw. Fahr- und Winkelgeschwindigkeit am frei rollenden Rad bestimmt werden.

Radius dem dynamischen Rollhalbmesser eines Reifens entspricht, legt ohne Schlupf pro Umdrehung den gleichen Weg zurück wie dieser Reifen.

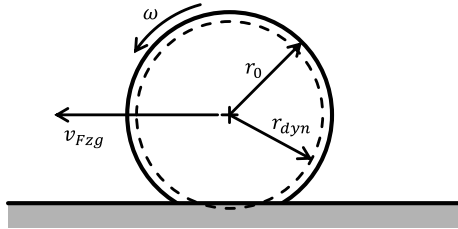


Abbildung 2.4: Abrollsituation eines Reifens (schematische Darstellung)

Eine allgemeine Betriebssituation, in der Reifenumfangs- und Fahrzeuggeschwindigkeit nicht übereinstimmen, kann über den Schlupf s charakterisiert werden. Dieser wird hier wie folgt definiert:

$$s = \frac{v_{Rad} - v_{Fzg}}{v_{Fzg}} = \frac{\omega r_{dyn} - v_{Fzg}}{v_{Fzg}}. \quad (2.1)$$

Der Schlupf eines Reifens in Querrichtung wird über den Schräglaufwinkel α beschrieben. Dieser stellt den Winkel zwischen der Symmetrie- bzw. Mittelebene und der Richtung der Schwerpunktschwindigkeit des Reifens, entsprechend der Bewegungsrichtung, dar (vgl. auch Abbildung 4.2, S. 77)

2.2.2 Mechanismen der Reifenkraftübertragung

Für die Kraftübertragung zwischen dem Gummi der Reifenauflfläche und der Fahrbahn sind verschiedene Mechanismen verantwortlich, die hier kurz vorgestellt werden.

Auf trockenen und nassen Fahrbahnen werden Kräfte in erster Linie über Adhäsions- und Hysteresereibung, viskose Reibung und Kohäsionsreibung übertragen (vgl. z.B. [16]). Die Adhäsions- und Hysteresereibung stellen einen zentralen Aspekt in der Arbeit von KUMMER und MEYER dar. Sie entwickelten ein Modell zur Beschreibung der Reibung an einem glei-

tenden Gummikörper, das auf diesen beiden Kraftübertragungsarten basiert [43].

Die *Adhäsionsreibung* kommt durch zwischenmolekulare Interaktion zwischen Gummi und Fahrbahn zustande. Berühren sich die beiden Reibpartner, so bilden sich über die VAN-DER-WAALS-Kräfte Bindungen zwischen den Molekülen von Gummi bzw. Fahrbahnmaterial aus. Gleitet nun ein Gummikörper über die Fahrbahn, so werden diese Bindungen aufgebrochen und das Gummi auf diese Weise zu Schwingungen auf molekularer Ebene angeregt. Aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens von Gummi entstehen dabei Energieverluste⁶, was in einem Widerstand für die Gleitbewegung, entsprechend einer Kraft entgegen der Gleitrichtung, resultiert.

Durch das Gleiten des Gummis über die Unebenheiten der Fahrbahn ergibt sich die *Hysteresereibung*. Wiederum bedingt durch die Viskoelastizität des Gummis entsteht beim Übergleiten einer Erhebung eine ungleichmäßige Pressungsverteilung: Wie in Abbildung 2.5 gezeigt, sorgt die Materialdämpfung dafür, dass beim Auflaufen auf die „Vorderseite“ der Erhebung, verbunden mit einer lokalen Kompression des Gummimaterials, die Kontaktdrücke ansteigen. Auf der „Rückseite“ wird das Gummi wieder entspannt und die Kontaktdrücke fallen ab. Als Resultierende aus dieser ungleichmäßigen Pressungsverteilung ergibt sich eine Kraft entgegen der Gleitrichtung.

Befindet sich ein flüssiges Zwischenmedium zwischen Gummi und Untergrund, so können Kräfte zwischen Gummi und Untergrund in Form viskoser Scherkräfte übertragen werden. Diese Kräfte sind deutlich geringer als die, die auf trockener Fahrbahn durch Adhäsions- oder Hysteresereibung übertragen werden können. Insbesondere auf Eis- und harten Schneefahrbahnen ist dieser Mechanismus der *viskosen Reibung* jedoch entscheidend. Bedingt durch die Reibwärme aus dem Kontakt zwischen

⁶ Das viskoelastische Materialverhalten des Gummis bedingt in Abweichung zu linear-elastischem Verhalten eine innere Materialdämpfung. Diese führt bei wechselnder Verformung des Gummis zu einer Hysterese im Kraftverlauf und somit zu Energieverlusten. Für weiterführende Informationen liefert [7] eine gute Übersicht.

schlupfendem Reifen und Eis bildet sich hier ein Flüssigkeitsfilm aus, dessen Dicke ausschlaggebend für die übertragbaren Kräfte ist [106] (vgl. auch Abschnitt 2.3.2).

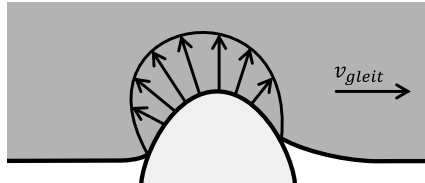


Abbildung 2.5: Pressungsverteilung an einem Gummikörper beim Gleiten über eine Unebenheit (nach [43])

Von *Kohäsionsreibung* ist auszugehen, wenn die Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn so groß werden, dass Partikel aus der Reifenoberfläche herausgerissen werden. In diesem Fall ist nicht das Kraftübertragungspotential zwischen Gummi und Fahrbahn für die übertragbaren Kräfte entscheidend sondern die innere Festigkeit des Gummis.

Auf Schneefahrbahnen und im Offroad-Bereich spielt zudem die *form-schlüssige Kraftübertragung* eine große Rolle. Hier dringen die Profilelemente bzw. die Lamellen des Reifenprofils in die Fahrbahnoberfläche ein und es können, zusätzlich zu den oben genannten Mechanismen, Kräfte über Formschluss zwischen Reifenprofil und Fahrbahnmaterial übertragen werden [25], [57], [107]. Auch für Spikereifen mit ihren durchs Eis kratzenden Spikes ist dieser Mechanismus von großer Bedeutung. Eine detaillierte Beschreibung der Kraftübertragung an Spikereifen erfolgt in Kapitel 3.

2.2.3 Umfangskraftcharakteristik von Reifen

Im vorigen Abschnitt wurden verschiedene Mechanismen vorgestellt, die für die Kraftübertragung am Reifen relevant sind. Einige davon sind von der Gleitgeschwindigkeit abhängig, dementsprechend hängen auch die übertragbaren Kräfte an einem Reifen stark von der Relativgeschwindigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn ab. Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 er-

wähnt, wird diese Relativgeschwindigkeit beim rollenden Reifen üblicherweise über den Schlupf angegeben. Zur Beschreibung der Umfangskraftcharakteristik eines Reifens dienen Reibwert-Schlupf-Kurven, wie in Abbildung 2.6 beispielhaft für verschiedene Fahrbahntypen dargestellt. Dabei werden die übertragbaren Umfangskräfte bezogen auf die Radlast über dem Schlupf aufgetragen. Für die Seitenkraftübertragung ergibt sich ein ähnliches Verhalten in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels.

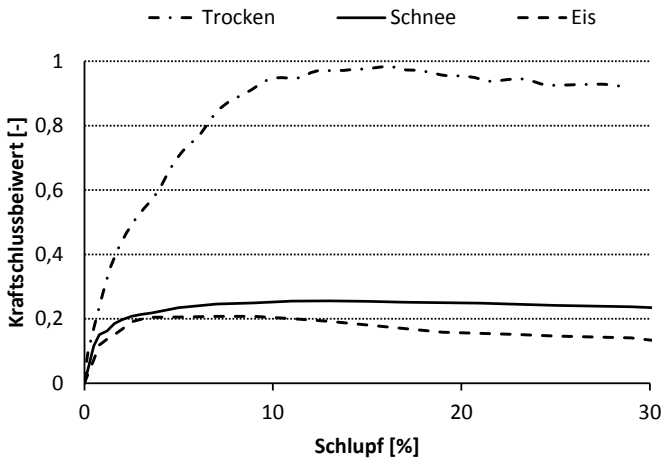


Abbildung 2.6: Antriebskraftcharakteristik eines nordischen Winterreifens auf trockener Fahrbahn, Eis und hochverdichtetem Schnee (Reifen: 225/45 R 17; Fülldruck: $p = 2,5$ bar; Radlast: $F_z = 4.500..5.200$ N; Fahrgeschwindigkeit: $v = 30$ km/h; Temperatur: $T = -5$ °C für Winterfahrbahnen)⁷

Die grundsätzliche Form der Kurven ist für alle Fahrbahntypen vergleichbar. Ohne Schlupf kann ein Reifen keine Umfangskraft übertragen (vgl. auch Abschnitt 3.1.4). Mit zunehmendem Schlupf steigt die übertragbare Kraft zunächst annähernd linear, dann in degressiver Weise weiter an, bis sie ein Maximum erreicht. Nach Erreichen dieses Maximums, fallen die

⁷ Die Messdaten für diese Abbildung wurden freundlicherweise von Bernd Wassertheurer, Mitarbeiter des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie, zur Verfügung gestellt.

übertragbaren Kräfte ab, bis sie schließlich zu hohen Schlupfwerten hin einen annähernd konstanten Wert erreichen. Dieser Wert für hohen Schlupf wird oft als Gleitreibwert, der maximale Reibwert oft als Haftreibwert bezeichnet. Physikalisch betrachtet ist diese Bezeichnung jedoch irreführend, da auch im Zustand der maximalen Kraftübertragung in Teilen der Reifenaufstandsfläche⁸ Gleiten vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb der Begriff des Reibwertmaximums verwendet.

Verschiedene Fahrbahntypen wirken sich, wie in Abbildung 2.6 zu erkennen, in erster Linie auf die erzielbaren Reibwerte und den Abfall der Reibwerte nach Erreichen des Reibwertmaximums aus. Insbesondere auf vereisten Fahrbahnen erreichen die übertragbaren Kräfte nur noch einen Bruchteil derer auf trockener Fahrbahn. Auch der Abfall der Reibwerte nach Überschreiten des Maximums fällt, relativ gesehen, deutlich stärker aus.

Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, können auf vereister Fahrbahn Spikereifen eingesetzt werden. Die Spikes dringen ins Eis ein und ermöglichen so die formschlüssige Übertragung von Kräften. Abbildung 2.7 zeigt die Auswirkungen auf die Umfangskraftcharakteristik im Vergleich zu einem unbespikten Reifen auf Eis. Es zeigt sich, dass der Spikereifen zwar die maximal übertragbaren Kräfte nicht unbedingt erhöht, jedoch stabil hohe Reibkräfte auch bei hohem Schlupf übertragen kann. Dieser Bereich hoher Schlupfwerte ist im realen Fahrbetrieb auf vereisten Fahrbahnen durchaus relevant und wird auch zur Bewertung von Reifen auf Winterfahrbahnen herangezogen. Zu beachten ist außerdem, dass der Vorteil des Spikereifens stark von der Temperatur abhängt. Für Temperaturen, die dem Gefrierpunkt sehr nahe liegen, können für den unbespikten Reifen deutlich niedrigere Reibwerte erwartet werden, während sich die übertragbaren Kräfte am Spikereifen kaum verringern. In diesem Fall wächst der Vorteil des Spikereifens im Vergleich zu der in Abbildung 2.7 dargestellten Situation nochmals deutlich an (vgl. auch Abbildung 5.6).

⁸ Die Reifenaufstandsfläche wird oft auch als (Reifen-)Latsch bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die beiden Begriffe gleichbedeutend verwendet.

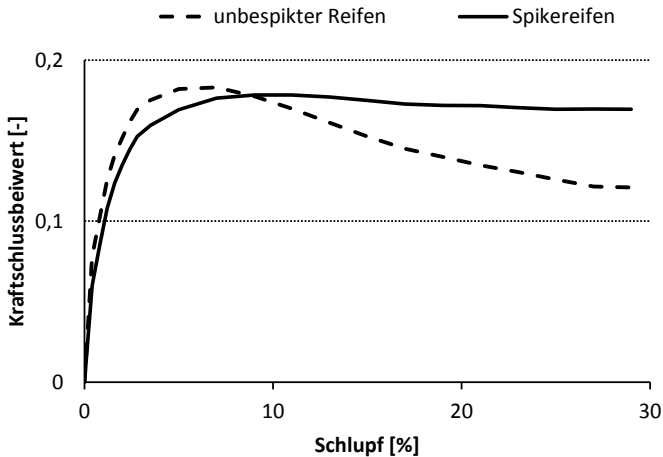


Abbildung 2.7: Antriebskraftcharakteristik eines unbespikten Reifens und eines Spikereifens auf Eis im Vergleich (eigene Messung; Reifen: 205/55 R 16, 130 Spikes; $p = 2,2$ bar; $F_z = 4.000$ N; $v = 30$ km/h; $T = -5$ °C)

2.3 Materialverhalten von Eis

Eis ist trotz seiner Allgegenwärtigkeit und seiner wichtigen Rolle in Alltag und Technik ein ungewöhnliches Material; seine Eigenschaften stellen eine äußerst komplexe Thematik dar. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die wichtigsten Besonderheiten in den Eigenschaften von Eis und die grundlegenden Herausforderungen in der Beschreibung dieser Eigenschaften gegeben. Zum Zwecke der Beschreibung der Kraftübertragung eines Spikereifens auf Eis werden im weiteren Verlauf der Arbeit an gegebener Stelle einzelne Aspekte der Materialeigenschaften näher beleuchtet (s. Abschnitt 3.2).

2.3.1 Mechanische Eigenschaften

Viele der technisch relevanten Materialien zeigen ein elastisch-plastisches Materialverhalten. Bis hin zu einer kritischen Belastung, der sogenannten

Streckgrenze, verhält sich das Material elastisch, wird es darüber hinaus belastet, ergeben sich plastische Verformungen. Eis zeigt diesbezüglich ein anderes Verhalten: Schon für geringe angelegte Spannungen stellt sich ein plastisches Fließen des Materials ein. Die so hervorgerufene Dehnrates steigt mit der aufgeprägten Spannung an [68]. Wird eine bestimmte Beanspruchungsgeschwindigkeit überschritten, versagt das Eis in spröder Weise. Die kritische Dehnrates für den Übergang zwischen duktilem und sprödem Verhalten hängt von der Temperatur des Eises ab. Für eine Temperatur von -20 °C ist unter Zugbeanspruchung bei Dehnrates größer 10^{-6} s^{-1} (entsprechend ca. 10% pro Tag) kaum plastische Verformung mehr zu erwarten, das Eis verhält sich spröde [68]. Es ist also offensichtlich, dass bei Belastung durch einen mit mehreren Umdrehungen pro Sekunde abrollenden Spikereifen von einem sprödem Verhalten des Eises ausgegangen werden kann.

Auch die Versagensgrenzen für Eis im Bereich des spröden Materialverhaltens werden in großem Maße durch die Belastungsrichtung und -geschwindigkeit und weitere Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Einspannung der untersuchten Eisprobe beeinflusst. So sorgt zum Beispiel eine Absenkung der Temperatur für eine Steigerung der Scherfestigkeit [23]. In Abschnitt 3.2 wird das Versagensverhalten für verschiedene Lastfälle näher betrachtet, die für die am Spikereifen auftretenden Belastungen relevant sind.

2.3.2 Aufschmelzen und Tribologie

Bekanntermaßen hat Eis unter Atmosphärendruck seinen Schmelzpunkt bei 0 °C , bei höheren Temperaturen wandelt es sich in Wasser. Bedingt durch die Anordnung der Wassermoleküle im flüssigen bzw. festen Zustand hat Wasser seine höchste Dichte nicht in der festen sondern in flüssiger Form bei ca. 4 °C – der Grund dafür, dass Eiswürfel im Wasserglas schwimmen. Dieses für eine Flüssigkeits-Festkörper-Paarung sehr ungewöhnliche Verhalten wird auch als *Anomalie des Wassers* bezeichnet (vgl. z. B. [68]).

Eine Folge dieses Verhaltens ist, dass der Schmelzpunkt von Eis mit zunehmendem Druck absinkt. Darin sah die Wissenschaft im beginnenden 20. Jahrhundert auch die Begründung für die geringe Reibung zwischen Eis und Festkörpern, wie sie zum Beispiel an einem gleitenden Schlittschuh beobachtet werden kann. So sollte sich durch die Flächenpressung zwischen Kufe und Eis der Schmelzpunkt soweit absenken, dass die Umwandlung zu Wasser auch bei der jeweiligen Temperatur möglich wird und der Schlittschuh auf einem Wasserfilm gleitet [71]. BOWDEN und HUGHES erkannten schließlich, dass zwar der Wasserfilm zwischen Festkörper und Eis reibwertbestimmend ist, dieser aber nicht in erster Linie durch das druckbedingte Aufschmelzen erzeugt wird, sondern durch die im Gleitkontakt erzeugte Reibwärme [11].

Dementsprechend beschreiben gängige Modelle für die Reifenkraftübertragung auf Eis die Kräfte zwischen Gummi und Eis über viskose Scherkräfte in einer Wasserschicht im Kontakt [66], [106]. Die Dicke der Wasserschicht ist dabei durch die entstehende Reibwärme sowie die thermischen Eigenschaften von Gummi und Eis beeinflusst. Für einen stationären Betriebszustand bildet sich nach einer gewissen Zeit bzw. Gleitlänge eine konstante Schichtdicke und somit ein konstanter Reibwert aus. Die Existenz eines solchen Flüssigkeitsfilms kann, zumindest in Teilen des Reifenlatschs, praktisch in jedem für die Reifenkraftübertragung relevanten Betriebsfall vorausgesetzt werden. DÖPPENSCHMIDT zeigte, dass auch für Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts eine flüssige oder flüssigkeitsähnliche Grenzschicht an der Eisoberfläche vorliegt (*quasi-liquid layer*) [17].

2.4 Messverfahren für die Kraftübertragung von Spikereifen

In Forschung und Entwicklung existieren verschiedene Messkonzepte und -verfahren, um die Kraftübertragung von Reifen zu untersuchen. Im Folgenden werden Messverfahren vorgestellt, die für die Untersuchung von Spikereifen auf Eis angewendet werden oder deren Einsatz für diesen Zweck naheliegend erscheint.

2.4.1 Reifenuntersuchung bei winterlichen Fahrbahnbedingungen

Untersucht man die Kraftübertragung von Reifen auf Eis- und Schneefahrbahnen, so ergibt sich eine grundsätzliche Herausforderung: Aufgrund der komplexen Materialeigenschaften von Eis und Schnee reagiert der Reibkontakt zwischen Gummi und Winterfahrbahnen sehr empfindlich auf eine Veränderung der Umgebungs- oder Beanspruchungsbedingungen. So wirken sich zum Beispiel Temperaturschwankungen oder, insbesondere bei Untersuchungen auf Schneefahrbahnen, Änderungen der Fahrbahnbeschaffenheit sehr stark auf die Versuchsergebnisse aus. Im Außenversuch ergibt sich durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung eine weitere Einflussgröße. Selbst bei einer sehr genauen Einstellung der Versuchsparameter sind daher die tatsächlich gemessenen Reibwerte kaum reproduzierbar.

Aus diesem Grund wird für die Bewertung eines Reifens üblicherweise nicht der tatsächlich gemessene Reibwert herangezogen, sondern der Vergleich zu einem Referenzreifen⁹, der zeitnah zu dem zu bewertenden Reifen unter vergleichbaren Bedingungen untersucht wird. Als Bewertungsgröße dient dabei der Ratingwert, mit dem das Kraftübertragungspotential des untersuchten Reifens relativ zu dem des Referenzreifens angegeben wird [18], [25]. Liegt der sich so ergebende Vergleichswert über 100%, so ist der untersuchte Reifen besser bewertet als der Referenzreifen.

2.4.2 Fahrzeugversuch

Eine Möglichkeit zur Reifenbewertung stellt der Fahrzeugversuch dar. Dabei wird ein mit den zu untersuchenden Reifen ausgestattetes Fahrzeug frei oder gehalten durch einen Bremsanhänger auf der interessierenden Fahrbahn gemäß einem bestimmten Fahrmanöver bewegt. Als

⁹ Der Referenzreifen dient im Allgemeinen zum Vergleich verschiedener Reifen in einer Versuchsgruppe und wird passend zum Untersuchungsziel gewählt. Es kann sich dabei sowohl um Serienreifen als auch um speziell für diesen Zweck entwickelte oder standardisierte Reifen handeln wie den Standard Reference Test Tire (SRTT, vgl. [4])

Bewertungsgrößen dienen am Fahrzeug gemessene Größen wie Beschleunigungen, über Messnaben erfasste Kräfte am Rad oder integrale Größen wie Bremswege oder Beschleunigungswege oder -zeiten.

Diese Bewertungsgrößen sind das Resultat der Interaktion von Reifen und Fahrbahn. Die Betriebsbedingungen für den Reifen ergeben sich aus dem jeweiligen Fahrmanöver, werden aber auch durch die Interaktion des Reifens mit der Fahrbahn und dem Fahrzeug beeinflusst. Deshalb können die Betriebsbedingungen in den seltensten Fällen genau eingestellt werden, sondern müssen anhand aufgezeichneter Bewegungsgrößen unter Berücksichtigung des Gesamtfahrzeugverhaltens nach der Messung bestimmt werden. So lässt sich beispielsweise aus der Querbeschleunigung, der Gierwinkelgeschwindigkeit und der Lenkradstellung eines Fahrzeug auf die Schräglaufwinkel der einzelnen Räder schließen.

Typische Fahrmanöver für derartige Fahrversuche sind beispielsweise in [5] aufgeführt. Bei einer Bergfahrt kann die maximale Steigfähigkeit des Fahrzeugs mit den entsprechenden Reifen untersucht werden. Zur Bewertung der Umfangskraftübertragung dienen auch geradlinige Beschleunigungsfahrten bzw. Abbremsungen auf eine bestimmte bzw. aus einer bestimmten Geschwindigkeit. Die Seitenkraftübertragung kann z.B. durch einen Lenkwinkelsprung untersucht werden, wobei die maximale und die mittlere Querbeschleunigung während des Manövers zur Bewertung herangezogen werden.

Fahrzeugversuche unter winterlichen Bedingungen werden vor allem auf Teststrecken in Schweden und Finnland aber auch in den Alpenländern durchgeführt. Da Wintertests hier nur saisonal möglich sind, kommen im europäischen Sommer auch Teststrecken in Neuseeland zum Einsatz, was jedoch mit hohen Kosten verbunden ist. Vereinzelt werden auch Eis- oder Schneehallen als Versuchsumgebung genutzt, die einen ganzjährigen Versuchsbetrieb ermöglichen. Die Vergleichbarkeit dieser künstlich erzeugten Umgebungsbedingungen zu den in freier Natur vorliegenden konnte jedoch bisher nicht vollständig nachgewiesen werden.

2.4.3 Sonstige Verfahren im Außenversuch

Neben entsprechend bereiften und mit Messtechnik ausgestatteten Serienfahrzeugen kommen im Außenversuch auch spezielle Messfahrzeuge zum Einsatz. Dabei handelt es sich üblicherweise um schwere Fahrzeuge¹⁰, an denen ein zusätzliches Messrad befestigt ist. Am schwedischen Straßen- und Verkehrsforschungsinstitut wird ein Mess-Lkw verwendet, an dessen Heck eine Radführung befestigt ist [63]. LEISTER beschreibt in [47] einen Messomnibus, zwischen dessen beiden Achsen ein weiterer Radträger für das Messrad befestigt ist, ein ähnliches System kommt nach [67] integriert in einem Lkw-Anhänger bei der niederländischen Forschungsorganisation TNO zum Einsatz.

Während das Fahrzeug sich in Geradeausfahrt befindet, können über die Radführung des Messrades verschiedene Betriebsbedingungen für den zu untersuchenden Reifen realisiert werden. Dabei sind die Einstellgenauigkeit und der Verstellbereich üblicherweise größer als am Serienfahrzeug. Zudem kann der Reifen unter realistischen Umgebungsbedingungen untersucht werden, wobei auch hier mit einem starken Einfluss durch Schwankungen in denselbigen zu rechnen ist.

2.4.4 Laborversuch

Laborversuche zur Untersuchung der Reifenkraftübertragung lassen sich in zwei grundlegende Kategorien unterteilen. Zum einen kann die Kraftübertragung anhand von Gummiproben untersucht werden, die ein oder mehrere Profilelemente des Reifens abbilden, zum anderen können komplette Reifen am Prüfstand untersucht werden.

Laboruntersuchung von Gummiproben

Zur Untersuchung von Gummiproben kommen oftmals Linearprüfstände zum Einsatz [57], [69], [101]. Hier wird eine vertikal belastete Gummiprobe über eine Fahrbahn gezogen und die dabei auftretenden Kontakt-

¹⁰ Durch die große Masse des Versuchsfahrzeugs wird dessen Bewegung über die Kräfte am Messrad nur in geringer Weise beeinflusst.

kräfte aufgezeichnet. Somit wird das Kraftübertragungsverhalten der Probe unter reiner Gleitbeanspruchung untersucht, was der Beanspruchungssituation an einem Fahrzeug mit blockiergebremsten Rädern entspricht. Während eine solche Vorgehensweise gut geeignet ist, um Vorgänge auf Profilelementebene zu untersuchen, können die komplexen Vorgänge, die an einem unter definiertem Schlupf abrollenden Reifen auftreten, nicht oder nur mit sehr großem Aufwand abgebildet werden.

Laboruntersuchung von Komplettreifen

Für die Untersuchung der Kraftübertragung an kompletten Reifen kommen verschiedene Prüfstandsbauarten zum Einsatz. In Abbildung 2.8 ist die jeweilige Anordnung von Reifen und Fahrbahn für die verschiedenen Bauarten schematisch dargestellt. An einem Tellerprüfstand rollt der Reifen auf einer kreisförmigen Scheibe ab, deren Drehachse parallel zur Reifenhochachse steht während der Reifen am Flachbahnprüfstand auf einem endlosen Band läuft, das über Trommeln geführt wird. Trommelprüfstände sind als Innen- und Außentrommelprüfstände realisierbar, wobei der Reifen jeweils auf der Innen- bzw. Außenseite einer Trommel abrollt, deren Rotationsachse parallel zu der des Reifens angeordnet ist. An einem Linearprüfstand wird der Reifen geradlinig über die Fahrbahn bewegt.

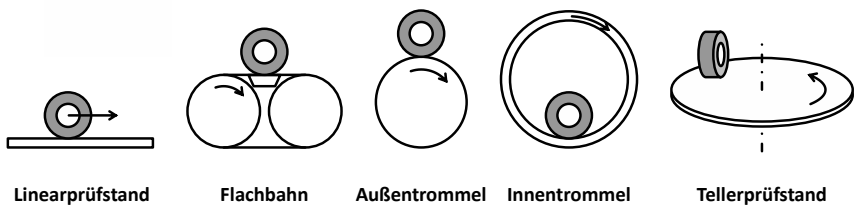


Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau verschiedener Bauarten für Reifenprüfstände (vgl. [10])

Für Untersuchungen auf winterlichen Fahrbahnen sind Außentrommel- und Flachbahnprüfstände prinzipbedingt nicht geeignet, da durch die

Fliehkräfte und im Falle der Flachbahn durch die Verformung des Bandes die Stabilität der Schnee- bzw. Eisauflage nicht gewährleistet ist.

Bei Tellerprüfständen läuft der Reifen auf einer kreisförmigen Bahn, was dazu führt, dass sowohl Reifen als auch Fahrbahn ständig durch Querschlepp belastet werden. Insbesondere bei den sehr anfälligen Winterfahrbahnen ist hierdurch mit stark negativen Auswirkungen zu rechnen. Wie eine Patentschrift der Firma Bridgestone zeigt, kamen Tellerprüfstände bereits zur Untersuchung von Winterreifen auf Schnee zum Einsatz [100]. Nach BOLZ sind mit einer solchen Testanordnung jedoch nur geringe Prüfgeschwindigkeiten realisierbar [10]. Die Nutzung für Spikereifenuntersuchungen ist nicht dokumentiert.

Innentrommelprüfstände eignen sich gut für Laborversuche auf winterlichen Fahrbahnen und kommen an verschiedenen Orten für die Untersuchung der Kraftübertragung auf Eis zum Einsatz (vgl. [87], wie in [65] erwähnt). Am Innentrommelprüfstand des Karlsruher Instituts für Technologie (ehemals: Universität Karlsruhe (TH)) werden seit Jahren Untersuchungen auf Schneefahrbahnen durchgeführt [10], [25]. Des Weiteren wurden von WEBER erste Versuche zur Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis durchgeführt [103]. Die konkave Krümmung der Fahrbahn sorgt an Innentrommelprüfständen für eine Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche, verglichen mit einer ebenen Fahrbahn. Dies wirkt sich insbesondere in der Schräglauf- und der Rückstellsteifigkeit aus [6]. Durch einen hinreichend großen Trommeldurchmesser kann dieser Einfluss klein gehalten werden, zudem ist, wie in [27] gezeigt, auch eine näherungsweise rechnerische Korrektur möglich. Durch die Beschränkung der Fahrbahnlänge ist weiterhin die Beanspruchung der empfindlichen Schnee- und Eisfahrbahnen ein kritischer Faktor. Hier ist durch entsprechende Gestaltung der Messverfahren darauf zu achten, dass das Reibwertniveau der Fahrbahn nicht durch zu hohe Kraftschlussbeanspruchung über mehrere Trommelumdrehungen hinweg verändert wird.

Linearprüfstände verfügen grundsätzlich nur über eine begrenzte Teststrecke und sind damit in den erzielbaren Testgeschwindigkeiten begrenzt. Für Untersuchungen auf Winterfahrbahnen kommt am schwedi-

schen Straßen- und Verkehrsforschungsinstitut (VTI) der sogenannte Flachbettprüfstand (engl.: „flat bed tyre test facility“) zum Einsatz [58]. Hier wird eine 55 Meter lange Fahrbahn mit der Prüfgeschwindigkeit unter einem fest stehenden Messrad hindurchgezogen. Der Vorteil dieses Konzepts liegt in der ebenen Fahrbahn, die eine realistische Radaufstandsfläche mit sich bringt. Die großen Abmessungen und damit verbunden lange Beschleunigungs- und Bremswege ermöglichen realistische Prüfgeschwindigkeiten, verursachen jedoch auch einen großen Bauraumbedarf. Genauere Informationen zum Ablauf der Messprozeduren, die an diesem Prüfstand zum Einsatz kommen, sind aus den vorliegenden Veröffentlichungen nicht verfügbar.

2.5 Untersuchung des Fahrbahnverschleißes durch Spikereifen

Wie bereits einleitend erwähnt, birgt der Einsatz von Spikereifen neben der verbesserten Fahrsicherheit auf vereisten Fahrbahnen auch Nachteile in Form gesteigerten Fahrbahnverschleißes auf *unbedeckten* Fahrbahnen¹¹. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze und Methoden zur Untersuchung oder Beschreibung der Fahrbahnschädigung durch Spikereifen, eine Auswahl wird im Folgenden vorgestellt.

2.5.1 Straßen- und Verkehrsbeobachtung

Soll die Fahrbahnschädigung durch Spikereifen aus Sicht des Straßenbaus oder -betriebs bewertet werden, geschieht dies oft über die Beobachtung des Fahrbahnverschleißes unter realer Verkehrsbelastung. ANGERINOS ET AL. geben in [3] einen Überblick über die Ergebnisse verschiedener derartiger Studien. Als Maß für den Fahrbahnverschleiß dient üblicherweise die Höhenabnahme der Fahrbahn, meist werden die Werte auf die Anzahl der passierenden Fahrzeuge oder der Reifenüberrollungen bezogen.

Nach Einschätzung des Verfassers der vorliegenden Arbeit eignet sich diese Vorgehensweise sehr gut, um den Fahrbahnverschleiß in einer ge-

¹¹ Unter unbedeckten Fahrbahn werden im Rahmen dieser Arbeit Fahrbahnzustände verstanden, in denen die Fahrbahn nicht durch eine Schnee- oder Eisschicht bedeckt ist.

wissen Region unter gegebener Beanspruchung zu beschreiben bzw. Abschätzungen für die Zukunft treffen zu können. Auch die Wirksamkeit gesetzlicher Änderungen kann über die Auswirkungen im realen Fahrbetrieb gut beurteilt werden.

Eine Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Betriebs- und Fahrzeugparameter ist in sehr bedingtem Maße möglich. Über die Analyse verschiedener Fahrbahnstellen, die mit typischen Fahrsituationen konfrontiert werden, kann der Einfluss verschiedener Betriebsparameter abgeschätzt werden. So wird zum Beispiel vor Ampeln die Fahrbahn durch das Abbremsen und das erneute Beschleunigen der Fahrzeuge beansprucht, auf Autobahnen rollen die Reifen der Fahrzeuge mit verhältnismäßig geringem Schlupf, jedoch mit hoher Geschwindigkeit ab. Der Einfluss fahrzeugseitiger Parameter lässt sich durch eine statistische Betrachtung des Fahrzeugbestands in Bezug auf solche Parameter wie z.B. Anteil der mit Spikereifen ausgestatteten Fahrzeuge, durchschnittlicher Spikeüberstand (wenn je nach Region oder Untersuchungszeitraum verschieden), etc. abschätzen. Die gezielte Analyse des Einflusses verschiedener Parameter im Betrieb und der Konstruktion der Spikereifen kann eine solche Beobachtung im Realverkehr jedoch nicht leisten.

2.5.2 Experimentelle Untersuchung im Fahrzeug- und Laborversuch

Sollen gezielt Auswirkungen verschiedener Reifeneigenschaften auf den Fahrbahnverschleiß untersucht werden, so bieten sich Versuche mit einzelnen spezifischen Reifenmodellen an. Diese Versuche können wiederum in einer Prüfstandsumgebung oder im Außenversuch am realen Fahrzeug durchgeführt werden. In beiden Fällen besteht die Schwierigkeit, dass ein Spikereifen bei einmaligem Überrollen einer Stelle in der Fahrbahn dort nur einen geringen Verschleiß erzeugt. Um statistisch sicher messbare Verschleißmengen zu erzeugen, sind also eine Vielzahl von Überrollungen sowie ein ausreichend genaues Messverfahren zur Quantifizierung des Verschleißes erforderlich.

Bekanntes Verfahren zur Laboruntersuchung des Fahrbahnverschleißes an kompletten Spikereifen verwenden Innentrommelprüfstände [35], [91]. Dabei rollt der Reifen auf der Innenseite einer Trommel, die Fahrbahn, die durch den Spikereifen verschlissen wird, ist auf der Innenseite der Trommel aufgebracht. Der Verschleiß der Fahrbahn wird über den Massenverlust [91] bzw. die Höhenabnahme der Fahrbahn quantifiziert [35]. Dazu wird bei den genannten Verfahren die komplette bzw. ein großer Teil der Fahrbahn für die Auswertung herangezogen, woraus ein hoher Aufwand in der Auswertung der Versuche hervorgeht. Beide genannten Verfahren sind in den entsprechenden Veröffentlichungen dokumentiert, wurden jedoch gemäß dem Stand der Literatur nicht weiter verfolgt und sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nicht im Einsatz.

In den nordeuropäischen Ländern kommt zur Bewertung des Fahrbahnverschleißes durch Spikereifen weithin akzeptiert ein Verfahren im Außenversuch zum Einsatz, das von UNHOLA ET AL. entwickelt wurde [96]. Dabei wird der Fahrbahnverschleiß über den Massenverlust definierter Probenkörper bestimmt. Diese sind eben in die Fahrbahn eingelassen und werden von einem mit Spikereifen ausgestatteten Fahrzeug mehrfach überfahren. Je Fahrzeugüberfahrt ergeben sich zwei Reifenüberrollungen, jeweils eine mit dem Reifen der Vorder- und der Hinterachse. Um eine ausreichend hohe Anzahl an Überrollungen zu erreichen – eine gängige Prüfprozedur setzt 400 Überrollungen voraus [94] – sind also eine Vielzahl an Überfahrten mit dem Fahrzeug notwendig. Dieses muss für jede Überfahrt gewendet, auf Prüfgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend wieder abgebremst werden, was sich in einem großen Aufwand für die Durchführung der Versuche niederschlägt.

2.6 Vergleich von Fahrzeug- und Laborversuch zur Reifenuntersuchung

Laborversuche dienen dazu, ein technisches System oder Teilsystem unter definierten Bedingungen zu untersuchen. Die Bedingungen simulieren dabei entweder eine reale Betriebssituation des Systems oder repräsentieren die Beanspruchung, die das System über eine bestimmte Dauer erfährt, in geraffter Form. Vorteile bestehen in der Loslösung des Systems

aus seiner üblichen Umgebung und den damit verbundenen Störeinflüssen, in der Erhöhung der Reproduzierbarkeit und der Kostenoptimierung. Manche Eigenschaften lassen sich auch aus Sicherheitsgründen nicht in der realen Einsatzsituation überprüfen, so zum Beispiel die Festigkeitsuntersuchung an Reifen [31].

Eine mögliche Prüfumgebung für solche Laborversuche stellen Prüfstände dar. Für die Untersuchung der Reifenkraftübertragung stehen grundsätzlich verschiedene Prüfstandstypen zur Verfügung, wie in Abbildung 2.8 aufgeführt. Allen gemeinsam ist, dass dabei der reale zu untersuchende Reifen auf einer Laufbahn abrollt, die die Fahrbahn repräsentiert. Verschiedene Betriebsituationen am Fahrzeug können abgebildet werden, indem die entsprechenden Lasten und kinematischen Bedingungen aufgeprägt werden. So kann zum Beispiel durch Einstellen einer Differenz zwischen Reifenumfangs- und Fahrbahngeschwindigkeit Schlupf aufgebracht und auf diese Weise die Umfangskraftübertragung des Reifens untersucht werden. Der große Vorteil des Prüfstandsversuchs gegenüber dem Fahrzeugversuch liegt neben der besseren Einstellbarkeit der Betriebsparameter in der Entkopplung von den Umgebungsbedingungen. Unabhängig von der realen Wettersituation und Jahreszeit können Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Bewässerung der Fahrbahn am Prüfstand beliebig eingestellt werden. Für Versuche auf winterlichen Fahrbahnen ist insbesondere die reproduzierbare Herstellung der Fahrbahnen am Prüfstand von Vorteil, da dadurch die Streuung der Fahrbahneigenschaften gegenüber dem Außenversuch reduziert werden kann.

Die Validierung solcher Prüfstandsverfahren wird oft über einen Vergleich zu Ergebnissen aus dem Fahrzeugversuch durchgeführt. Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 erläutert, wird eine Reifenvariante, insbesondere bei der Untersuchung der Reifenkraftübertragung auf winterlichen Fahrbahnen, oftmals über den Vergleich zu einem Referenzreifen bewertet. Auf diese Weise kann der Einfluss veränderlicher Umgebungsbedingungen auf die absoluten Messwerte korrigiert werden. Auch im Vergleich zwischen Prüfstands- und Fahrzeugversuch ist aufgrund der unterschiedlichen Versuchsumgebungen mit unterschiedlichen Absolutwerten zu rechnen. Der Vergleich erfolgt deshalb über die ermittelten Ratingwerte.

2.6 Vergleich von Fahrzeug- und Laborversuch zur Reifenuntersuchung

Ein optimales Prüfstandsmessverfahren ermittelt für den Vergleich verschiedener Reifen dieselben Ratingwerte wie der Fahrzeugversuch, d.h. die Verhältnisse zwischen den Reifen werden in vergleichbarer Weise abgebildet. Trägt man, wie in Abbildung 2.9 dargestellt, die mit den beiden Messverfahren ermittelten Ratingwerte gegeneinander auf, so liegen die Punkte in diesem Fall auf einer Geraden mit der Steigung 1 durch den Punkt der Referenz, die bei beiden Verfahren zu 100% gesetzt wird. In der Praxis ergibt sich oftmals in unterschiedlichen Verfahren eine unterschiedliche Spreizung der Ratingwerte, d.h. Unterschiede einer Variante zur Referenz werden durch unterschiedliche Messverfahren unterschiedlich stark aufgelöst. Dies kann in Kauf genommen werden, wenn die Verhältnisse zwischen den Ratingwerten richtig abgebildet und die Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten im Vergleich zur nicht erklärten Streuung nicht zu klein werden. In diesem Fall weicht die Steigung der Geraden, die sich aus dem Vergleich der Ratingwerte ergibt, von 1 ab.

Als Maß dafür, wie gut ein Labormessverfahren den Fahrzeugversuch abbildet, wird im Folgenden der Korrelationskoeffizient der Ratingwerte aus Labor- und Fahrzeugversuch herangezogen. Sind RW_{Lab} die im Labor- bzw. Prüfstandsversuch ermittelten Ratingwerte und RW_{Fzg} die im Fahrzeugversuch ermittelten, ergibt sich der Korrelationskoeffizient zu

$$R = \frac{Cov(RW_{Lab}, RW_{Fzg})}{\sigma(RW_{Lab})\sigma(RW_{Fzg})} \quad (2.2)$$

mit $Cov(RW_{Lab}, RW_{Fzg})$ = Kovarianz der beiden Ratingwerte
 $\sigma(RW_{Lab}), \sigma(RW_{Fzg})$ = Standardabweichung des jeweiligen Ratingwerts

Der Korrelationskoeffizient kann betragsmäßig Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Liegt ein rein linearer Zusammenhang zwischen den Ratingwerten vor, so beträgt der Korrelationskoeffizient 1, unabhängig von der Steigung des linearen Zusammenhangs. Je weiter sich die Werte von 1 entfernen, umso schlechter kann der Zusammenhang zwischen den beiden betrachteten Größen linear angenähert werden.

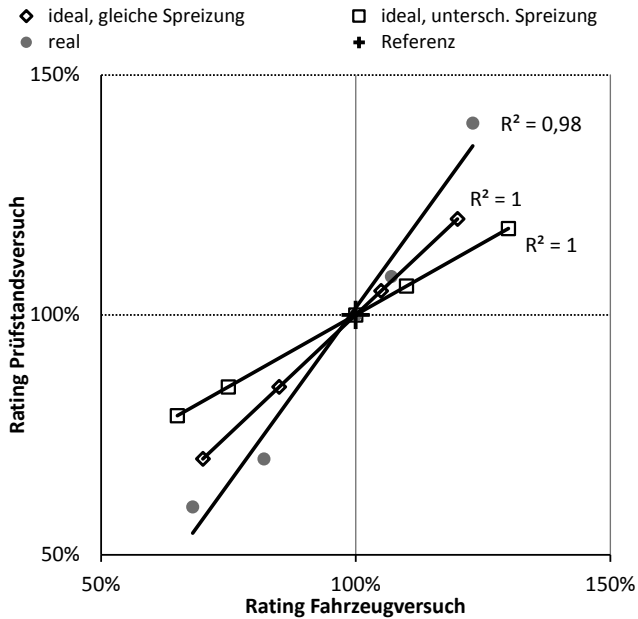


Abbildung 2.9: Beispielhafte Korrelationen aus dem Vergleich von Prüfstands- und Fahrzeugversuch

3 Mechanismen der Kraftübertragung und des Fahrbahnverschleißes

Ziel dieses Kapitels ist die grundlegende physikalische Beschreibung der Vorgänge zwischen Spikereifen und Fahrbahn, die für die Kraftübertragung auf Eis und den Fahrbahnverschleiß verantwortlich sind. Dabei wird in einem ersten Schritt auf die Interaktion von Reifen und Fahrbahn und die daraus resultierenden Kontaktbedingungen für die Spikes eingegangen. Anschließend werden Mechanismen vorgestellt, die die Kraftübertragung durch das Eis ermöglichen bzw. den Verschleiß der unbedeckten Fahrbahn verursachen. Basierend auf diesen Mechanismen werden die relevanten Einflussparameter für den Eisgriff und den Fahrbahnverschleiß identifiziert und der qualitative Einfluss von Parametervariationen abgeschätzt. Als Ausgangspunkt für die tieferreichende Behandlung der Thematik wird die Verbindung zu ausgewählten bestehenden Forschungsarbeiten aufgezeigt, die ähnliche Ansätze verfolgen oder Erkenntnisse erzielten, die für die detailliertere Beschreibung der Spikereifen-Fahrbahn-Interaktion hilfreich sein können. Die erwarteten Parametereinflüsse werden durch einen Vergleich zu vorhandenen Forschungsergebnissen plausibilisiert.

3.1 Interaktion zwischen Spikereifen und Fahrbahn

Sowohl die Kraftübertragung als auch der Fahrbahnverschleiß durch einen Spikereifen werden in großem Maße durch die Wechselwirkung des Spikes mit der Fahrbahn bestimmt. In diesem Abschnitt werden die Interaktion des Spikereifens mit der Fahrbahn betrachtet und basierend darauf die Kontaktbedingungen zwischen Spike und Fahrbahn herausgearbeitet. Dazu wird zunächst eine Einteilung der Interaktion in verschiedene Phasen vorgenommen, bevor dann einzelne Aspekte des Kontakts detaillierter beschrieben werden.

3.1.1 Phasen der Interaktion

Entlang seines Weges auf dem Reifenumfang steht jeder Spike zeitweise mit der Fahrbahn in Kontakt. Diese Interaktion lässt sich, wie bereits von GÜTLINGER ET AL. in [29] gezeigt, in verschiedene Phasen unterteilen¹². Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf die Übertragung von Umfangskräften. Für die Seitenkraftübertragung sind ähnliche Vorgänge zu erwarten, jedoch unterscheidet sich hier die Abrollrichtung von der Richtung der Kraftübertragung bzw. der Auslenkung der Spikes.

Abbildung 3.1 veranschaulicht die verschiedenen Interaktionsphasen des Spikes für den Fall der Antriebskraftübertragung. Durch den vorliegenden Schlupf besteht in der Reifenaufstandsfläche eine Relativgeschwindigkeit zwischen Reifenkarkasse und Fahrbahn, die durch verschiedene Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt ausgeglichen werden muss (vgl. auch Abschnitt 3.1.4). Der Latsch wird hierbei und im Folgenden als der Kontaktbereich zwischen Profilgummi und Fahrbahn verstanden, sodass die Kontaktlänge des Spikes größer ist als die Länge des Reifenlatschs. Die zugrunde gelegten Vorgänge im Latsch des Spikereifens orientieren sich am Bürstenmodell, das oftmals für die Beschreibung der Kraftübertragung an unbespikten Reifen Anwendung findet [24], [93].

Der Kontakt zwischen Spike und Fahrbahn beginnt mit dem Aufschlagen des Spikes auf der Fahrbahn (Phase 1). Da der Spike mit einem gewissen Überstand über die Profiloberfläche des Reifens hinausragt, berührt er die Fahrbahn, bevor das umgebende Gummi mit der Fahrbahn in Kontakt kommt. Die Orientierung des Spikes wird senkrecht zur Karkasse angenommen, sodass der Spike beim Aufschlagen unter einem bestimmten Winkel auf die Fahrbahn trifft, der durch die Kontur des abgeplatteten Reifens sowie den Spikeüberstand beeinflusst wird.

Phase 2 beschreibt die Zeit zwischen dem Aufschlagen und dem Zeitpunkt, an dem der Spike in den Reifenlatsch einläuft. Während dieses Vorgangs wird der Spike in den Reifen eingedrückt und kann, je nach Be-

¹² Die im Folgenden dargestellten Zusammenhänge wurden unter Mitwirkung des Verfassers dieser Arbeit bereits in der genannten Publikation veröffentlicht.

schaffenheit der Fahrbahn, in diese Eindringen. Auf einer ebenen, harten Fahrbahn ist das Eindringen des Spikes vernachlässigbar, dagegen muss auf einer vereisten Fahrbahn von einem deutlichen Eindringen des Spikes ins Eis ausgegangen werden.

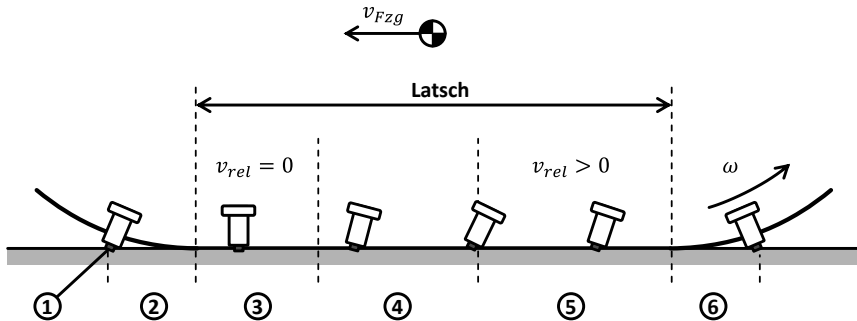


Abbildung 3.1: Phasen der Interaktion im Kontakt zwischen Spikereifen und Fahrbahn für den Fall der Antriebskraftübertragung (vgl. [29])

Auf einer realen Asphaltfahrbahn wird das Eindringen des Spikes in den Reifen auch durch die Fahrbahntextur beeinflusst. In diesem Fall kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass der Spike nicht merklich in das Fahrbahnmaterial eindringt. Allerdings kann der Spike auf eine Vertiefung in der rauen Fahrbahn treffen und wird entsprechend weniger in das Profilgummi eingedrückt.

Der Bereich des Haftens im Latsch wird durch Phase 3 beschrieben. In diesem Bereich liegt keine Relativbewegung zwischen Spike bzw. umgebendem Gummi und der Fahrbahn vor. Die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Reifenkarkasse und Fahrbahn kann hier durch eine elastische Auslenkung der Spikes und der Profilelemente kompensiert werden.

Überschreiten die für eine elastische Auslenkung des Spikes bzw. des Profilgummis notwendigen Kräfte die Haftgrenze des Reibkontakts zur Fahrbahn, beginnen Spike bzw. Gummi auf der Fahrbanoberfläche zu gleiten. Je nach Beschaffenheit der Fahrbahn ist davon auszugehen, dass Spike und umgebendes Profilgummi nicht gleichzeitig zu Gleiten beginnen. Den

Übergangsbereich, in dem teilweises Gleiten im Kontakt vorliegt, bezeichnet Phase 4. Auf vereister Fahrbahn ist davon auszugehen, dass das Gummi vor dem Spike zu Gleiten beginnt, auf trockener ebener Asphaltfahrbahn ist ein früherer Gleitbeginn für die Spikes denkbar.

In Phase 5 liegt schließlich quasi kontinuierliches Gleiten vor, d. h. im Mittel ist eine Relativbewegung zwischen Spike bzw. Gummi und Fahrbahn vorhanden. Insbesondere das Gleiten des Spikes auf Eis oder rauher Asphaltfahrbahn ist jedoch als sehr dynamischer Prozess zu verstehen. Dabei wird ein ständiger Wechsel zwischen Haften des Spikes und Losreißen vermutet, wenn der Spike sich über eine Erhebung der Fahrbahntextur bewegt oder sich beim Gleiten durchs Eis ein Eisspan löst. Auch in dieser Phase ergibt sich eine Auslenkung für den Spike und die Profilelemente, die von den übertragenen Umfangskräften während des Gleitens und den Längssteifigkeiten von Spikebettung und Profilelement abhängt.

Phase 6 am Ende des Kontakts stellt schließlich das Gegenstück zu Phase 2 dar: Hier wird der Spike entlastet, die vertikale Belastung reduziert sich auf null und die verbleibende Auslenkung des Spikes wird durch Gleiten auf der Fahrbohnoberfläche abgebaut.

Die Anteile der Phasen 3, 4 und 5 an der gesamten Länge des Latschs variieren mit dem Schlupf, unter dem der Reifen betrieben wird, und den Reibwerten zwischen Reifen bzw. Spike und Fahrbahn. Für kleine Schlupfwerte und hohe Reibwerte werden die Gleitbereiche im Latsch verschwindend klein während sie für hohe Schlupfwerte einen großen Anteil der Latschlänge ausmachen. Einen Sonderfall stellt das blockiergebremste Rad dar: Hier gleitet der Reifen über den kompletten Latsch, es liegt kein Haften mehr vor und auch das Aufschlagen und die Vorgänge am Ein- und Auslauf des Latsches entfallen, da das Rad stillsteht.

3.1.2 Aufschlagen

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, beginnt der Kontakt zwischen Spike und Fahrbahn mit einem Aufschlagen des Spikes auf die Fahrbahn. Da der Spike über das Profil des Reifens hinausragt und somit vor dem umgebenden Gummi unter einem gewissen Winkel auf die Fahrbahn trifft, liegt

im allgemeinen Fall eine Relativgeschwindigkeit zwischen Spike und Fahrbahn vor. Diese wird durch die in Abbildung 3.2 dargestellte Kontaktgeometrie und den Schlupfzustand des Reifens beeinflusst.

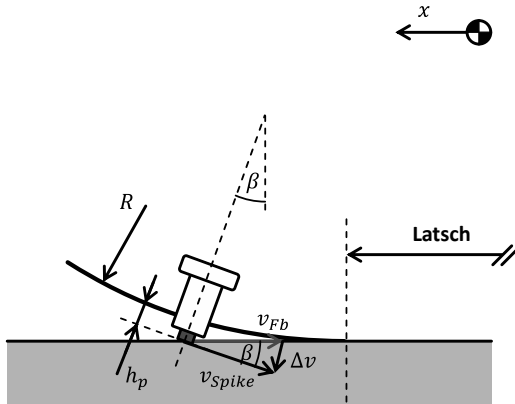


Abbildung 3.2: Kontaktgeometrie des Spikes zum Zeitpunkt des Aufschlagens (vgl. [29]) mit dem Krümmungsradius R im Bereich des Auftreffens. Die Betrachtung erfolgt für ein in der Reifendrehachse liegendes Koordinatensystem

Der Spike bewegt sich, bezogen auf ein in der Reifendrehachse liegendes Koordinatensystem, mit der Geschwindigkeit v_{Spike} , die in guter Näherung der Umfangsgeschwindigkeit des Reifens entspricht. Die Fahrbahn weist gegenüber der Rotationsachse des Reifens die Geschwindigkeit v_{Fb} auf, die im Betrag der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs entspricht. Zwischen diesen beiden Geschwindigkeitsvektoren liegt der Winkel β , der auch die Orientierung des Spikes bezüglich der Senkrechten beschreibt. Dieser hängt in erster Linie vom Überstand des Spikes und von der Krümmung des Reifens durch die Abplattung ab. Die vektorielle Differenz dieser zwei Geschwindigkeiten ergibt den Vektor der Differenzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, mit der der Spike auf die Fahrbahn auftrifft:

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_{Spike} - \vec{v}_{Fb}. \quad (3.1)$$

Dabei gilt für den Betrag der Geschwindigkeit des Spikes

$$v_{Spike} = (1 + s)v_{Fzg} = (1 + s)v_{Fb} \quad (3.2)$$

mit der in Gleichung (2.1) genannten Definition des Schlupfes s .

Die Differenzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ muss während des Aufschlagens in kurzer Zeit abgebaut werden. Die dabei auftretenden Stoßkräfte können eine Schädigung der Fahrbahn bzw. ein Eindringen des Spikes ins Eis ermöglichen. Auf die hierbei wirksamen Mechanismen wird in Abschnitt 3.2.2 bzw. 3.3.1 näher eingegangen.

Entscheidende Einflussfaktoren für die Differenzgeschwindigkeit sind neben der Fahrgeschwindigkeit der Schlupf und der Auftreffwinkel β . Die beiden letztgenannten Größen beeinflussen die Differenzgeschwindigkeit in unterschiedlicher Weise. Zur besseren Veranschaulichung sind in Abbildung 3.3 die vertikale und die horizontale Komponente der Differenzgeschwindigkeit für verschiedene Auftreffwinkel über dem Schlupf aufgetragen. Die Differenzgeschwindigkeit wird als relativer Wert, bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit angegeben.

Es zeigt sich, dass die horizontale Komponente der Differenzgeschwindigkeit für eine gegebene Fahrgeschwindigkeit in erster Linie durch den Schlupf beeinflusst wird. Für ein senkrecht Auftreffen des Spikes, d. h. $\beta = 0$, liegt bei verschwindendem Schlupf auch keine horizontale Differenzgeschwindigkeit vor. Für negativen Schlupf bildet sich eine in Fahrtrichtung zeigende Differenzgeschwindigkeit aus, für positiven Schlupf entsprechend eine Differenzgeschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung. Trifft der Spike unter einem Auftreffwinkel β größer Null auf die Fahrbahn, so ergibt sich eine leichte Verschiebung der Beträge der horizontalen Differenzgeschwindigkeit in Fahrtrichtung. Die Abweichung hängt vom Betrag der Spikegeschwindigkeit ab und steigt daher mit zunehmendem Schlupf an.

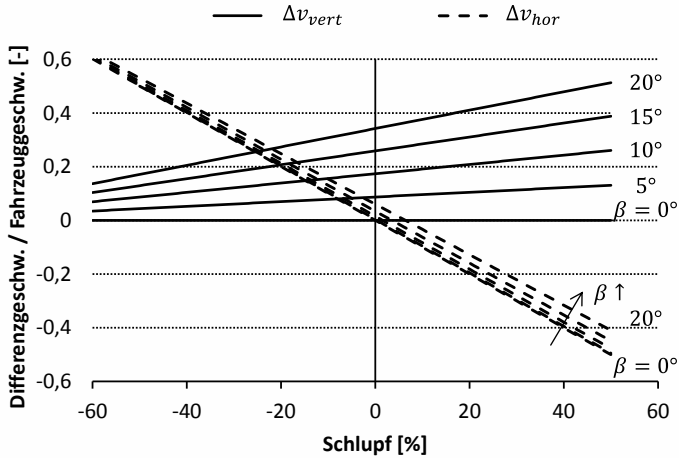


Abbildung 3.3: Vertikaler und horizontaler Anteil der Differenzgeschwindigkeit Δv_{vert} bzw. Δv_{hor} bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit des Schlupfes für verschiedene Auftreffwinkel β

Die vertikale Komponente der Differenzgeschwindigkeit ist Null, solange der Spike senkrecht auf die Fahrbahn auftrifft. Mit zunehmendem Auftreffwinkel steigt die vertikale Aufschlagsgeschwindigkeit an, zunehmender Schlupf und damit zunehmende Spikegeschwindigkeit sorgen ebenfalls für eine Erhöhung.

Beim Auftreffwinkel handelt es sich um eine schwer zu bestimmende Größe. Ist der Krümmungsradius des Reifens im Bereich des Auftreffens bekannt, so kann der Auftreffwinkel für eine als eben angenommene Fahrbahn in erster Näherung über

$$\cos \beta = \frac{R}{R + h_p} \quad (3.3)$$

mit R = Krümmungsradius im Bereich des Auftreffens
 h_p = Spikeüberstand

bestimmt werden (vgl. Abbildung 3.2). Es ist davon auszugehen, dass der Krümmungsradius mit abnehmender Reifengröße und zunehmender Radlast kleiner wird. Darüber hinaus ist auch ein Einfluss der Laufflächen- und der Gürtelsteifigkeit sowie der Beanspruchungssituation des Reifens zu erwarten. Die messtechnische Erfassung eines solchen Krümmungsradius gestaltet sich schwierig, insbesondere in unmittelbarer Nähe zum Reifenlatsch. Ansätze zur mathematischen Beschreibung der Kontur von belasteten Reifen liefert KOUTNY [41], [42].

3.1.3 Vertikalkontakt

Nach dem Aufschlagen läuft der Spike in den Latsch ein (vgl. Abschnitt 3.1.1, Phase 2). Dabei wird er durch die Kontaktkraft F_{Kont} zwischen Spike und Fahrbahn in den Reifen eingedrückt. Diesem Eindringen wirkt eine Kraft aus der elastischen Bettung des Spikes im Reifen entgegen, die im statisch belasteten Fall der Kontaktkraft entspricht. Die sich so ergebenden Kontaktzustände sind in Abbildung 3.4 verdeutlicht, die elastische Rückstellkraft der Spikebettung ist durch eine Feder symbolisiert. Hat der Spike keinen Kontakt zur Fahrbahn (Abbildung 3.4, links) verschwindet die Kontaktkraft, der Spike ragt mit dem Wert des Spikeüberstands h_p über die Profiloberfläche hinaus. Wird der Spike im Latsch über die Radlast vertikal belastet, dringt er zum einen in die Fahrbahn ein, zum anderen wird er ins Reifenprofil eingedrückt (Abbildung 3.4, 2. v.l.). Es ergibt sich eine Kontaktkraft, die bis auf den Wert der Spikekraft ansteigen kann, wenn der Spike auf die Höhe der Profiloberfläche in den Reifen eingedrückt wird (Abbildung 3.4, Mitte, vgl. auch Abbildung 2.3).

Mit der Eindringtiefe h_i in die Fahrbahn (i für engl.: „intrusion“) ergibt sich die Eindrücktiefe h_E in den Reifen mit dem Spikeüberstand für einen senkrecht orientierten, voll im Latsch liegenden Spike¹³ zu

$$h_E = h_p - h_i \quad (3.4)$$

mit h_p = Spikeüberstand.

¹³ Unter dem Latsch wird, wie oben erwähnt, der Kontaktbereich zwischen Profilmgummi des Reifens und Fahrbahn verstanden.

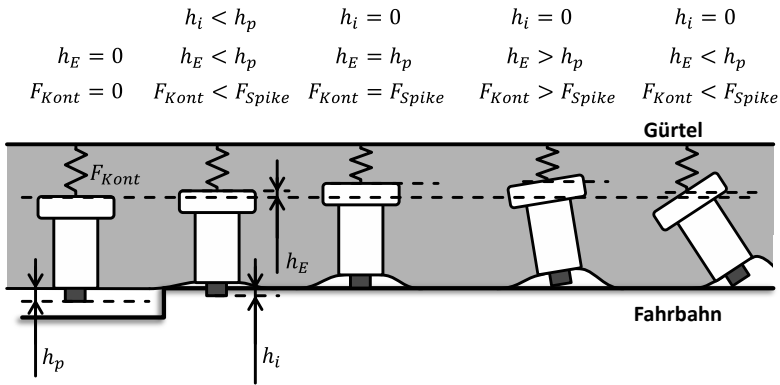


Abbildung 3.4: Abhängigkeit der Eindrücktiefe h_E , der Eindringtiefe h_i und der Kontaktkraft F_{Kont} vom Spikeüberstand h_p bzw. von der Spikekraft F_{Spike} für verschiedene statische Kontaktsituationen zwischen Spike und Fahrbahn

Auch in einem gewissen Bereich vor und hinter dem Latsch kann ein Spike bereits in Kontakt mit der Fahrbahn stehen, Kräfte in vertikaler Richtung abstützen und damit sowohl in die Fahrbahn als auch in den Reifen eingedrückt werden. Der Zusammenhang zwischen Eindrückt- und Eindringtiefe aus Gleichung (3.4) gilt in diesem Fall jedoch nicht, da das den Spike umgebende Gummi nicht voll mit der Fahrbahn in Kontakt steht. Die Eindringtiefe kann einerseits durch die Zerstörung bzw. Verdrängung eines weichen Fahrbahnmaterials durch den Spike zustande kommen (vgl. Eindringen des Spikes in Eis, Abschnitt 3.2.2), andererseits kann der Spike auf einer rauen, harten Fahrbahn auch in einer Vertiefung der Fahrbahntextur zum Liegen kommen. Dieser Fall lässt sich als ein Eindringen des Spikes über die mittlere Rautiefe der Fahrbahntextur hinaus verstehen.

Wie der rechten Seite von Abbildung 3.4 zu entnehmen ist, hängt die Eindrücktiefe zusätzlich vom Verkippwinkel des Spikes ab. Ausgehend von einer glatten, harten Fahrbahn, die kein Eindringen des Spikes zulässt, steigt die Eindrückung beim Verkippen des Spikes über die Kante des Spikepins zunächst an, bis zu einem Winkel, der von der Geometrie des

Spikes abhängt (Abbildung 3.4, 2. v. r.). Bei weiterer Verkipfung reduziert sich die Eindrückung des Spikes (Abbildung 3.4, rechts). Eine solche Verkipfung resultiert zum einen aus einer anfänglichen Auslenkung des Spikes beim Aufschlagen auf die Fahrbahn zu Beginn des Kontakts. Zum anderen wird der Spike, wie bereits in Abschnitt 3.1.1 beschrieben und im folgenden Abschnitt weiter vertieft, durch die Geschwindigkeitsdifferenzen am unter Schlupf rollenden Reifen weiter ausgelenkt.

Unter der Annahme, dass die Kontaktkraft linear mit der Eindrückung ansteigt, kann die statische Kontaktkraft an einem Spike über

$$F_{Kont} = F_{Spike} \frac{h_E}{h_P} \quad (3.5)$$

beschrieben werden. Für einen voll in Latsch liegenden, senkrecht stehenden Spike gilt mit Gleichung (3.4)

$$F_{Kont} = F_{Spike} \left(1 - \frac{h_i}{h_P}\right). \quad (3.6)$$

Der Anteil der Radlast am Spikereifen, die durch den Gummi-Fahrbahn-Kontakt getragen wird, reduziert sich entsprechend um die Summe der Kontaktkräfte an den Spikes, die mit der Fahrbahn in Kontakt stehen.

Da der Spike beim Abrollen eine rasche Belastung erfährt, ist beim Eindrücken durch die dynamischen Materialeigenschaften des Gummis und die Massenträgheit des Spikes und des ihn umgebenden Gummis zudem mit einer Kraftüberhöhung gegenüber der statischen Spikekraft zu rechnen. Messungen von CANTZ zur Kontaktkraft an einem mit Sensorik ausgestatteten Spike zeigen, dass die Kontaktkräfte während des Eindrückens ungefähr doppelt so hoch sind wie während der quasi-statischen Belastung¹⁴ im Reifenlatsch [14]. Durch die Positionierung der Kraftaufnehmer zwischen Spikepin und -körper des Messspikes sind dabei auch Effekte

¹⁴ Durch die Materialdämpfung des Gummis und die Abplattung des Reifens ist die Flächenpressung im Latsch ungleichmäßig verteilt (vgl. z.B. [16]). Dadurch verändert sich auch während des Durchlaufs durch den Latsch die Last auf einen einzelnen Spike in gewissem Maße und weicht je nach Position im Latsch von der mittleren Kontaktkraft ab.

durch die Massenträgheit zumindest teilweise berücksichtigt. Diese *dynamische Spikekraft* ist insbesondere für das Eindringen des Spikes ins Eis an der Einlaufseite des Latschs relevant. Abschnitt 3.2.2 beschäftigt sich im Detail mit dem Eindringen der Spikes in die Eisfahrbahn.

3.1.4 Horizontalkontakt und Schlupfzustände

Rollt ein Reifen unter Schlupf, so ergibt sich im Bereich der Reifenaufstandsfläche eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Reifenkarkasse und Fahrbahn. Diese führt, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, zu einer relativen Verschiebung zweier korrespondierender Punkte auf der Reifenkarkasse bzw. der Fahrbahn, die sich entlang des Latschdurchlaufs aufbaut¹⁵. Der durch diese Verschiebung hervorgerufene Wegunterschied kann durch eine elastische Verformung des Reifenprofils bzw. eine elastische Auslenkung des Spikes ausgeglichen werden, solange im Kontakt die Kräfte übertragen werden können, die für eine solche Auslenkung erforderlich sind. Je höher die Steifigkeit der Profilelemente bzw. der Einbettung der Spikes, umso größer sind die Kräfte, die für eine bestimmte Auslenkung aufgebracht werden müssen. Möglichkeiten für die Kraftübertragung bestehen in der Reibung zwischen Spikegrundfläche bzw. Profilgummi und Fahrbahn, Formschluss zwischen Spike bzw. Profilkanten und der Fahrbahntextur sowie dem Abstützen des eingedrungenen Spikes am Eis. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts steht die kinematische Beschreibung der verschiedenen Schlupfzustände im Vordergrund, die Mechanismen zur Kraftübertragung werden in Abschnitt 3.2 näher beleuchtet.

Mit zunehmender Auslenkung werden die benötigten Kräfte größer, bis schließlich das Kraftübertragungsmaximum im Kontakt erreicht wird. Ab diesem Punkt im Latsch, der durch die Koordinate x_{gleit} beschrieben wird, stellt sich eine Gleitbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn ein, die den Ausgleich der Wegdifferenzen ermöglicht. Auch nach Beginn des

¹⁵ Schubspannungen und die daraus resultierenden Verschiebungen der Profilelemente, die sich durch die Abplattung des Reifens ergeben, werden hier und im Folgenden in Anlehnung an beispielsweise [93] nicht berücksichtigt. Für weitere Informationen zu den Auswirkungen derartiger Verschiebungen wird auf [21] verwiesen.

Gleitens bleibt eine Auslenkung der Spikes bzw. des Profilgummis bestehen, hervorgerufen durch die Kräfte, die im Gleitkontakt übertragen werden.

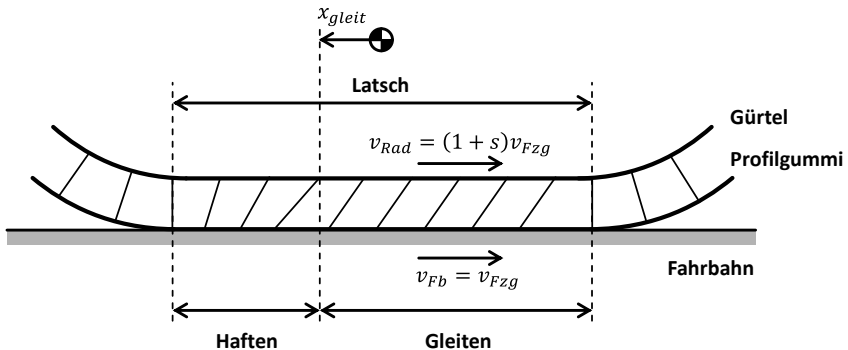


Abbildung 3.5: Verformung des Reifenprofils im Latsch unter Schlupf am angetriebenen Rad, die Betrachtung erfolgt für ein in der Reifendrehachse liegendes Bezugssystem

Nach KUMMER und MEYER lassen sich so zwei Komponenten des Schlupfes unterscheiden, die den Wegausgleich über elastische Deformation oder Gleiten ermöglichen: der Deformations- und der Gleitschlupf [44]. Abbildung 3.6 zeigt die Aufteilung der gesamten Schlupfgeschwindigkeit am Rad in Deformations- und Gleitschlupfgeschwindigkeit. Zunächst ist zu erkennen, dass für kleine Schlupfwerte der Schlupf annähernd komplett durch elastische Verformung realisiert werden kann. Erst für größere Schlupfwerte beginnt signifikantes Gleiten im Latsch. Dabei zeigt sich für Bremsen und Antreiben ein unterschiedliches Verhalten, was durch die unterschiedlichen kinematischen Bedingungen erklärt werden kann. Am gebremsten Rad ist bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit die Winkelgeschwindigkeit des Rades kleiner, beim angetriebenen Rad größer als am frei rollenden Rad. Damit ergibt sich für ein einzelnes Profilelement am gebremsten Rad mit zunehmendem Schlupf eine längere Kontaktzeit, was dazu führt, dass die Haftgrenze an einem weiter vorne im Latsch liegenden Punkt erreicht wird und der Anteil des Deformationsschlupfs abnimmt. Den Extremfall stellt das blockierte Rad dar, bei dem sich stets die

gleichen Profilelemente im Kontakt befinden und im gesamten Latsch Gleiten vorliegt. Für das angetriebene Rad ergibt sich entsprechend eine Verkürzung der Kontaktzeit mit zunehmendem Schlupf. Obwohl die übertragbaren Kräfte weiterhin durch die Haftgrenze begrenzt sind, nimmt somit die Deformationsschlupfgeschwindigkeit für höhere Schlupfwerte zu. Beim Antreiben kann also stets ein gewisser Anteil des Schlupfes über Deformationsschlupf aufgebracht werden.

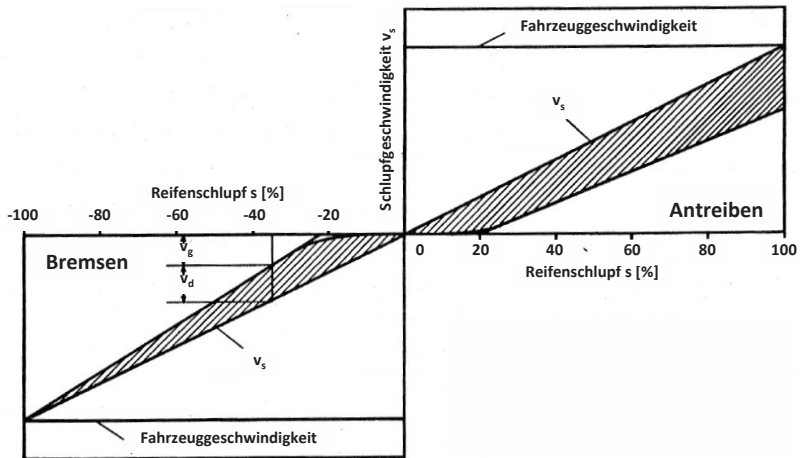


Abbildung 3.6: Aufteilung der Umfangsschlupfgeschwindigkeit v_s in Gleitschlupfgeschwindigkeit v_g und Deformationsschlupfgeschwindigkeit v_d ([22], Legende gekürzt, Beschriftung erneuert zur besseren Lesbarkeit)

Auch für die Kraftübertragung der Spikes ergeben sich hieraus Konsequenzen. Am gebremsten Rad befindet sich ein Spike verhältnismäßig lange im Eingriff und kratzt dabei so lange durch unberührtes Eis, bis ein nachfolgender Spike in Kontakt kommt, der in derselben Spur auf dem Reifenumfang angeordnet ist (vgl. Abbildung 2.2). Wann dies der Fall ist, hängt vom Abstand zwischen zwei Spikes in Umfangsrichtung und vom Schlupf ab: je geringer der Schlupf, umso geringer muss der Abstand zwischen zwei Spikes werden, damit eine gegenseitige Beeinflussung möglich ist. Ist der Abstand zweier Spikes in einer Spur größer als die Länge

der Reifenaufstandsfläche, so kratzt jeder Spike auch am blockiergebremsten Rad über seine gesamte Kontaktdauer hinweg durch unberührtes Eis. Am angetriebenen Rad hingegen besteht die Möglichkeit, dass durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit ein Spike auf die Kratzspur eines vorhergehenden Spikes in derselben Spur „aufläuft“. Deutlich wird dies am Extremfall eines durchdrehenden Rades am stehenden Fahrzeug: Hier kann nur der erste Spike durch frisches Eis kratzen. Jeder nachfolgende Spike trifft auf Eis, das bereits durch vorhergehende Spikekontakte vorgeschädigt ist.

Ein weiterer Unterschied besteht, wie in Abbildung 3.7 verdeutlicht, in der Richtung der Auslenkung der Spikes bzw. des Kontaktpunkts zwischen Spike und Fahrbahn relativ zum Reifen. Während dieser Punkt beim Bremsen entgegen der Fahrtrichtung ausgelenkt wird, geschieht die Auslenkung beim Antreiben in Fahrtrichtung. Daraus ergibt sich jeweils eine Verkipfung des Spikes in der entsprechenden Richtung.

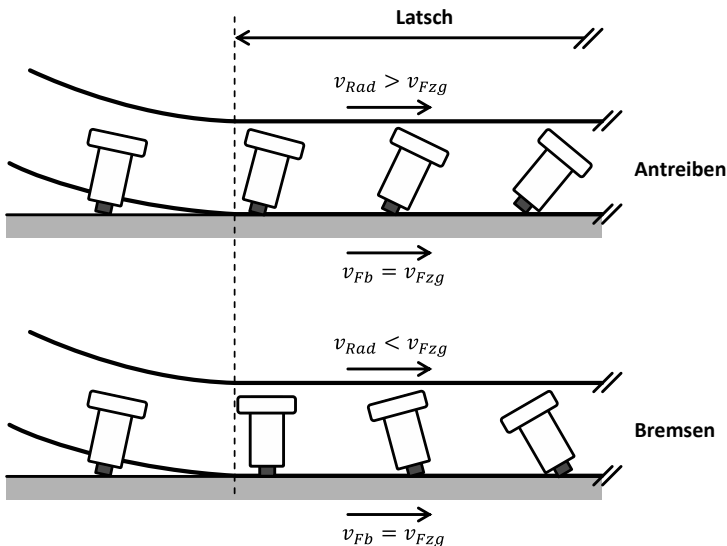


Abbildung 3.7: Auslenkung des Spikes über die Latschlänge an der Einlaufseite des Latschs für Antriebs- und Bremsschlupf

Beachtet man, dass der Spike durch das Auftreffen vor dem Latsch mit einer gewissen Anfangsauslenkung bzw. -verkipfung in Fahrtrichtung in den Kontakt einläuft, so wird deutlich, dass am angetriebenen Rad diese anfängliche Auslenkung über den Kontakt hinweg verstärkt wird. Am gebremsten Rad hingegen wird die Anfangsauslenkung abgebaut, der Spike wird aufgerichtet und anschließend in die entgegengesetzte Richtung verkippt. Durch dieses Kippen über die senkrechte Lage hinweg kann es, wie in Abschnitt 3.1.3 ausgeführt, zu einer Überhöhung der Kontaktkraft zwischen Spike und Fahrbahn kommen (vgl. Abbildung 3.4).

3.2 Mechanismen der Kraftübertragung auf Eis

Ein wichtiger Anteil der Kraftübertragung eines Spikereifens auf Eis wird durch die Spikes realisiert. Dazu müssen diese zunächst in die Eisdecke auf der Fahrbahn eindringen, um dann in einem zweiten Schritt sich in Längsrichtung am Eis abstützen zu können. Für das Eindringen der Spikes ins Eis ist eine Belastung in vertikaler Richtung erforderlich, die eigentliche Horizontalkraftübertragung an den Spikes geschieht durch eine Belastung des Eises über den eingedrungenen Spike in horizontaler Richtung. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Komponenten der Kraftübertragung eines Spikereifens diskutiert. Anschließend werden die für das Eindringen der Spikes und für die Kraftübertragung am Spike relevanten Mechanismen eingehend beleuchtet.

3.2.1 Komponenten der Kraftübertragung am Spikereifen

An einem Spikereifen werden Kräfte in horizontaler Richtung¹⁶ sowohl durch den Kontakt zwischen Spike und Eis als auch durch den Gummi-Eis-Kontakt übertragen. Allgemein ergibt sich die horizontale Kraft F_{hor} am Reifen als Summe der über das Profilmgummi und der über die Spikes übertragenen Kräfte gemäß

¹⁶ Unter der horizontalen Kraftübertragung wird allgemein die Kraftübertragung in einer in der Fahrbahnebene liegenden Richtung verstanden. Die grundlegenden Mechanismen sind für Umfangs- und Seitenkraftübertragung sowie kombinierte Kraftübertragung vergleichbar, die Erläuterung erfolgt wiederum am Beispiel der Umfangskraftübertragung.

$$F_{hor} = F_{hor,Gummi} + \sum_i F_{hor,Spike,i} \quad (3.7)$$

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Gummi-Eis-Reibung auf denselben Mechanismen beruht wie die Kraftübertragung zwischen einem unbespikten Winterreifen und einer Eisfahrbahn. Bekanntermaßen können die Reibkräfte hier über einen Reibwert als proportional zur wirkenden Normalkraft beschrieben werden, wobei der Reibwert von den Betriebs- und Umgebungsbedingungen wie Flächenpressung im Kontakt, der Schlupf- bzw. Gleitgeschwindigkeit und der Temperatur beeinflusst wird. Zu beachten ist, dass am Spikereifen die über das Gummi abgestützte Normalkraft durch die Kontaktkräfte zwischen Spike und Fahrbahn reduziert wird und somit geringer ist als die den Reifen belastende Radlast F_z . Die zwischen Gummi und Eis übertragene Kraft $F_{hor,Gummi}$ ergibt sich folglich zu

$$F_{hor,Gummi} = \mu_{Gummi} \left(F_z - \sum_i F_{Kont,i} \right) \quad (3.8)$$

mit $F_{Kont,i}$ = Kontaktkraft am jeweiligen Spike
 μ_{Gummi} = Reibwert zwischen Gummi und Eis.

An den einzelnen mehr oder weniger tief ins Eis eingedrungenen Spikes ergeben sich Kräfte in horizontaler Richtung $F_{hor,Spike}$ durch die Wechselwirkung zwischen Spike und Eis. Dabei sind sowohl Kräfte durch Reibung zwischen Spike und Eis in der Aufstandsfläche als auch Kräfte durch das Abstützen des eingedrungenen Spikes am Eis in horizontaler Richtung bzw. das Kratzen des Spikes durch das Eis denkbar und es gilt

$$F_{hor,Spike} = F_{Spike,reib} + F_{Spike,kratz} \quad (3.9)$$

Während die Reibkraft am Spike in erster Näherung proportional zur vertikalen Kontaktkraft zwischen Spike und Eis angenommen werden kann, so ist die Kraft durch das Abstützen in horizontaler Richtung von anderen Parametern wie der Eindringtiefe und der Eisfestigkeit abhängig, nicht jedoch von der Kontaktkraft.

Mit den Zusammenhängen aus den Gleichungen (3.8) und (3.9) sowie der Definition des Traganteils der Spikes gemäß

$$p_{Spike} = \frac{\sum_i F_{Kont,i}}{F_z} \quad (3.10)$$

lässt sich Gleichung (3.7) zu

$$F_{hor} = \mu_{Gummi} F_z (1 - p_{Spike}) + \mu_{Spike} F_z p_{Spike} + \sum_i F_{Spike,kratz,i} \quad (3.11)$$

mit μ_{Spike} = Reibwert zwischen Spikepinmaterial und Eis
 $F_{Spike,kratz,i}$ = Kraft durch das Abstützen bzw. Kratzen des jeweiligen Spikes im Eis

konkretisieren. Zu beachten ist, dass über den Traganteil der Spikes p_{Spike} die tatsächlichen Kontaktkräfte zwischen Spike und Fahrbahn im eingedrungenen Zustand in die Berechnung eingehen. Diese unterscheiden sich von der Spikekraft F_{Spike} gemäß der Definition in Abschnitt 2.1.1, die die Kontaktkraft für einen nicht eingedrungenen und somit voll in den Reifen eingedrückten Spike darstellt.

Ansätze zur Modellierung der Gummi-Eis-Reibung wurden bereits im Stand der Forschung (vgl. Abschnitt 1.2) und Abschnitt 2.3.2 vorgestellt und sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft werden, da im weiteren Verlauf die Beschreibung der Kraftübertragung an den Spikes im Vordergrund steht.

3.2.2 Eindringen der Spikes ins Eis

Das Eindringen der Spikes in die Eisoberfläche setzt eine Belastung des Eises in vertikaler Richtung voraus. Diese Belastung führt zu einem lokalen Versagen des Eises, sodass sich eine Vertiefung bildet, in die der Spike eintauchen kann. Eine solche Beanspruchung des Eises kann zum einen durch das Aufschlagen des Spikes auf das Eis zu Beginn des Kontakts ent-

stehen, zum anderen durch die Belastung des Spikes während des Durchlaufs durch den Latsch.

Eindringen durch Aufschlagen

Wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert, muss beim Aufschlagen des Spikes eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Spike und Fahrbahn in kurzer Zeit abgebaut werden. Dabei wird kinetische Energie umgewandelt, woraus eine Schädigung der Eisfahrbahn resultiert. Für die Energie, die zur Schädigung des Eises führt, gilt

$$E_{dam} = E_{kin,\Delta} = \frac{1}{2} m_{Spike} \Delta v^2 \quad (3.12)$$

mit	E_{dam}	=	Schädigungsenergie
	$E_{kin,\Delta}$	=	Kinetische Energie aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Spike und Fahrbahn
	m_{Spike}	=	Spikemasse
	Δv	=	Differenzgeschwindigkeit gemäß Gleichung (3.1).

Ausgehend von dieser Formulierung ist ein linearer Einfluss der Spikemasse sowie ein quadratischer Einfluss der Spikegeschwindigkeit zu erwarten. Es wird angenommen, dass die Schädigung der Fahrbahn proportional zur Schädigungsenergie ist.

Bestehende Forschungsergebnisse zu Aufschlagvorgängen auf und mit Eis sowie der damit verbundenen Kraterbildung stammen zum größten Teil aus dem Bereich der Astronomie, wo Einschläge auf eishaltige Himmelskörper untersucht bzw. modelliert werden sollen [12], [20], [39], [45], [88]. Die verwendeten Projektile reichen dabei von staubähnlichen Körpern mit Massen in der Größenordnung von 10^{-14} .. 10^{-10} g [20] bis hin zu größeren Projektilen mit einer Masse von 8 g [45]. Die untersuchten Aufschlagsgeschwindigkeiten bewegen sich in einem Bereich zwischen 62 m/s [39] und 50 km/s [20], liegen also deutlich über den am Spikerei-

fen zu erwartenden Geschwindigkeiten¹⁷. Arbeiten, die das Aufschlagen auf Eis unter Bedingungen untersuchen, die den am Spikereifen zu erwartenden entsprechen, sind dem Autor nicht bekannt. Am nächsten zu den Bedingungen am Spikereifen liegen die Versuchsbedingungen von KATO ET AL., die unter anderem das Aufschlagen von Aluminiumzylindern mit einer Masse von 5g und Geschwindigkeiten von 62 m/s und höher auf Eis untersuchten[39].

Gegenstand der Untersuchung sind in den oben genannten Forschungsarbeiten meist das Volumen bzw. Tiefe und Durchmesser des Einschlagskraters in Abhängigkeit der kinetischen Energie des Projektils. Zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs werden Potenzansätze der Form

$$V = a E_{kin}^b \tag{3.13}$$

mit	V	=	Kratervolumen
	E_{kin}	=	Kinetische Energie des Projektils
	a, b	=	Regressionsparameter

verwendet. SHRINE ET AL. führen in [88] entsprechende Regressionskurven für die Ergebnisse aus verschiedenen Studien an. Die Exponenten für den Zusammenhang zwischen Kratervolumen und kinetischer Energie liegen in einem Bereich zwischen 0,93 und 1,27, es liegt also in erster Näherung ein linearer Zusammenhang vor, entsprechend einem Exponenten von 1. Diese Erkenntnis unterstützt die oben getroffene Annahme, dass die abgebaute kinetische Energie des Spikes ein Maß für die Aufschlagsschädigung ist. Weiterhin wird im Rahmen der genannten Arbeit der Einfluss der Aufschlagsgeschwindigkeit auf das Kratervolumen für Projektil gleicher Masse untersucht. In einem zu Gleichung (3.13) vergleichbaren Potenzansatz bestimmen die Autoren den Exponenten für die Aufschlagsgeschwindigkeit zu $2,4 \pm 0,3$. Ein quadratischer Zusammenhang zwischen

¹⁷ Wie Abbildung 3.3 zu entnehmen, liegen die Differenzgeschwindigkeiten zwischen Spike und Fahrbahn bei üblichen Fahrzuständen mit maximal einigen zehn Prozent Schlupf bei einem Bruchteil der Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese sollte bei Benutzung von Spikereifen den Wert von 100 km/h entsprechend ca. 28 m/s nicht überschreiten.

Schädigung und kinetischer Energie, wie oben postuliert, erscheint also ebenfalls plausibel.

Eindringen durch vertikale Belastung im Reifenlatsch

Beim Einlauf des Spikes in den Reifenlatsch wird der Spike in den Reifen eingedrückt und es baut sich eine Kraft zwischen Spike und Fahrbahn in vertikaler Richtung auf. Diese wirkt, wie in Abbildung 3.8 dargestellt, auf die Eisoberfläche und erzeugt dort in Abhängigkeit der Kontaktfläche eine Druckspannung. Für die Spannung gilt

$$\sigma_D = \frac{F_{Kont}}{A} = \frac{F_{Kont}}{b_{Spike} l_{Spike}} \quad (3.14)$$

mit

F_{Kont}	=	Kontaktkraft zwischen Spike und Fahrbahn
A	=	Spikeaufstandsfläche
b_{Spike}	=	Breite des Spikepins (quer zur Fahrtrichtung)
l_{Spike}	=	Länge des Spikepins (in Fahrtrichtung).

Entscheidende Faktoren für die Kontaktspannung sind also die Kontaktfläche und -kraft zwischen Spike und Fahrbahn, wobei letztere durch die dynamische Spikekraft beschränkt ist. Diese liegt an, wenn der Spike mit realistischer Geschwindigkeit bis auf die Höhe der Profiloberfläche eingedrückt wird (vgl. Abschnitte 2.1.1 und 3.1.3).

Unter der Annahme einer ebenen Aufstandsfläche des Spikes auf der Fahrbahn sowie einer dynamischen Überhöhung der Spikekraft um den Faktor 2 gegenüber dem statischen Wert [14] (vgl. Abschnitt 3.1.3) ergibt sich nach Einsetzen typischer Abmessungen für einen Spikepin die maximal zu erwartende Spannung zu

$$\sigma_{D,max} = \frac{2 F_{Spike}}{b_{Spike} l_{Spike}} = \frac{2 \cdot 120 \text{ N}}{4 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm}} = 30 \text{ MPa} \quad (3.15)$$

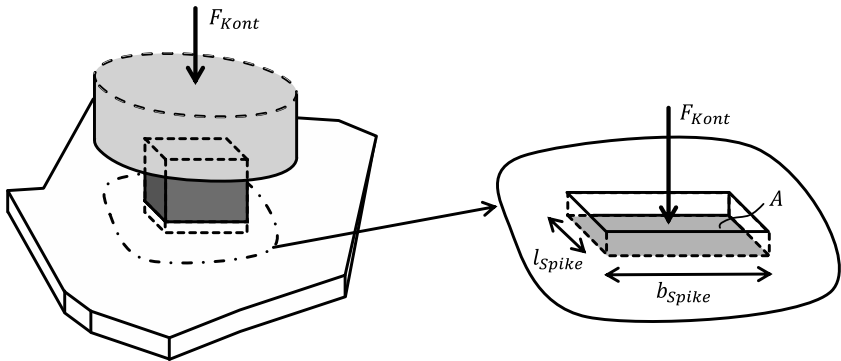


Abbildung 3.8: Eindringen des Spikepins in die Eisoberfläche unter vertikaler Belastung mit der Kraft F_{Kont}

Überschreitet dieser Wert die Druckfestigkeit des Eises, so versagt das Eis unter dem Spike und der Spike kann in die Eisschicht eindringen. Dabei verringert sich die Eindrückung des Spikes in den Reifen, die Kontaktkraft und somit die Kontaktspannungen nach Gleichung (3.14) nehmen ab, bis ein Gleichgewicht zwischen Kontaktdruck und Druckfestigkeit des Eises erreicht ist.

Die Druckfestigkeit von Eis ist eine Thematik, die beispielsweise für die Interaktion mit Bohrseln oder Schiffen in polaren Regionen von großer technischer Bedeutung ist. Zur Untersuchung des Versagens von Eis unter Druckbelastung werden meist zylindrische oder quaderförmige Eisprobenkörper unter homogener Belastung verwendet [19], [70], [86], [102]. Das Versagen dieser Proben stellt sich je nach Einspannung der Probe durch ein axiales Aufspalten der Probe oder durch Scherversagen ein [102].

Die ermittelten Werte für die Druckfestigkeit hängen stark von den Beanspruchungsbedingungen ab und unterliegen vor allem im Bereich des spröden Versagens bei hohen Dehnraten großen Streuungen. So sind Streubreiten für die Festigkeitswerte, die 30 % des Mittelwerts überschreiten keine Seltenheit (siehe z.B. [38], [83]). Allgemein ist davon auszugehen, dass die Versagensspannung von Eis mit der Dehnraten und so-

mit der Belastungsgeschwindigkeit ansteigt [38], [83], [86]. Eine Absenkung der Temperatur führt ebenso zu einer Erhöhung der Versagensgrenze (s. [19], [86]) wie die Aufprägung einer hydrostatischen Spannung, d.h. einer Vorspannung mit gleichem Druck in allen drei Raumrichtungen [70]. In einem für sprödes Verhalten moderaten Bereich für die Dehnrates von 10 s^{-1} kann von einer Versagensspannung in der Größenordnung von 10 MPa ausgegangen werden [19], [38]. Vergleicht man diesen Wert mit der am Spike maximal zu erwartenden Spannung in Gleichung (3.15), so lässt sich erkennen, dass zumindest ein teilweises Eindringen des Spikes über das Druckversagen des Eises plausibel ist.

Gegenüber den oben genannten Versuchen zur Bestimmung der Materialeigenschaften, bei denen eine definierte Eisprobe mit einem ebenso definierten Spannungszustand beaufschlagt wird, fällt die Beanspruchung des Eises im Kontakt mit dem Spike jedoch deutlich komplexer aus. Durch den Druck des Spikepins auf eine verhältnismäßig große Eisfläche ergibt sich eine punktuelle Belastung an Stelle einer gleichförmigen Belastung des Eises. Dies sorgt dafür, dass der belastete Bereich durch das umliegende Eis gestützt wird, was einer Einspannung des belasteten Eisvolumens nahe kommt. Die so quer zur Belastungsrichtung aufgeprägte Spannung kann jedoch nicht analytisch bestimmt werden. Auch die im belasteten Bereich des Eises auftretenden Dehnraten können kaum abgeschätzt werden, da die effektive Dicke der Eisschicht, die durch die Belastung des Spikes beeinträchtigt wird, nicht bekannt ist.

Soll das Verhalten des Eises unter einer solchen punktuellen Belastung bestimmt werden, bietet sich eine experimentelle Untersuchung mit einer möglichst realitätsnahen Versuchsanordnung an. BARRETTE ET AL. beobachteten das Verhalten von Eis, auf das ein kreisförmiger Stempel mit kalottenförmiger Kontaktfläche gedrückt wird [9]. Das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit liegt auf der Beobachtung der Versagensbilder. Die Autoren beschreiben, dass aus dem Kontakt feinkörniges, pulverisiertes Eis ausgestoßen wird. Ähnliches lässt sich auch am Kontakt eines Spikereifens beobachten. Abbildung 3.9 zeigt die Eindrückmarken, die die Spikes in der Aufstandsfläche eines stehend abgesetzten Reifens hinterlassen haben.



Abbildung 3.9: Eindrückmarken der Spikes nach Absetzen eines stehenden Spikereifens auf Radlast

In [104] untersuchen WELLS ET AL. die Kontaktdrücke in einem ähnlichen Versuchsaufbau. Aus den in der Arbeit aufgelisteten Messergebnissen ergeben sich für die über die Stempelfläche gemittelten Maximaldrücke Werte zwischen 15 und 60 MPa. Die in Gleichung (3.15) abgeschätzte maximale Kontaktspannung zwischen Spike und Eis liegt ebenfalls in diesem Bereich.

Neben der experimentellen Untersuchung ist auch eine Modellierung des Problems mit Finiten Elementen denkbar. Die Herausforderung besteht hier unter anderem in der Definition eines geeigneten Materialmodells. Ansätze zur Beschreibung des Versagensverhaltens spröder Materialien liefert beispielsweise KOLARI [40].

3.2.3 Horizontale Kraftübertragung am Spike

Am schlupfenden Reifen ergibt sich, wie in Abschnitt 3.1.4 erläutert, eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Reifen bzw. Spikes und Fahrbahn. Diese wird durch ein Verkippen bzw. eine Verschiebung der Spikes relativ zur Reifenkarkasse ausgeglichen. Die hierfür benötigten horizontalen Kräfte müssen über das Eis abgestützt werden. Überschreiten diese Kräfte die Festigkeit des Eises, so versagt dieses und der Spike kratzt durch das Eis.

Betrachtet man die Beanspruchungssituation des Eises vor dem eingedrungenen Spikepin genauer, so kann die Zerspannung des Eises als das

Abscheren eines keilförmigen Eisvolumens angenähert werden (Fall I), wie in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Scherkräfte ergeben sich dabei an der Grundfläche A_G des Keils sowie den Seitenflächen A_S . Für die Größe der Flächen gilt

$$A_{G,I} = b_{\text{Spike}} h_i \frac{1}{\sin \psi} \quad (3.16)$$

$$A_{S,I} = \frac{1}{2} h_i^2 \frac{1}{\tan \psi} \quad (3.17)$$

und somit ergibt sich die Widerstandskraft zu

$$\begin{aligned} F_{\text{Spike,kratz,I}} &= A_{G,I} \frac{\tau_m}{\cos \psi} + 2 A_{S,I} \tau_m \\ &= \frac{\tau_m h_i}{\cos \psi \sin \psi} (b_{\text{Spike}} + h_i \cos^2 \psi) \end{aligned} \quad (3.18)$$

- mit
- τ_m = Scherfestigkeit des Eises
 - h_i = Eindringtiefe des Spikes
 - b_{Spike} = Breite des Spikepins (quer zur Fahrtrichtung)

Der Winkel des Keils ψ ist dabei von der Versagensrichtung des Eises abhängig. Es lässt sich erkennen, dass die Kräfte, die der Kratzbewegung des Spikes entgegenwirken, neben der Scherfestigkeit des Eises durch die Breite des Spikepins und die Eindringtiefe ins Eis bestimmt werden.

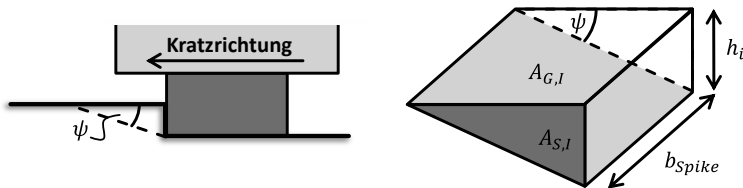


Abbildung 3.10: Abscheren des Eises vor dem Spike (links) und Geometrie des abgesicherten Eiskeils (rechts) für Fall I

In Versuchen lässt sich zudem ein Auffächern der Kratzspur quer zur Kratzrichtung beobachten. Die zusätzlichen Kräfte, die hierdurch entstehen, lassen sich durch eine Modifikation der Keilform gemäß Abbildung 3.11 berücksichtigen (Fall II). Die Flächen dieser modifizierten Keilform ergeben sich zu

$$A_{G,II} = \left(b_{Spike} + h_i \frac{\tan \varphi}{\tan \psi} \right) \frac{h_i}{\sin \psi} \quad (3.19)$$

$$A_{S,II} = \frac{1}{2} h_i^2 \frac{1}{\cos \varphi \tan \psi} \quad (3.20)$$

und die Widerstandskraft kann über

$$\begin{aligned} F_{Spike,kratz,II} &= A_{G,II} \frac{\tau_m}{\cos \psi} + 2 A_{S,II} \frac{\tau_m}{\cos \varphi} \\ &= \frac{h_i \tau_m}{\sin \psi \cos \psi} \left(b_{Spike} + h_i \frac{\tan \varphi}{\tan \psi} \right. \\ &\quad \left. + h_i \frac{\cos^2 \psi}{\cos^2 \varphi} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

mit φ = Winkel der Auffächerung

berechnet werden. Gegenüber dem oben dargestellten Fall ergibt sich der Winkel der Auffächerung φ als weiterer Parameter. Es ist zu vermuten, dass dessen Werte sowohl von den Materialeigenschaften des Eises als auch durch die Belastungssituation beeinflusst werden. SODHI beschreibt in [90] Eindringversuche in Kanten von Eisschollen durch einen senkrecht zur Scholle stehenden Pfeiler und beobachtete einen deutlich geringere Auffächerung der Schädigung bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten.

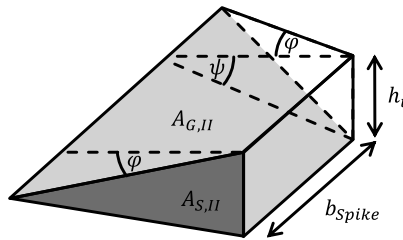


Abbildung 3.11: Geometrie des abgescherten Eiskeils bei seitlichem Auffächern der Risse (Fall II)

Ein entscheidender Faktor für die Kräfte am Spike ist, wie den Gleichungen (3.18) und (3.21) zu entnehmen, die Scherfestigkeit des Eises. Diese ist, wie bereits in Abschnitt 3.2.2 für die Druckfestigkeit ausgeführt, in großem Maße von den Umgebungs- und Beanspruchungsbedingungen abhängig. FISH und ZARETSKY beschreiben in [23] ein Modell für die Scherfestigkeit von Eis in Abhängigkeit der Temperatur und des Einspanndrucks. Für Temperaturen zwischen -1 und -16 °C ergeben sich für geringe Einspanndrücke Scherfestigkeiten in einem Bereich von 5 bis 10 MPa.

Für den Fall des kratzenden Spikes liegt zudem wiederum eine sehr komplexe Beanspruchungssituation für das Eis vor, sodass auch hier eine Modellierung des Lastfalls oder eine möglichst anwendungsnahe experimentelle Abbildung der Beanspruchung zielführend erscheint. LIEU und MOTE untersuchten in [48] die Zerspänkräfte von Eis unter negativem Schnittwinkel. Dieser Anwendungsfall kommt, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, der Beanspruchungssituation am Spike, der mit einer gewissen Verkipfung durch das Eis gezogen wird, sehr nahe. Der hauptsächliche Unterschied besteht in der Schnittbreite der Versuchsanordnung, die in der genannten Arbeit mit 38 bzw. 50 mm deutlich über der typischen Breite eines Spikes liegt. Auch die Schnittwinkel nehmen mit -15° bis -60° betragsmäßig deutlich größere Werte an, als für das Verkippen der Spikes zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der Veröffentlichung bestätigen den oben abgeleiteten Einfluss der Eindringtiefe: Mit zunehmender Eindringtiefe steigen die Schnittkräfte in den relevanten Belastungsfällen annähernd linear an. Zu-

dem ist zu erkennen, dass mit betragsmäßig größerem Schnittwinkel, entsprechend einem größeren Kippwinkel des Spikes, die Schnittkräfte bei gleicher Schnitttiefe deutlich zunehmen. Daraus lässt sich jedoch nicht folgern, dass an einem stark verkippten Spike in jedem Fall höhere Kräfte erzielt werden können. Wie in Abschnitt 3.1.3 gezeigt, sinkt mit stärkerem Verkippen des Spikes die Kontaktkraft ab. Dadurch wird das Eindringen des Spikes erschwert und es sind geringere Eindringtiefen zu erwarten, was tendenziell zu einer Reduktion der Schnittkräfte führt.

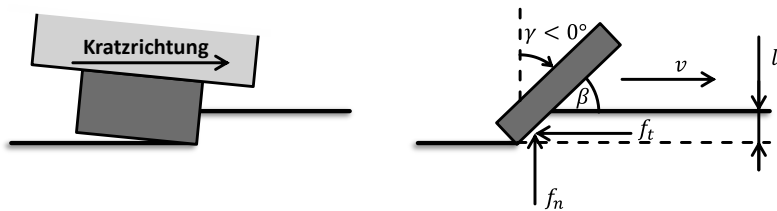


Abbildung 3.12: Beanspruchungssituation des Eises am kratzenden verkippten Spike (links) und Versuchsanordnung von LIEU und MOTE mit den tangentialen und normalen Schnittkräften f_t und f_n , der Schnitttiefe l , der Schnittgeschwindigkeit v und dem Neigungswinkel β bzw. dem Schnittwinkel γ (rechts, nach [48] mit Anpassungen)

3.2.4 Einfluss der Mechanismen auf die Spikereifencharakteristik

Anhand der Mechanismen, die in den vorigen Abschnitten beschrieben wurden, lässt sich die Form der Umfangskraft-Schlupf-Kennlinie eines Spikereifens und die Unterschiede zur Kennlinie eines unbespikten Reifens genauer erklären.

Abbildung 3.13 zeigt die bereits in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten typischen Kennlinien für einen Spikereifen und einen unbespikten Reifen. Die Kurve des Spikereifens kann nun in drei Bereiche, den linearen Bereich, einen Übergangsbereich und den Bereich des Gleitens unterteilt werden. Im linearen Bereich liegt in großen Teilen des Latschs Haften vor. Die Spikes

des Spikereifens sind teilweise ins Eis eingedrungen, das Profilgummi des Spikereifens ist dementsprechend gegenüber dem des unbespikten Reifens teilweise entlastet. Solange die Profilelemente und Spikes auf der Fahrbahn haften, sorgt der Schlupf jedoch nur für eine gleichmäßige Auslenkung des Gummis und der Spikes vergleichbar zum Profilgummi am unbespikten Reifen. Der etwas flachere Anstieg der Kurve für den Spikereifen deutet darauf hin, dass die verringerte Längssteifigkeit des Profils durch die Entlastung des Reifengummis nicht vollständig durch die zusätzliche Längssteifigkeit der Spikes in ihrer Bettung kompensiert werden kann.

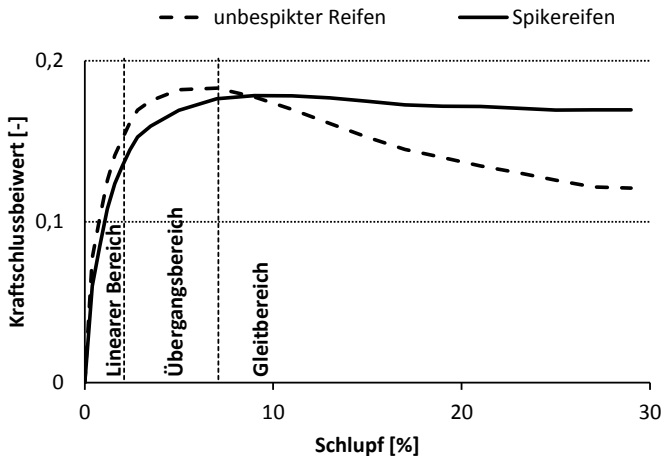


Abbildung 3.13: Typische Bereiche in der Umfangskraftcharakteristik eines Spikereifens (Kennlinien aus eigener Messung)

Im Übergangsbereich setzt vermehrt Gleiten im Latsch ein. Dabei macht sich bemerkbar, dass am Spikereifen der Gummi-Eis-Kontakt gegenüber dem unbespikten Reifen reduziert ist. Die Profilelemente beginnen bereits bei geringerem Schlupf zu gleiten, da durch die verringerten Kontaktkräfte die Haftgrenze früher erreicht wird. Die Spikes können sich zwar am Eis abstützen, allerdings müssen sich zunächst durch eine Auslenkung der Spikes zum umgebenden Profilgummi Kräfte aufbauen, was zusätzlichen Schlupf erfordert. Dies führt dazu, dass die Kennlinie des

Spikereifens früher abknickt als die des unbespikten Reifens, dann aber kontinuierlich weiter ansteigt.

Im Gleitbereich schließlich liegt an großen Teilen des Profils Gleiten vor. Die Profilelemente gleiten über die Eisfahrbahn, die Spikes kratzen durch das Eis. Während die Reibkräfte zwischen Gummi und Eis beim Gleiten durch das Aufschmelzen des Eises abfallen, können die Spikes sich weiterhin am Eis abstützen. Dies erklärt das konstante Reibwertniveau am Spikereifen im Vergleich zu den abfallenden Reibwerten am unbespikten Reifen. In manchen Versuchen ist für den Spikereifen auch ein weiteres Ansteigen der Reibwerte für hohen Schlupf zu beobachten. Die Ursache hierfür kann darin vermutet werden, dass das Kratzen der Spikes im Eis ein weiteres Eindringen der Spikes ins Eis begünstigt. Somit können mit der Kratzlänge der Spikes bei hohem Schlupf die Eindringtiefe und somit auch die übertragbaren Kräfte zunehmen.

3.3 Mechanismen des Fahrbahnverschleißes

Werden Spikereifen auf unbedeckten Fahrbahnen verwendet, verursachen sie dabei einen Verschleiß der Fahrbahn. Im Straßenbau übliche Asphaltfahrbahnen bestehen aus Gesteinsbruch, die einzelnen Steine werden durch eine Matrix aus Bitumen als Bindemittel zusammengehalten [77]. Nach Untersuchungen von LUNDY ET AL. treten hier verschiedene grundsätzliche Formen des Verschleißes auf ([51], zitiert in [3]): Zum einen wird die Matrix durch die Spikes weggekratzt und so die Steine im Asphalt freigelegt, zum anderen werden die freigelegten Steine durch das Kratzen der Spikes verschlissen bzw. durch Aufschlagen zerstört. Unter Umständen kann auch ein kompletter Stein aus der Matrix herausgerissen werden. Nach den LUNDY ET AL. ist dies nur für sehr weiche Beschaffenheit der Matrix zu erwarten. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf die Beschreibung der Schädigung des in der Fahrbahn enthaltenen Gesteinmaterials. Dabei werden Modellvorstellungen präsentiert, die maßgeblich vom Verfasser dieser Arbeit entwickelt und in Grundzügen bereits von GÜTLINGER ET AL. in [29] veröffentlicht wurden.

3.3.1 Aufschlagsschädigung

Auch bei Fahrten auf unbedeckter Fahrbahn muss beim Aufschlagen des Spikes in kurzer Zeit die vorliegende Differenzgeschwindigkeit abgebaut werden. Während dieser Vorgang beim Fahren auf Eisfahrbahnen vorteilhafterweise das Eindringen der Spikes unterstützt, führt er auf unbedeckter Fahrbahn jedoch zu einer Schädigung.

Die Schädigungsenergie lässt sich analog zu Gleichung (3.12) über

$$E_{dam} = E_{kin,\Delta} = \frac{1}{2} m_{Spike} \Delta v^2 \quad (3.22)$$

mit	E_{dam}	=	Schädigungsenergie
	$E_{kin,\Delta}$	=	Kinetische Energie aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Spike und Fahrbahn
	m_{Spike}	=	Spikemasse
	Δv	=	Differenzgeschwindigkeit gemäß Gleichung (3.1)

abschätzen. Wiederum kann ein linearer Einfluss der Spikemasse sowie ein quadratischer Einfluss der Spikegeschwindigkeit erwartet werden. Über die Differenzgeschwindigkeit Δv wirkt sich neben der Fahrgeschwindigkeit außerdem der Schlupf und die Geometrie des abgeplatteten Reifens aus, die den Auftreffwinkel des Spikes bestimmt. Wie bereits beim Mechanismus des Eindringens ins Eis durch Aufschlagen (vgl. Abschnitt 3.2.2) wird davon ausgegangen, dass die Schädigung der Fahrbahn proportional zur Schädigungsenergie ist.

Bestehende Untersuchungen zur Aufschlagsschädigung von Gestein beschäftigen sich meist mit dem Aufschlagen auf Oberflächen, die einer starken Vorspannung unterliegen [85]. Abweichend davon untersuchten SHAH und HAMDANI die Schädigung an der Kante eines Granitquaders beim Aufschlagen von Projektilen aus verschiedenen Materialien und somit verschiedener Steifigkeiten [85]. Die Schädigung wurde über verschiedene charakteristische Größen der Aufschlagkrater quantifiziert, die Aufschlagsgeschwindigkeiten liegen mit einer Größenordnung von 100 m/s deutlich höher als die am Spikereifen zu erwartenden (vgl. Ab-

schnitt 3.2.2). Die ermittelten Verschleißwerte unterscheiden sich für die verschiedenen Materialien, dabei lässt sich jedoch kein direkter Einfluss der Projektilmasse erkennen, wie er nach Gleichung (3.22) zu erwarten ist. Stattdessen identifizieren die Autoren die Projektilsteifigkeit als wichtigen Parameter. Zu beachten ist hier, dass die Steifigkeiten im Versuch derart gewählt waren, dass teilweise eine deutliche Verformung der Projektile zu beobachten ist. Das schwerste Projektil ist gleichzeitig das mit der geringsten Steifigkeit und wurde derart stark verformt, dass kaum eine Schädigung am Probenkörper zu beobachten war. Dies ist am Spikereifen erfahrungsgemäß nicht zu erwarten, das Hartmetall der Spikepins wird durch das Aufschlagen auf die Fahrbahn nicht bleibend verformt.

HOGAN ET AL. untersuchten die Schädigung von Granitplatten durch das Aufschlagen von Fallkörpern mit Massen zwischen 590 und 1080 g [33]. Sie beobachteten ein Ansteigen der Verschleißmasse mit der Aufschlagsenergie, was tendenziell dem oben vermuteten Zusammenhang entspricht, legten jedoch eine logarithmische an Stelle einer linearen Abhängigkeit zugrunde.

Ein Großteil der Veröffentlichungen zum Thema beschäftigt sich weiterhin mit dem Schadensbild durch das Aufschlagen an Stelle einer Quantifizierung der Verschleißmasse. So beschreiben AI und AHRENS eine Methodik zur Simulation des Verhaltens von Granit unter dynamischer Belastung und vergleichen die Schadensbilder aus ihren Simulationsergebnissen mit solchen aus Versuchen [2]. Im Bereich der Raumfahrt und der Wehrtechnik ist das spröde Versagen von keramischen Werkstoffen von großem Forschungsinteresse und wird sowohl in Simulation [15], [56] als auch im Versuch [34], [52] betrachtet. Zu beachten ist die grundsätzlich verschiedene Belastungssituation, da üblicherweise die komplette Zerstörung oder Durchdringung des keramischen Materials im Fokus steht. Von Interesse sind die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen ebendiese Zerstörung [15] oder die Schadensbilder am Material [56] bzw. die Splitterwirkung während des Aufschlags [34].

3.3.2 Reibarbeit am kratzenden Spike

Im Kontakt zwischen Spike und Fahrbahn ergibt sich ein Verschleiß durch Kratzen, wenn der Spike sich unter vertikaler Belastung relativ zur Fahrbahn bewegt. Betrachtet man die Interaktion zwischen Spike und dem Steinmaterial in der Fahrbahn, so kann davon ausgegangen werden, dass der Spike durch die große Härte des Steins nicht merklich in diesen eindringen kann. Für eine ebene Fahrbahn kann die Schädigungsenergie dann über die Reibarbeit abgeschätzt werden. Es gilt:

$$E_{dam} = E_{Reib} = F_{hor,Spike} \Delta x = \mu_{Spike,FB} F_{Kont} \Delta x \quad (3.23)$$

mit	E_{dam}	=	Schädigungsenergie
	E_{Reib}	=	Energie bzw. Arbeit aus der Reibung zwischen Spike und Fahrbahn
	$\mu_{Spike,FB}$	=	Reibwert zwischen Spike und Fahrbahn
	$F_{hor,Spike}$	=	Horizontale Kraft zwischen Spike und Fahrbahn
	F_{Kont}	=	Vertikale Kontaktkraft zwischen Spike und Fahrbahn
	Δx	=	Gleitweg des Spikes im Kontakt.

Einerseits hängt die Schädigung somit von der Reibkraft zwischen Spikepin und Fahrbahn ab. Für höhere Reibwerte im Kontakt zwischen Spikepin und Fahrbahn, wie sie beispielweise auf einer mikroskopisch rauen Fahrbahn zu erwarten sind, ist also ebenso von einer stärkeren Schädigung auszugehen wie für eine höhere vertikale Kontaktkraft durch eine steifere Einbettung des Spikes. Andererseits wird der Verschleiß der Fahrbahn durch die Kratzwege zwischen Spike und Fahrbahn bestimmt. Somit ist insbesondere für hohen Schlupf, wenn deutliche Gleitanteile im Latsch vorliegen, mit einem hohen Verschleiß durch Kratzen zu rechnen.

Auf rauer Fahrbahn ist zusätzlich zu den Reibkräften formschlüssige Kraftübertragung zwischen Spike und Fahrbahntextur möglich, wenn der Spike sich an den Unebenheiten der Fahrbahntextur abstützen kann. Eine einfache Beschreibung der horizontalen Kontaktkräfte über den Reibwert ist in diesem Fall nicht möglich. Zudem sind hier weitere Schädigungsmechanismen denkbar: Wird ein elastisch ausgelenkter, gleitender Spike

durch eine Höhenveränderung in der Fahrbahntextur entlastet, so kann sich die Auslenkung des Spikes wie in Abbildung 3.14 dargestellt in kurzer Zeit abbauen und ein Aufschlagen des Spikes in horizontaler Richtung ist möglich. Dabei kann, ähnlich zum oben beschriebenen vertikalen Aufschlagen, eine Schädigung des Fahrbahnmaterials zustande kommen.

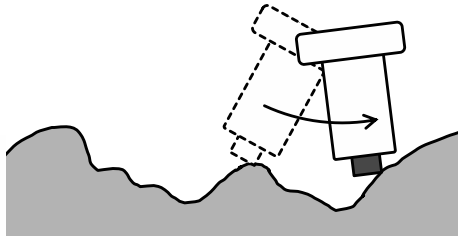


Abbildung 3.14: Horizontales Aufschlagen eines zuvor elastisch ausgelenkten Spikes nach Verlust des Kontakts

3.3.3 Druckversagen des Fahrbahnmaterials

Im Kontakt mit dem Spikereifen erfährt das Fahrbahnmaterial eine Belastung durch die vertikalen Kontaktkräfte zwischen Spike und Fahrbahn. Überschreiten die dabei hervorgerufenen Spannungen die Druckfestigkeit des Fahrbahnmaterials, so wird dieses geschädigt. Im Straßenbau kommt für die Fahrbahndeckschichten üblicherweise hartes, verschleißfestes Gestein zum Einsatz. Ein Beispiel für eine solche Gesteinsart ist Granit, dessen Druckfestigkeit gemäß [55] in einem Bereich von 115-200 MPa zu erwarten ist.

Ein Vergleich zu den maximalen mittleren Aufstandsdrücken an einem Spike von ca. 30 MPa (s. Gleichung (3.15)) lässt zunächst kein Versagen des Fahrbahnmaterials unter der Vertikalbelastung durch den Spike erwarten. Jedoch ist zu beachten, dass durch die Rauigkeit der Fahrbahntextur die tatsächliche Kontaktfläche zwischen Spike und Fahrbahnmaterial nur einen Bruchteil der Spikegrundfläche beträgt, wenn der Kontakt auf oder nahe einer Rauigkeitsspitze zustande kommt. In diesem Fall ergeben sich durch die kleinere Kontaktfläche Spannungen, die ein Vielfaches der

3 Mechanismen der Kraftübertragung und des Fahrbahnverschleißes

mittleren Kontaktspannung gemäß Gleichung (3.14) betragen, und ein Versagen des Gesteins durch die vertikale Belastung ist möglich.

Ein weiterer Schädigungsmechanismus ist denkbar, wenn ein Spike deutlich außerhalb der Mitte seiner Grundfläche mit einer Texturspitze oder -kante der Fahrbahn in Kontakt kommt. Dies kann dazu führen, dass wie in Abbildung 3.15 verdeutlicht der Spike über die Kante abgleitet und somit durch Kratzen an der Kante und das Abrutschen über das Profil der Unebenheit in vertikaler Richtung zusätzlichen Verschleiß erzeugt.

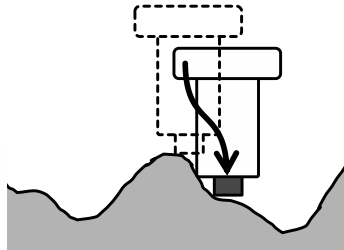


Abbildung 3.15: Vertikales Kratzen des Spikes an einer Kante in der Fahrbahntextur

4 Entwicklung der Messverfahren

Für die Untersuchung der Fahrbahnschädigung und der Kraftübertragung von kompletten Spikereifen auf Eis kommen vor allem Messverfahren im Fahrzeugversuch zum Einsatz. Diese stehen nur abhängig von den Jahreszeiten bzw. Witterungsverhältnissen zur Verfügung. Zudem unterliegen die Umgebungsbedingungen deutlichen Schwankungen und die Betriebsparameter lassen sich nur in einem begrenzten Bereich einstellen.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Arbeit Labormessverfahren entwickelt, mit denen die oben genannten Aspekte unter kontrollierten Bedingungen und mit verschiedensten Betriebsparametern untersucht werden können. Für das Messverfahren zur Quantifizierung des Fahrbahnverschleißes stand insbesondere auch die Effizienzsteigerung gegenüber dem bestehenden Verfahren im Fahrzeugversuch, wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, im Vordergrund.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst der Prüfstand vorgestellt, der für die Untersuchungen genutzt wird. Anschließend werden die entwickelten Messverfahren für die Kraftübertragung auf Eis und den durch Spikereifen verursachten Fahrbahnverschleiß erläutert. Dabei wird jeweils der Messaufbau und die Versuchsdurchführung beschrieben, die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse untersucht und auf die Validierung des Verfahrens durch Vergleich mit den etablierten Messverfahren eingegangen.

4.1 Messumgebung

Die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden am Innentrommelprüfstand (IPS) des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Im Folgenden wird der Prüfstand sowie das verwendete System zur Messdatenerfassung vorgestellt. Für weiterführende Informationen zum Innentrommelprüfstand wird auf [22], [28] sowie [30] verwiesen.

4.1.1 Der KIT-Innentrommelprüfstand

Zum Zwecke verschiedener Untersuchungen am Komplettreifen steht am KIT ein Innentrommelprüfstand zur Verfügung, dessen Aufbau in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt ist: Der zu untersuchende Reifen läuft auf der Innenseite einer Trommel mit einem Durchmesser von 3,8 m. Der Antrieb der Trommel erfolgt über einen Gleichstrommotor mit einer maximalen Antriebsleistung von 310 kW, dessen Ausgangswelle über ein Schaltgetriebe mit 16 Gängen mit der Achse der Trommel verbunden ist. Je nach gewähltem Gang können Geschwindigkeiten von wenigen cm/s bis zu 200 km/h eingestellt werden.

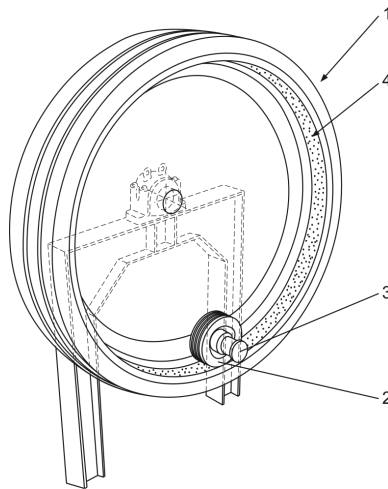


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des Innentrommelprüfstands am Karlsruher Institut für Technologie (vgl. [29])

Die Führung des Rades mit dem zu untersuchenden Reifen (2) ist über einen Prüf Schlitten gewährleistet, an den es über eine Messnabe (3) angebunden ist. Die Funktion der Messnabe wird in Abschnitt 4.1.2 beschrieben. Die Radführung dient zum einen dazu, das Rad entlang der Radachse in die Prüfstandstrommel (1) hinein bzw. aus ihr heraus zu fahren, zum anderen kann das Rad über hydraulische Aktoren in Richtung der Hochachse verstellt werden, um eine Radlast aufzubringen, und um

die Hoch- und die Längsachse verdreht werden, um den Schräglauf- bzw. den Sturzwinkel einzustellen. Das Rad verfügt zudem über einen eigenen, in der Radführung integrierten hydraulischen Antrieb, der mit einer maximalen Leistung von 310 kW ein Antriebs- oder Bremsmoment aufbringen kann. Somit können beliebige Schlupfzustände reproduzierbar eingestellt werden. Die wichtigen Betriebsgrößen und Einstellbereiche des Prüfstands sind in Tabelle 4.1 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Einstellbereich der Betriebsgrößen am Innentrommelprüfstand des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Größe	Wert	Einheit
Trommeldurchmesser	3.800	mm
Fahrbahnbreite (Eis/Abriebsuntersuchung)	270/290	mm
Max. Fahrgeschwindigkeit (auf Safety-Walk-Belag)	200	km/h
Umgebungstemperatur	-20 ... +30	°C
Schräglaufwinkel	-20 ... +20	°
Max. Reifendurchmesser	830	mm

Die Innenseite der Trommel ist mit einer Safety-Walk™-Schicht¹⁸ ausgekleidet, die als standardisierte Prüfoberfläche dient und zudem Korrosion der blanken Stahltrommel verhindert. Des Weiteren können in der Trommel verschiedene Fahrbahnen aus realen Fahrbahnmaterialien installiert werden. Diese bestehen aus einzelnen Stahlkassetten, die mit dem jeweiligen Fahrbahnmaterial aufgefüllt sind, über den Trommelumfang verteilt eingebaut werden und so eine durchgängige Fahrbahn (4) bilden.

¹⁸ Bei Safety Walk handelt es sich um einen rutschhemmenden Bodenbelag der Firma 3M, welcher in verschiedenen Körnungen verfügbar ist.

Der gesamte Aufbau aus Trommel und Radführung befindet sich in einer Klimakammer. Über zwei unabhängige Klimaanlage können Temperaturen bis hinab zu -20 °C eingestellt werden. Dadurch sind neben Messungen auf verschiedenen Fahrbahntypen in nassem und trockenem Zustand auch Messungen auf Eis und Schnee möglich. Der Schnee wird dabei über eine eigens entwickelte Anlage direkt am Prüfstand produziert [10]. Eine detaillierte Beschreibung der Eisfahrbahnen für Reifenmessungen erfolgt in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2.

4.1.2 Datenerfassung

Die Kräfte und Momente, die zwischen Reifen und Fahrbahn übertragen werden, werden über eine Messnabe erfasst, mit der das Messrad an die Radführung angebunden ist. Innerhalb der Messnabe befinden sich mit Dehnmessstreifen ausgestattete Bolzen, über die die verschiedenen Kräfte und Momente geleitet werden. Dadurch ergibt sich eine Verformung der Bolzen, die mit den Dehnmessstreifen registriert wird. Ausgehend davon können die Kräfte und Momente in allen drei Raumrichtungen berechnet werden. Weitere Informationen zur Funktionsweise der Messnabe liefert [30]. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Messnabe besitzt einen Messbereich von 8 kN in Vertikal-, Umfangs- und Seitenkraft-richtung. Werden im Folgenden Koordinatenrichtungen verwendet, so orientieren sich diese an in Abbildung 4.2 dargestellten horizontalen Koordinatensystem (H-Axis System) gemäß TYDEX-Konvention [99].

Die Temperatur wird im Prüfstand an mehreren Positionen gemessen und aufgezeichnet. Die Temperaturmessstelle für die in dieser Arbeit angegebenen Werte befindet sich über der Fahrbahn unterhalb der Trommel-drehachse.

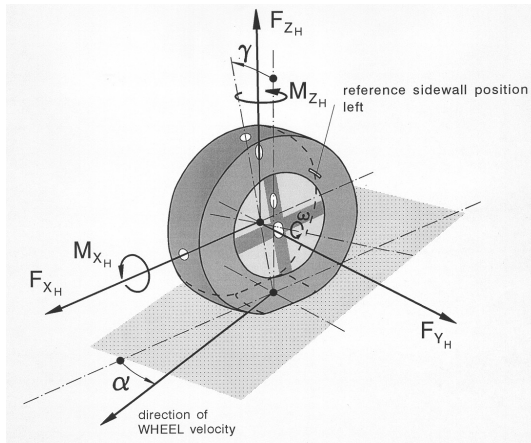


Abbildung 4.2: Horizontiertes Koordinatensystem (H-Axis System) gemäß TYDEX-Konvention mit den Radkräften und -momenten in den drei Raumrichtungen, dem Schräglaufwinkel α , dem Sturzwinkel γ und der Raddrehwinkelgeschwindigkeit ω [99]

4.2 Vorüberlegungen zur Untersuchung von Spikereifen auf Eis

Bereits seit einigen Jahrzehnten wird am Karlsruher Institut für Technologie die Kraftübertragung von Winterreifen auf Eis untersucht [25], [28], [103]. Will man die bestehenden Prüfstände und Prozeduren für die Untersuchung von Spikereifen auf Eis verwenden, so ergeben sich jedoch einige neue Herausforderungen, auf die im Folgenden eingegangen wird. Im Anschluss an die Darstellung der Ausgangssituation werden verschiedene Konzepte vorgestellt, wie mit diesen Herausforderungen umgegangen werden kann.

4.2.1 Bestehende Messverfahren

Am Institut für Fahrzeugsystemtechnik des KIT existieren verschiedene Messverfahren, um Winterreifen auf Eis- und Schneefahrbahnen zu untersuchen. Diese wurden in vorausgegangenen Arbeiten von BOLZ [10] und GIEBLER [25] entwickelt. Im Folgenden werden die bestehenden Ver-

fahren als Grundlage für die Entwicklung des Messverfahrens kurz dargestellt. Für detailliertere Informationen zu den Messverfahren wird auf die jeweiligen Arbeiten verwiesen.

Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 angesprochen, erfolgt die Bewertung einer Reifenvariante durch den Vergleich gegen einen Referenzreifen. Zur statistischen Absicherung werden dabei die einzelnen Reifen mehrfach gemessen. Diese Einzelmessungen können, wie im Folgenden erläutert, in unterschiedlicher Weise angeordnet werden. Die verschiedenen Vorgehensweisen unterscheiden sich in ihrem Potential zum Ausgleich von Störeinflüssen.

Blockweise Messung

Für Messungen auf Eis mit unbespikten Reifen findet der blockweise Vergleich Anwendung. Hierbei werden die zur statistischen Absicherung notwendigen Einzelmessungen für jeden Reifen des Vergleichs in einem Block direkt hintereinander durchgeführt. Sollen mehrere Reifenvarianten gegen einen Referenzreifen untersucht werden, so wechseln sich die Blöcke der jeweiligen Variante mit Blöcken des Referenzreifens ab. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt im verhältnismäßig geringen Montage- und damit auch Zeitaufwand, da die Messreifen nur zwischen den einzelnen Blöcken gewechselt werden müssen. Fahrbahneinflüsse durch eine Veränderung der Umgebungstemperatur oder Reifeneinflüsse durch die Aufheizung des Reifens innerhalb eines Messblocks können in der Auswertung korrigiert werden. Veränderungen in den Fahrbahneigenschaften, die sich unterschiedlich auf die Reifenkraftübertragung in den einzelnen Messblöcken auswirken, können mit diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden. Ein Beispiel für derartige Einflüsse ist eine Schneefahrbahn mit inhomogenem Aufbau, die mit der Abnutzung so ihre Eigenschaften verändert. Für Messungen auf Eis stellt dies jedoch kein Problem dar, da das Aufschmelzen der Eisoberfläche durch die Kraftübertragung deren Eigenschaften nicht nachhaltig entscheidend verändert.

Alternierende Messung

Für Messungen auf Schneefahrbahnen kommt das Verfahren der alternierenden Messung zum Einsatz. Neben Einflüssen durch Veränderung der Außentemperatur ist bei Schneefahrbahnen auch eine Beeinflussung der Fahrbahneigenschaften durch die Kraftübertragung am untersuchten Reifen zu beobachten. Deshalb wird bei Schneeversuchen vor jeder Einzelmessung eine dünne Schicht der Fahrbahn abgehobelt. Trotzdem können sich durch einen inhomogenen Aufbau der Schneefahrbahn über die Fahrbahndicke kontinuierliche Veränderungen in den Fahrbahneigenschaften ergeben.

Um dem zu begegnen, werden für den Vergleich auf einer Schneefahrbahn die Reifenvariante und der Referenzreifen im Wechsel gemessen. Auf diese Weise erfahren beide Reifen die Veränderung der Fahrbahneigenschaften in gleichem Maße. Allerdings muss nach jeder Einzelmessung der Reifen gewechselt werden, wodurch sich ein deutlich erhöhter Montageaufwand ergibt.

4.2.2 Besondere Herausforderungen

Bei der Entwicklung des Messverfahrens für die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis wurden die im vorigen Abschnitt genannten Vorgehensweisen für Messungen auf Schnee und Eis mit unbespikten Reifen als Ausgangspunkt gewählt. Allerdings ergeben sich bei Versuchen mit Spikereifen auf Eis, neben den bereits in Abschnitt 2.4.1 diskutierten Aspekten, weitere Herausforderungen, die im Folgenden vorgestellt werden.

Einfluss der Fahrbahnschädigung

Spikereifen verbessern die Kraftübertragung auf Eis, indem sich die Spikes im Eis verzahnen. Dadurch wird die Eisoberfläche aufgeraut bzw. beschädigt. Während dieser Aspekt im realen Straßenverkehr durchaus positiv zu bewerten ist, da die aufgeraute Fahrbahn für das nachfolgende Fahrzeug eine bessere Kraftübertragung ermöglicht, bewirkt die Veränderung der Fahrbahn im Spikereifenversuch einen störenden Einfluss. Im Außenversuch stellt dies kein großes Problem dar, da für die Versuche

üblicherweise große Eisflächen vorhanden sind und das Fahrzeug nur leicht seitlich versetzt werden muss, um wieder auf einer unberührten Eisfahrbahn zu fahren. Am Innentrommelprüfstand hingegen ist durch den Umfang von weniger als 12 m nur eine sehr kurze Fahrbahn verfügbar und eine Querverschiebung des Reifens nur in engen Grenzen möglich. Die gesamte Eisfahrbahn ist mit einer Breite von 270 mm nicht breit genug, um zwei Spikereifenspuren nebeneinander anzuordnen, sodass im Weiteren eine Querverstellung des Reifens nicht in Betracht gezogen wurde.

Misst man mehrfach hintereinander die Kraftübertragung eines Spikereifens auf einer Eisfahrbahn, ohne diese zwischen den einzelnen Messungen aufzubereiten, wird die Fahrbahn zunehmend geschädigt. Dadurch ergibt sich eine Veränderung der gemessenen Reibwerte wie in Abbildung 4.3 gezeigt. Es lässt sich erkennen, dass die übertragbaren Umfangskräfte für eine stärker verschlissene Eisfahrbahn tendenziell abnehmen während die übertragbaren Seitenkräfte ansteigen.

Dieses unterschiedliche Verhalten liegt in der jeweiligen Geometrie bzw. Position der Rillen begründet, die durch das Kratzen der Spikes verursacht werden. Für die Umfangskraftübertragung ergeben sich, wie in Abbildung 4.4 zu erkennen, Rillen in Fahrtrichtung entlang der Spuren, in denen Spikes auf dem Reifen angeordnet sind. Somit prägen sich im Laufe der aufeinanderfolgenden Versuche durchgehende Umfangsrillen in der Eisfahrbahn aus, die Spikes können sich schlechter abstützen und die übertragbaren Kräfte nehmen ab. Bei der Seitenkraftübertragung hingegen ergeben sich Rillen quer zur Fahrtrichtung. Diese werden beim erneuten Überrollen nicht exakt wieder getroffen, sodass der Spike sich in Querrichtung über viele Trommelumdrehungen hinweg an nahezu unbeschädigtem Eis abstützen kann. Aufgrund der geringen Gleitlängen bei der Seitenkraftübertragung in den untersuchten Schräglaufwinkelbereichen sind die Abmessungen der Querrillen deutlich kleiner als die der Längsrillen. Da die Fahrbahn durch die quer laufenden Rillen großflächig aufgeraut wird, verbessert sich zudem die Kraftübertragung zwischen Gummi und Eis und die übertragbaren Seitenkräfte steigen somit über die aufeinanderfolgenden Versuche an.

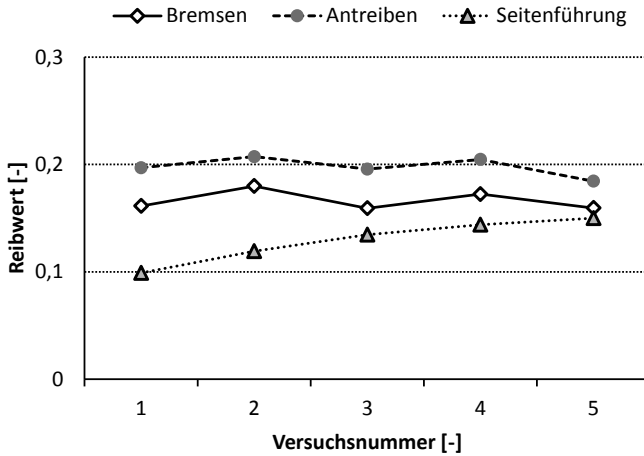


Abbildung 4.3: Entwicklung der gemessenen mittleren Reibwerte auf einer Eisfahrbahn bei aufeinanderfolgenden Messungen für verschiedene Beanspruchungsarten ohne Aufbereitung der Fahrbahn (Reifen: 205/55 R 16, 130 Spikes; $p = 2,2$ bar; $F_z = 4.000$ N; $v = 30$ km/h; $T = -4$ °C)

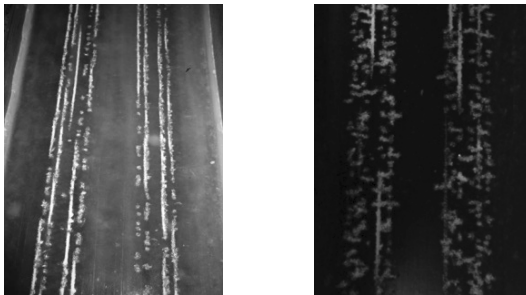


Abbildung 4.4: Verschleißspuren auf der Eisfahrbahn nach Beanspruchung durch Umfangskräfte (links) und Seitenkräften (rechts)

Einfluss der Eisaufbereitung

Die Schädigung der Eisfahrbahn durch die Spikereifen kann behoben werden, indem die oberste Eisschicht abgehobelt und anschließend die eingeebnete Eisfahrbahn wiederaufbereitet wird, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Um zu überprüfen, ob Messungen auf verschiedenen Fahrbahnen vergleichbare Reibwerte ergeben, wurden verschiedene Reifen mehrfach in loser Folge auf jeweils neu aufbereiteter Fahrbahn gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die absoluten Reibwerte der wiederholten Messungen für alle untersuchten Reifen deutlich voneinander abweichen. Mögliche Ursachen hierfür sind zum einen nicht vergleichbare Fahrbahnbedingungen durch Variationen in der Fahrbahnaufbereitung, zum anderen Einflüsse durch sich verändernde Umgebungsbedingungen während der für die Aufbereitung benötigten Zeit, so zum Beispiel Änderungen der Luftfeuchtigkeit oder der Temperatur.

Zusammenfassung der Ausgangssituation

Durch den Einfluss des Fahrbahnverschleißes auf die Reibwerte ist das Messen verschiedener Reifenvarianten nacheinander nicht ohne Weiteres möglich. Blockweises Messen, wie oben beschrieben, stellt für Spikereifen auf Eis also kein umsetzbares Konzept dar. Das Aufbereiten der Fahrbahn zwischen den Messungen, wie es bisher bei Schneemessungen zum Einsatz kommt, erscheint ebenfalls nicht praktikabel, da auf verschiedenen Eisfahrbahnen erzielte Reibwerte nicht vergleichbar sind. Außerdem ist jede Aufbereitung der Eisfahrbahn mit einem hohen Zeitaufwand von ca. 20 Minuten verbunden und verbraucht eine Eisschicht einer Höhe von ca. 3mm, die dann aufwändig wieder hergestellt werden muss. Aus diesen Gründen ist die Häufigkeit der Eisaufbereitung möglichst gering zu halten.

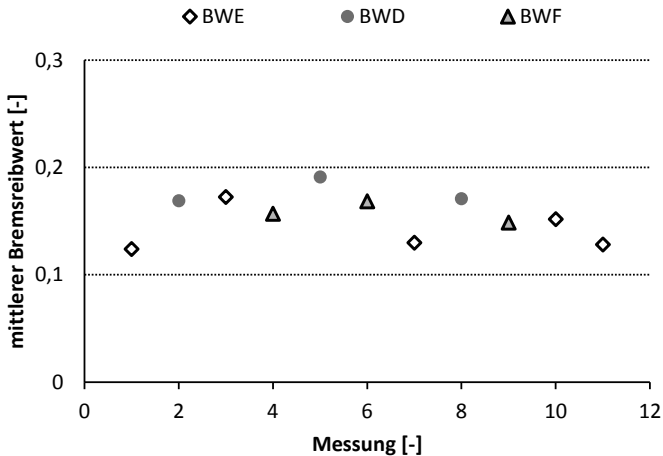


Abbildung 4.5: Mittlere Bremsreibwerte bei wiederholter Messung drei verschiedener Reifen auf jeweils frisch aufbereiteter Eisfahrbahn, die Buchstabenkürzel stellen die interne Kennung für den jeweiligen Reifen dar (Reifen: 205/55 R 16, 130 Spikes; $p = 2,2$ bar; $F_z = 4.000$ N; $v = 30$ km/h; $T = -3..-8$ °C, Schlupfbereich zur Bestimmung des Mittelwerts: $s = -10..-40\%$)

4.2.3 Möglichkeiten zur Reibwertcharakterisierung der Eisfahrbahn

Die gängige Vorgehensweise, Messungen bei winterlichen Bedingungen auf verschiedenen Fahrbahnen oder in verschiedenen Messzeiträumen vergleichbar zu machen, besteht darin, einen Reifen gegen einen Referenzreifen zu vergleichen (siehe Abschnitt 2.4.1). Da ein direkter Vergleich zweier Reifen wegen des Verschleißes der Eisfahrbahn nicht ohne Weiteres möglich ist, wurden im Rahmen der Arbeit verschiedene Konzepte untersucht, mit denen ein Referenzreibwert zur Charakterisierung der Eisfahrbahn ohne signifikante Schädigung derselbigen ermittelt werden kann. Im Folgenden werden die verschiedenen Konzepte vorgestellt und anschließend ihre Eignung als Referenztestverfahren bewertet.

Unbespikter Reifen

Als einfachste Methode der Referenzreibwertbestimmung wurde der unbespikte Referenzreifen untersucht. Testet man einen unbespikten Reifen vor dem Spikereifen, erhält man Informationen über das Reibwertniveau der Fahrbahn, ohne deren Eigenschaften zu verändern. Allerdings kann so nur die Reibung zwischen Gummi und Eis bewertet werden. Der Einfluss der Spikes wird auf diese Weise nicht berücksichtigt.

Linearprobe

Aufbauend auf einer Versuchsanordnung für die Scherfestigkeit von Schnee aus der Arbeit von GIEBLER [25] wurde eine Vorrichtung zur Messung der übertragbaren Spikekräfte an einem Probenkörper entwickelt, der einen Profilklotz mit einem Spike darstellt¹⁹. Derartige Probenkörper kommen üblicherweise an Linearprüfständen zur Untersuchung der Kraftübertragung bei reinem Gleiten zum Einsatz.

Für die Versuche wird der Probenkörper über eine an der Messnabe des Prüfstands befestigte Halterung (s. Abbildung 4.6) auf die Fahrbahn gesetzt und belastet. Die Messnabe erfasst die Kräfte, die zwischen Probenkörper und Eis in Vertikal- und Längsrichtung wirken. Für die Messungen wurde bei einer geringen Trommelgeschwindigkeit von 3-4 km/h der Probenkörper mit einer Last von 800 N abgesetzt. Diese Last sorgt zwar für eine verhältnismäßig hohe Flächenpressung im Kontakt, wurde aber so gewählt, um den Einfluss von Fahrbahnunebenheiten auf die Anpresskraft in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Die Anpressung der Probe bzw. der Reifen erfolgt am Innentrommelprüfstand weggesteuert. Da der verwendete Probenkörper eine gegenüber einem Reifen deutlich höhere Vertikalsteifigkeit aufweist, wirken sich Unebenheiten in der Fahrbahn stark auf die Kontaktkraft aus.

Mit dieser Anordnung können die übertragbaren Kräfte am Probenkörper auf der jeweiligen Eisfahrbahn vor der Messung am Spikereifen bestimmt

¹⁹ Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Probenkörper wurden freundlicherweise von der Continental Reifen Deutschland GmbH zur Verfügung gestellt.

werden. Die Schädigung der Eisfahrbahn beschränkt sich in diesem Fall auf eine einzelne Kratzspur von 1 bis 2 m Länge. Es wird davon ausgegangen, dass diese die Kraftübertragung des Reifens in der nachfolgenden Messung nicht signifikant beeinflusst.

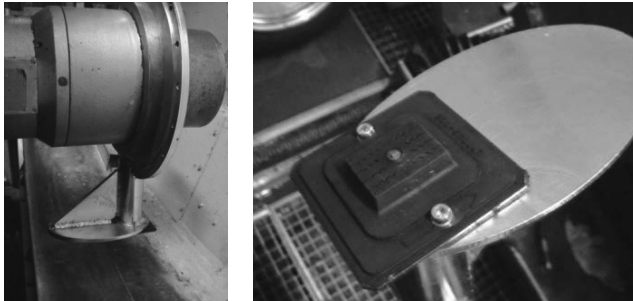


Abbildung 4.6: Linearprobenhalter eingebaut am Prüfstand (links) und montierter Probenkörper (rechts)

SRT-Pendel

Das SRT-Pendel (von engl. „Skid Resistance Tester“, auch bekannt als „British Pendulum“) ist ein verbreitetes Messgerät zur Bestimmung von Referenzreibungswerten auf üblichen Fahrbahndeckschichten [1]. Es verfügt über einen Pendelarm, an dessen Ende ein genormter Gummireibkörper angebracht ist (vgl. Abbildung 4.7, links). Das Pendel wird auf eine definierte Startposition ausgelenkt und von dort losgelassen. Während der Pendelbewegung gleitet der Reibkörper über die Fahrbahn und bremst so das Pendel ab, über eine vorgespannte Feder im Pendelarm, die den Reibkörper gegen die Fahrbahn drückt, wird eine annähernd konstante Anpressung des Gummis erreicht. Mit dem Pendel bewegt sich ein Schleppzeiger, der so die maximale Durchschwinghöhe des Pendels und damit einen abzulesenden Wert markiert. Je höher die Reibung im Kontakt zwischen Reibkörper und Fahrbahn, umso höher der Verlust an kinetischer Energie und umso geringer die Pendelhöhe beim Durchschwingen. Hohe Reibwerte werden über einen hohen SRT-Wert beschrieben.

Für die Spikereifenversuche wurden Messungen gemäß der üblichen SRT-Messvorschriften auf der Eisfahrbahn des Innentrommelprüfstands durchgeführt. Um zusätzlich zu der Gummireibung die Spikewirkung abbilden zu können, wurde ausgehend von einem Probenkörper für Linearprüfstände (vgl. Abbildung 4.6) ein eigener Aufsatz für das SRT-Pendel konstruiert. Der üblicherweise an der SRT-Probe vorliegende Winkel zwischen Fahrbahn und Probenkörper wurde bei der Spikeprobe, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, korrigiert, um einen flächigen Kontakt zwischen dem bespikten Gummiklotz und der Fahrbahn zu ermöglichen und somit der realen Kontaktsituation möglichst nahe zu kommen. Durch die veränderte Kontaktgeometrie sind die mit der Spikeprobe erzielten SRT-Werte nicht direkt mit den nach dem üblichen Verfahren ermittelten vergleichbar.

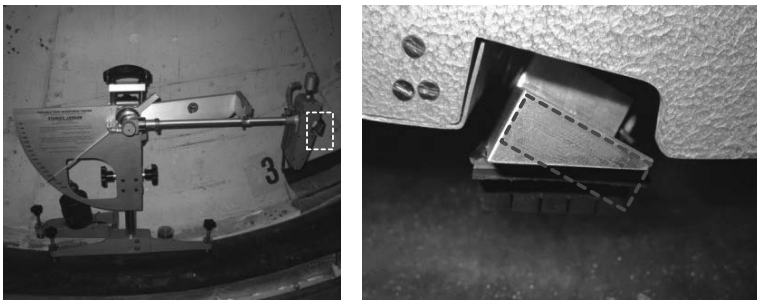


Abbildung 4.7: SRT-Pendel am Innentrommelprüfstand (links) und vergrößerte Darstellung des Spikereibkörpers (rechts, gestrichelt dargestellt die Orientierung des regulären SRT-Reibkörpers)

Fahrrad-Spikereifen

Als weitere Möglichkeit zur Reibwertcharakterisierung der Eisfahrbahn wurde ein Fahrradreifen des Fabrikats Schwalbe Marathon Winter in der Größe 20x1,6 Zoll, montiert auf einer Motorradfelge, getestet. Die Radlast wurde proportional zu der des Pkw-Spikereifens mit der Felgenbreite skaliert. Somit ergibt sich eine Radlast von 800 N für den Fahrradreifen.

Der Fahrradreifen wurde nach dem Pkw-Spikereifen in der Mitte der Fahrbahn getestet. Da beim untersuchten Pkw-Reifen die Spikes nicht in der Mitte der Lauffläche positioniert sind, ist die Fahrbahn hier auch nach den Versuchen mit dem Pkw-Reifen noch unbeschädigt. In Abbildung 4.8 sind der Fahrradreifen auf der Motorradfelge sowie die Eisfahrbahn vor und nach den Versuchen mit dem Fahrradreifen dargestellt.

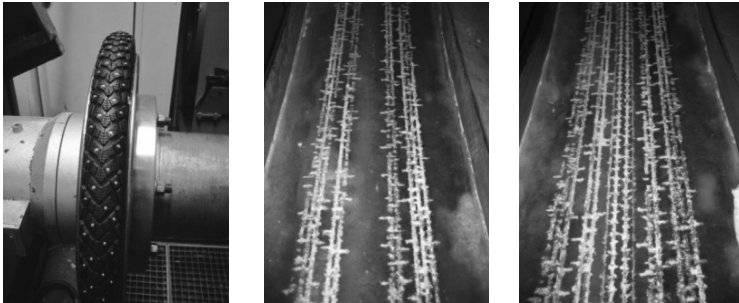


Abbildung 4.8: Für die Referenzmessungen verwendeter Fahrrad-Spikereifen (links) sowie Verschleißspuren auf der Eisfahrbahn vor (Mitte) und nach den Messungen mit dem Spikereifen (rechts)

Bewertung der Konzepte

Ziel einer Referenzreibwertmessung ist es, die Auswirkung von Störgrößen und Schwankungen in den Umgebungsbedingungen zwischen verschiedenen Messungen auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn prognostizieren zu können. Um die verschiedenen Verfahren diesbezüglich zu bewerten, wurden parallel zu Messungen an einem Spikereifen der Dimension 205/55 R 16 auf verschiedenen Eisfahrbahnen Referenzreibwertmessungen mit den oben vorgestellten Verfahren durchgeführt. Bei den Reibwerten für den Spikereifen handelt es sich um mittlere Reibwerte in einem Schlupfbereich zwischen 10% und 40% bzw. einem Schräglaufwinkelbereich zwischen 1° und 5° (vgl. auch Abschnitt 4.3.2 und 4.3.3 zum Ablauf bzw. zur Auswertung einer Reifenmessung).

Durch die Variation der Fahrbahneigenschaften bei der Herstellung von neuen Fahrbahnen und die Schwankung in den Umgebungstemperaturen ergeben sich Schwankungen in den ermittelten Reibwerten. Zur Bewertung der einzelnen Verfahren wird die Korrelation der jeweils ermittelten Reibwerte bzw. SRT-Werte mit den für den Spikereifen ermittelten Reibwerten herangezogen (vgl. Abschnitt 2.6 zum Vergleich zweier Messverfahren). Ein ideales Referenztestverfahren reagiert auf sich verändernde Umgebungsbedingungen in gleicher Weise wie der zu untersuchende Spikereifen, sodass eine gute Korrelation der Reibwerte erforderlich ist. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Korrelation der Referenzreibwerte aus Messungen auf verschiedenen Eisfahrbahnen mit den am Reifen ermittelten für die verschiedenen Referenzmessverfahren (Korrelationskoeffizient entsprechend Gleichung (2.2))

Verfahren	Korrelationskoeffizient R^2		
	Antreiben	Bremsen	Seitenführung
Unbespikter Referenzreifen, anderer Grundreifen	0,22	0,13	0,46
Unbespikter Referenzreifen, selber Grundreifen	0,63	0,60	0,73
Linearprobe	0,97	0,66	0,32
SRT-Pendel, konventionell	0,03	0,00	0,12
SRT-Pendel, Spikeprobe	0,86	0,96	0,73
Fahrrad-Spikereifen	0,22	0,31	0,05

Der unbespikte Reifen ist für eine Referenzreibwertbestimmung nicht geeignet. Die Wirkung der Spikes wird in diesem Fall nicht berücksichtigt, somit ergibt sich ein systematischer Fehler. Während der dem Spikereifen entsprechende unbespikte Reifen noch eine relativ gute Korrelation zeigt, ist das Verhalten eines anderen Grundreifens derselben Dimension aber

mit anderem Profil nicht vergleichbar. Insbesondere für Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt ist eine starke Abweichung des Verhaltens eines unbespikten Reifens zu erwarten, da hier die Reibwerte zwischen Gummi und Eis stark abfallen (vgl. auch Abschnitt 5.1.5).

Die Linearprobe zeigt verhältnismäßig gute Korrelationswerte. Allerdings ist die allgemeine Übertragbarkeit fraglich. Da, wie oben erwähnt, im Innentrommelprüfstand die Radlast weggesteuert eingestellt wird, ergeben sich durch die hohe Vertikalsteifigkeit des Linearprobenkörpers bzw. der Halterung schon bei kleinen Unebenheiten in der Fahrbahn große Schwankungen in der Anpresskraft. Um deren Einfluss in einem vertretbaren Rahmen zu halten, muss die Anpresskraft vergleichsweise hoch gewählt werden, sodass sich unrealistische hohe Pressungen im Kontakt ergeben.

Das SRT-Pendel in konventioneller Anwendung zeigt eine sehr schlechte Korrelation der Messwerte. Dies ist nachvollziehbar, wenn man den Reibkontakt näher betrachtet: Die Kontaktzeit für das SRT-Gummi ist durch hohe Gleitgeschwindigkeiten und die kurze Kontaktlänge sehr kurz. Zum einen ergeben sich so unrealistische Kontaktbedingungen, zum anderen ist von einer starken Streuung der Reibwerte auf der Eisfläche durch die kurze und intensive Beanspruchung auszugehen. Darüber hinaus kann auch auf diese Weise der Einfluss des Spikes auf die Kraftübertragung nicht berücksichtigt werden.

Die Spikeprobe für das SRT-Pendel wurde mit dem Ziel entwickelt, die Kontaktbedingungen realistischer zu gestalten und auch den Spikeeinfluss berücksichtigen zu können. Es zeigt sich jedoch in der Anwendung, dass die Vorspannkraft der Probenhalterung des SRT-Pendels nicht ausreicht, um ein merkliches Eindringen des Spikes ins Eis zu ermöglichen. Stattdessen kratzt der Spike nur leicht an der Oberfläche. Das den Spike umgebende Gummi des Probenkörpers berührt die Eisoberfläche nicht. Somit stellt die SRT-Messung mit Spikeprobe trotz akzeptabler Korrelationswerte kein zuverlässiges Referenztestverfahren dar. Zu beachten ist zudem der hohe Aufwand von ca. 20 min pro Messung.

Der Fahrradreifen wurde gewählt, da er die Kontaktgeometrie am Reifen in einer vermeintlich sehr realistischen Weise abbildet und auch der Spikeeingriff vergleichbar abläuft. Trotzdem zeigt sich nur eine sehr schlechte Korrelation der Reibwerte von Fahrrad- und Pkw-Reifen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keine der untersuchten Methoden eine zuverlässige Methode zur Referenzreibwertbestimmung darstellt. Am vielversprechendsten erscheint die Linearprobe, diese ließe sich durch Einbringen vertikaler Elastizitäten noch weiter optimieren. Bezüglich der Kraftübertragungsmechanismen bleibt jedoch die Frage, inwiefern ein rein gleitender Spike mit einem am Reifen befindlichen vergleichbar ist. Für das schlussendlich realisierte Messkonzept (s. Abschnitt 4.3) ist ein separates Referenztestverfahren nicht unbedingt erforderlich, deshalb wurde auf eine Weiterentwicklung der Konzepte verzichtet.

4.3 Messverfahren für die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis

In den vorigen Abschnitten wurde dargestellt, dass weder ein aufeinanderfolgender Vergleich zweier Spikereifen auf einer Fahrbahn reproduzierbar möglich ist, noch einzelne Reifenmessungen auf verschiedenen frisch aufbereiteten Eisfahrbahnen vergleichbare Werte liefern. Verschiedene Verfahren zur Bestimmung eines Referenzreibwerts ohne starke Schädigung der Eisfahrbahn wurden untersucht, ohne jedoch ein zufriedenstellendes Konzept zu finden. Das schlussendlich realisierte Messverfahren verfolgt deshalb einen anderen Weg.

Zum Vergleich zweier Spikereifen werden diese abwechselnd und mehrfach wiederholt auf einer Fahrbahn untersucht, wobei die Fahrbahn zwischen den einzelnen Versuchen nicht aufbereitet wird. Durch den zunehmenden Verschleiß der Fahrbahn ergibt sich eine Veränderung der Reibwerte, wie in Abschnitt 4.2.2 gezeigt. Allerdings kann hier davon ausgegangen werden, dass sich der Verschleiß auf beide Reifen in gleichem Ausmaße auswirkt und so den Vergleich der Reifen nicht beeinträchtigt. Der genaue Ablauf der alternierenden Messungen wird in Abschnitt 4.3.2

näher beschrieben, Abschnitt 4.3.3 beschäftigt sich im Detail mit der Auswertung der Messungen und dem Vergleich der beiden Reifen.

4.3.1 Messaufbau

Für Messungen auf vereister Fahrbahn im Innentrommelprüfstand (vgl. Abschnitt 4.1.1) wird in der Trommel eine Eisschicht erzeugt, indem die Prüfstandskabine auf Temperaturen unterhalb von 0°C abgekühlt und Wasser bei drehender Trommel auf die Trommelinnenseite aufgebracht wird. Als seitliche Begrenzung werden Metallleisten montiert, die das Wasser auf der Fahrbahn halten.

Da im Rahmen der Spikereifenmessungen durch das Abhobeln der verschlissenen Eisschicht zwischen den einzelnen Messblöcken große Mengen von Eis verbraucht werden und dann wieder hergestellt werden müssen, wurde ein System zur automatisierten Eisproduktion entwickelt [79], [82]²⁰. Mit diesem wird zwischen den Begrenzungsleisten auf der Trommelfahrbahn eine konstante Wasserhöhe eingestellt, sodass an der tiefsten Stelle stets eine definierte Wassersäule vorhanden ist. Die mit der Trommel drehende Eisschicht auf der Trommelinnenseite bewegt sich durch dieses Wasservolumen und wird mit einem Wasserfilm benetzt, der dann auf dem Weg entlang des Trommelumfangs festfriert. Die Anordnung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 4.9 verdeutlicht. Für detaillierte Informationen zur Gestaltung der Vorrichtung zur Eisproduktion wird auf [82] verwiesen.

Beim Abrollen der Spikereifen auf der Eisfahrbahn und vor allem während der Kraftübertragung entstehen Einschlag- und Kratzspuren in der Eisfahrbahn und das so entfernte Eis sammelt sich in Form von feinem Eisstaub und kleinen Bruchstücken auf der Fahrbahn. Es ist davon auszugehen, dass sich dadurch eine Beeinflussung der übertragbaren Kräfte zwischen Spikereifen und Eisfahrbahn ergibt. Aus diesem Grund wurde im Prüfstand eine Absaugung installiert, die hinter dem Reifen Luft über

²⁰ Bei den genannten Quellen handelt es sich um Diplomarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit betreut und von den Studenten in enger Zusammenarbeit mit dem Verfasser dieser Arbeit bearbeitet wurden.

der Fahrbahnoberfläche absaugt (vgl. Abbildung 4.9). Die feinen Eispartikel werden von dem Luftstrom mitgerissen und können so von der Fahrbahn entfernt werden. In einer optischen Analyse der Reifen zeigt sich, wie in Abbildung 4.10 dargestellt, dass die Verschmutzung der Reifen durch Eisstaub deutlich reduziert wird. Es ist davon auszugehen, dass dies die Reproduzierbarkeit der Messungen positiv beeinflusst.

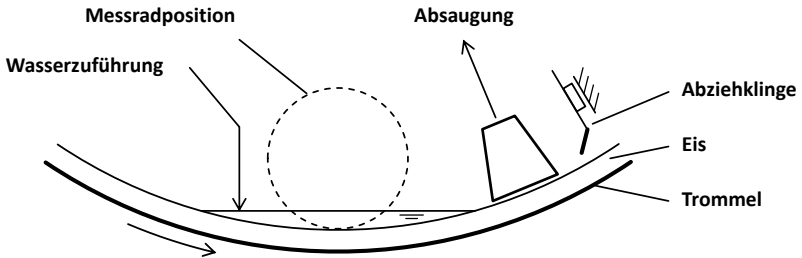


Abbildung 4.9: Schematischer Aufbau der Vorrichtungen zur Eisherstellung und -aufbereitung am Innentrommelprüfstand



Abbildung 4.10: Lauffläche des Reifens nach einem Versuchsdurchlauf ohne (links) und mit installierter Absaugung des Eisstaubs (rechts)

4.3.2 Messprozedur

Vor der Messung eines Paares aus Referenzreifen und Variante muss die Eisfahrbahn aufbereitet werden. Dabei wird entsprechend der bewährten Prozedur zur Aufbereitung der Eisfahrbahn am Innentrommelprüfstand diese zunächst mit einer Klinge abgehobelt, um Unebenheiten durch die Eisproduktion oder Rillen durch vorangegangene Spikemessungen zu beseitigen. Anschließend wird die Fahrbahn mit einem Polierreifen eingefahren. Dabei handelt es sich um einen fein profilierten Reifen ohne ausgeprägte Umfangsrillen, mit dem die Fahrbahn unter Schlupf bzw. Schräglaufwinkel gleichmäßig geglättet wird. Ziel dieser Prozedur ist es, die Rauigkeit der Eisfahrbahn einzuebnen und ein konstantes Reibwertniveau herzustellen.

Ist die Fahrbahn aufbereitet, werden die zwei zu vergleichenden Spikereifen im Wechsel auf der dabei zunehmend verschleißenden Eisfahrbahn gemessen. Zunächst wird die Trommel des Innentrommelprüfstands auf die gewünschte Messgeschwindigkeit beschleunigt. Dann wird der Spikereifen im abgehobenen Zustand ebenfalls auf die entsprechende Geschwindigkeit angetrieben, auf die Eisfahrbahn gesetzt, die Messprozedur durchfahren und der Spikereifen anschließend sogleich wieder abgehoben, um die Schädigung der Eisfahrbahn durch das Abrollen des Reifens möglichst gering zu halten. Für die Umfangskraftübertragung und die Seitenkraftübertragung wurden zwei getrennte Messprozeduren entwickelt. Der Grund dafür liegt in einer deutlichen gegenseitigen Beeinflussung der Umfangs- und Seitenkraftübertragung, die in Vorversuchen beobachtet wurde. Insbesondere die Seitenkraftübertragung wird stark durch die von einer vorangegangenen Umfangkraftmessung verursachten Längsrillen in der Eisfahrbahn beeinflusst.

Zur Bestimmung der Umfangskraftübertragung wird über eine Verstellung der Raddrehzahl der Schlupf zunächst in Antriebsrichtung, dann in Bremsrichtung kontinuierlich erhöht. Währenddessen werden über die Messnabe die übertragenen Umfangskräfte aufgezeichnet, so dass eine Umfangskraftcharakteristik des Reifens bestimmt werden kann. Die Dauer der Schlupfverstellung ist dabei so gewählt, dass der komplette für die

Messung benötigte Schlupfbereich für Antreiben und Bremsen (vgl. Tabelle 4.3) jeweils innerhalb einer Trommelumdrehung durchfahren wird.

Die Seitenkraftübertragung wird durch eine Variation des Schräglaufwinkels bestimmt, wobei das Rad zunächst in die eine Richtung, dann in die andere Richtung gelenkt und anschließend wieder in Geradeausstellung gedreht wird. Währenddessen werden die übertragenen Seitenkräfte aufgezeichnet, sodass sich die beiden Äste der Seitenkraftcharakteristik des Spikereifens bestimmen lassen.

4.3.3 Auswertung

Als Resultat aus den Messungen am Innentrommelprüfstand ergeben sich zunächst Zeitverläufe der gemessenen Größen. Um diese in vergleichbare Kraftübertragungskennlinien zu überführen und anhand derer die beiden untersuchten Reifen zu vergleichen, sind einige Schritte notwendig. Die angewendete Vorgehensweise orientiert sich dabei an der von GIEBLER in [25] vorgestellten.

Klassierung der Daten

Für jede einzelne Messung eines Reifens wird aus den Zeitdaten eine Kennlinie für die Umfangs- bzw. Seitenkraftübertragung abgeleitet. Für die Seitenkraftübertragung dient dabei der Seitenkraftbeiwert μ_y als relative Bewertungsgröße, der sich aus der dem Quotienten der Seitenkraft F_y und der Radlast F_z ergibt:

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z} \quad (4.1)$$

Zur Glättung der Kennlinien und um die Kennlinien verschiedener Messungen durch gemeinsame Stützpunkte vergleichbar zu machen, erfolgt eine Klassierung der berechneten Seitenkraftbeiwerte in Schräglaufwinkelklassen von $0,5^\circ$ Breite. Abbildung 4.11 zeigt beispielhaft die Zeitdaten sowie die Kennlinie, basierend auf den Rohdaten und in klassierter Darstellung.

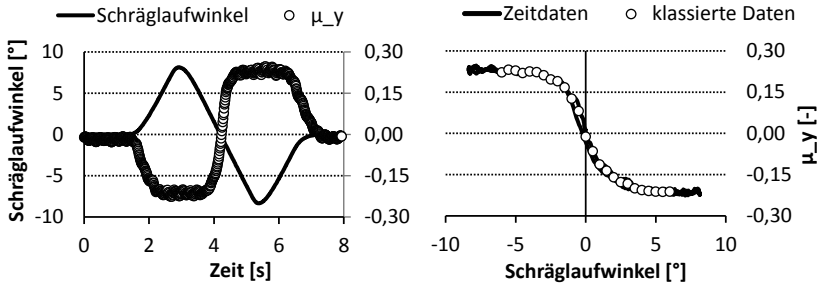


Abbildung 4.11: Zeitdaten und durch Klassierung ermittelte Kennlinie einer Seitenkraftmessung

Die Auswertung der Umfangskraftmessungen erfolgt analog. Dabei werden die Bremskraftübertragung und die Antriebskraftübertragung getrennt betrachtet. Hier dient zur Bewertung der Umfangskraftbeiwert μ_x , der dem Quotienten aus Umfangskraft F_x und der Radlast F_z entspricht.

$$\mu_x = \frac{F_x}{F_z} \quad (4.2)$$

Die Breite der Schlupfklassen für die Klassierung ist hier im Bereich niedrigen Schlupfs kleiner gewählt, um den steilen Anstieg der Kennlinie möglichst exakt abbilden zu können. In Abbildung 4.12 ist ein beispielhafter Zeitdaten- und Kennlinienverlauf für eine Antriebskraftmessung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im gezeigten Fall ab einem gewissen Schlupfwert die übertragenen Kräfte annähernd konstant bleiben, während der Schlupf weiter ansteigt. Wird der Schlupf zurückgenommen, fallen auch die übertragenen Kräfte ab. Für die Erzeugung der Kennlinie werden nur die Werte während des Schlupfanstiegs verwendet. Weiterhin zeigt sich im Zeitverlauf des Schlupfs ein Plateau während des Anstiegs. Dieses ist durch Schwingungen aufgrund der Elastizitäten in der hydraulischen Antriebseinheit zu erklären.

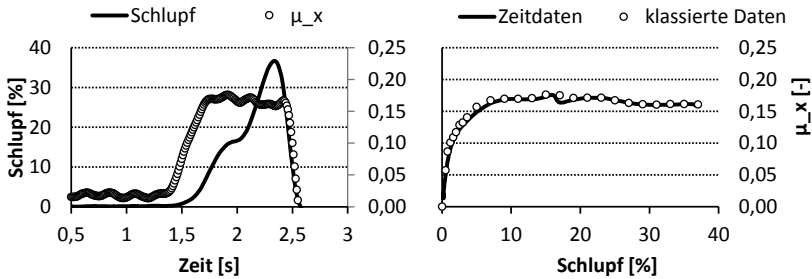


Abbildung 4.12: Zeitdaten und durch Klassierung ermittelte Kennlinie einer Antriebskraftmessung

Bestimmung des mittleren Reibwerts

Für die weitere Auswertung wird aus den so ermittelten Kennlinien jeweils ein mittlerer Reibwert abgeleitet. Die entsprechenden Mittelungsbereiche sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Dabei wird für die Seitenkraftübertragung über Rechts- und Linkseinschlag gemittelt, für die Umfangskraftübertragung wird Antreiben und Bremsen getrennt ausgewertet, um beide Beanspruchungsarten bewerten zu können.

Tabelle 4.3: Auswertebereiche und Klassenbreiten im Auswertebereich für Seiten- und Umfangskraftauswertung (vgl. [25])

	Seitenkraftübertragung	Umfangskraftübertragung
Klassenbreite im Auswertebereich	$\Delta\alpha = 0,5^\circ$	$\Delta s = 2\%$
Auswertebereich für $\bar{\mu}$	$-5^\circ \dots -1^\circ$ und $1^\circ \dots 5^\circ$	Bremsen: $-10\% \dots -40\%$ Antreiben: $10\% \dots 40\%$

Trendausgleich

Während eines Vergleichs zweier Reifen mit dem alternierenden Messverfahren wird jeder Reifen in Anlehnung an das bestehende Messverfahren für Schnee fünfmal gemessen (vgl. [25]). Trägt man die mittleren Reibwerte für die Einzelmessungen nacheinander auf, ergibt sich ein Ver-

lauf wie in Abbildung 4.13 beispielhaft dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 an einem einzelnen Reifen untersucht, ergibt sich auch hier für beide Reifen ein Trend in den mittleren Reibwerten, verursacht durch den zunehmenden Verschleiß der Eisfahrbahn.

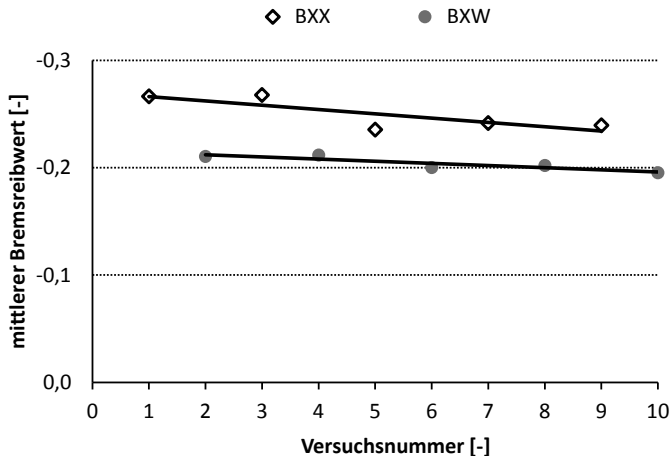


Abbildung 4.13: Linear approximierte Reibwertverläufe zweier abwechselnd gemessener Reifen. Jeder Punkt steht für eine Messung in der alternierenden Messreihenfolge, die Buchstabenkürzel stellen die interne Kennung für den jeweiligen Reifen dar (Reifen: 205/55 R 16, 130 Spikes, unterschiedliche Spikeüberstände; $p = 2,2$ bar; $F_z = 4.000$ N; $v = 30$ km/h; $T = -6..-7$ °C)

Wie sich im Rahmen der Arbeit gezeigt hat, kann der Verlauf in erster Näherung linear angenommen werden. Auch wenn davon auszugehen ist, dass sich für beide Reifen eine vergleichbare Veränderung der Fahrbahn ergibt, können sich die Steigungen der Verläufe unterscheiden, wenn die beiden Reifen unterschiedlich stark auf die Veränderung der Fahrbahn reagieren.

Zum Vergleich der beiden Reifen werden im Folgenden nicht mehr die einzelnen Messwerte sondern die angenäherten Verläufe herangezogen. Diese können aus den Messwerten durch lineare Regression bestimmt

werden. Für den linearen Reibwertverlauf $\hat{\mu}$ gilt dann in Abhängigkeit der Messposition n

$$\hat{\mu}(n) = b_0 + b_1 n, \quad (4.3)$$

die Koeffizienten ergeben sich (vgl. z. B. [8]) zu

$$b_1 = \frac{K(\sum_{k=1}^K n_k \mu_k) - (\sum_{k=1}^K n_k)(\sum_{k=1}^K \mu_k)}{K(\sum_{k=1}^K n_k^2) - (\sum_{k=1}^K n_k)^2} \quad \text{und} \quad (4.4)$$

$$b_0 = \bar{\mu} - b_1 \bar{n} \quad (4.5)$$

mit

K	=	Anzahl der jeweiligen Einzelmessungen (Stichprobenumfang)
k	=	Nummer der jeweiligen Einzelmessung
$\bar{\mu}, \bar{n}$	=	Mittelwert der Reibwerte bzw. der Messpositionen.

Weicht einer der fünf Messpunkte deutlich von einem anzunehmenden linearen Verlauf ab, wird zudem die Elimination dieses einen Ausreißers zugelassen. Dieser wird dann für die Regression und die weiteren Berechnungen nicht miteinbezogen. Die Elimination von mehr als einem Datenpunkt ist nicht zulässig, da hierdurch die Aussage der Messergebnisse unter Umständen sehr stark verfälscht würde.

Reifenvergleich

Die ermittelten Ausgleichsgeraden beschreiben den angenommenen Verlauf, mit dem sich der mittlere Reibwert des jeweiligen Reifens durch den Verschleiß der Fahrbahn verändert. Sollen nun die beiden Reifen verglichen werden, muss ein gemeinsamer Vergleichszeitpunkt gewählt werden. Dieser wird auf die Mitte des Messzeitraums gelegt, das heißt im Falle von insgesamt zehn Einzelmessungen auf einen fiktiven Punkt zwischen der fünften und der sechsten Messung. Der Ratingwert einer Variante i bezüglich des Referenzreifens ergibt sich somit zu

$$RW_i = \frac{\hat{\mu}_{Var,i}(\frac{N+1}{2})}{\hat{\mu}_{Ref}(\frac{N+1}{2})} = \frac{b_{0,Var,i} + b_{1,Var,i} \frac{N+1}{2}}{b_{0,Ref} + b_{1,Ref} \frac{N+1}{2}} \quad (4.6)$$

4.3 Messverfahren für die Kraftübertragung von Spikereifen auf Eis

mit	N	=	Gesamtzahl der Einzelmessungen für einen Variantenvergleich
	$b_{0,Var,i}, b_{1,Var,i}$	=	Koeffizienten der linearen Regression für die Variante i
	$b_{0,Ref}, b_{1,Ref}$	=	Koeffizienten der linearen Regression für die Referenz.

Statistische Auswertung und Bewertung

Für die statistische Bewertung werden die Abweichungen bezüglich der linear angenäherten Verläufe herangezogen. Als Maß für die Streuung der Einzelmessungen eines Vergleichs dient die mittlere relative Standardabweichung. Dazu wird sowohl für die Referenz als auch für die Variante die Standardabweichung der nicht über die lineare Regression erklärten Streuung berechnet. So ergibt sich die relative Standardabweichung zur Bewertung des Vergleichs σ_{RW} über

$$\sigma_{RW} = \frac{1}{2}(\sigma_{Var} + \sigma_{Ref}), \quad (4.7)$$

wobei gilt:

$$\sigma_{Var} = \frac{1}{\hat{\mu}_{Var}\left(\frac{N+1}{2}\right)} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K_{Var}} (\mu_{Var,k} - \hat{\mu}_{Var}(n_k))^2}{K_{Var} - 1}} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{Ref} = \frac{1}{\hat{\mu}_{Ref}\left(\frac{N+1}{2}\right)} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K_{Ref}} (\mu_{Ref,k} - \hat{\mu}_{Ref}(n_k))^2}{K_{Ref} - 1}} \quad (4.9)$$

mit	K_{Var}, K_{Ref}	=	Anzahl der jeweiligen Einzelmessungen (Stichprobenumfang) für Variante und Referenz.
	$\hat{\mu}_{Var}, \hat{\mu}_{Ref}$	=	Beschreibung der Regressionsgeraden für Variante und Referenz.

Zur Einschätzung der Aussagefähigkeit eines Vergleiches dient die kritische Differenz nach dem TUKEY-KRAMER-Verfahren, auch bekannt als die

4 Entwicklung der Messverfahren

Honest Significant Difference (HSD) nach TUKEY (vgl. [72], [73]). Nur wenn der Unterschied zwischen zwei verglichenen Reifen größer ist als die kritische Differenz, unterscheiden sich die Reibwerte dieser beiden Reifen signifikant voneinander. Für den Fall des Vergleichs gleich großer Gruppen (d.h. gleich viele Einzelmessungen für jeden Reifen) und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% berechnet sich die kritische Differenz zu

$$D_{krit} = q_{m(K-1),m,0.95} \sqrt{\frac{s^2}{K}} \quad (4.10)$$

mit	K	=	Anzahl der jeweiligen Einzelmessungen (Stichprobenumfang) für Variante und Referenz.
	m	=	Anzahl der zu vergleichenden Gruppen (Reifenvarianten und Referenz), bei paarweisem Vergleich: $m = 2$
	$m(K - 1)$	=	Zahl der Freiheitsgrade
	$q_{m(K-1),m,0.95}$	=	Oberes Quantil der studentisierten Wahrscheinlichkeitsverteilung für 5% Irrtumswahrscheinlichkeit
	s	=	Nicht über die lineare Regression erklärte empirische Standardabweichung.

Die nicht erklärte empirische Standardabweichung kann gemäß der Gleichung

$$s = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \sum_{k=1}^K \frac{1}{K-1} (\mu_{j,k} - \hat{\mu}_j(n_k))^2} \quad (4.11)$$

mit	$\mu_{j,k}$	=	Reibwert der k -ten Messung des j -ten Reifens
	$\hat{\mu}_j(n_k)$	=	Wert der Regressionsgeraden für den j -ten Reifen an der Stelle der k -ten Messung

berechnet werden, die Werte für $q_{m(K-1),m,0.95}$ sind gängigen Werken der Statistik oder mathematischen Formeltabellen zu entnehmen (siehe z.B. [73]). Für den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vergleich einer

Variante zur Referenz mit jeweils 5 Einzelmessungen und der Elimination eines Ausreißers ergibt sich der Wert zu $q_{2(4-1),2,0.95} = q_{6,2,0.95} = 3,46$.

4.3.4 Reproduzierbarkeit des Verfahrens

Die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens ist ein entscheidendes Qualitätskriterium. Wie oben erwähnt, kann wegen der Veränderlichkeit der Umgebungsbedingungen und der Eigenschaften der Eisfahrbahn nicht davon ausgegangen werden, dass auf verschiedenen Eisfahrbahnen vergleichbare Reibwerte gemessen werden können. Um dem zu begegnen, werden zwei Reifen durch abwechselnde Messungen verglichen. Für die Aussagekraft dieser Vorgehensweise ist es unerlässlich, dass bei einer Wiederholung des Vergleichs zweier Reifen das Verhältnis der übertragbaren Reibkräfte reproduziert werden kann, d.h. der im Vergleich bestimmte Ratingwert muss reproduzierbar sein.

Zum Nachweis der Reproduzierbarkeit wurde ein Programm aus drei Reifen der Dimension 205/55 R 16 mit jeweils 130 Spikes untersucht. Diese basieren alle auf demselben Grundreifen und unterscheiden sich in Form und Aufbau der Spikes, die zum Einsatz kommen. Diese drei Reifen wurden paarweise gegeneinander verglichen, wodurch sich drei Reibwertverhältnisse ergeben. Anschließend wurden die Vergleiche in identischer Versuchsreihenfolge wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Ratingwerte zu überprüfen. Schließlich wurden die einzelnen Vergleiche in umgekehrter Testreihenfolge wiederholt, um den Einfluss der Versuchsreihenfolge beim Vergleich zweier Reifen zu untersuchen. Für zwei Reifen A und B wurden also insgesamt drei Messreihen, zweimal beginnend mit dem Reifen A und einmal beginnend mit dem Reifen B durchgeführt. Die Ergebnisse für die verschiedenen Paarungen unter den verschiedenen Beanspruchungsarten sind in Tabelle 4.4 dargestellt: Es ist zu erkennen, dass bei der Wiederholung eines Vergleichs in gleicher Reihenfolge stets auch eine gute Übereinstimmung der Ratingwerte erzielt wird. Die maximale zu beobachtende Abweichung liegt bei 4 Prozentpunkten, im Mittel liegt die Abweichung bei ca. 2 Prozentpunkten. In der letzten Zeile von Tabelle 4.4 sind die ermittelten Ratingwerte für eine umgekehrte Reihung der abwechselnden Einzelmessungen dargestellt. Hier ergeben sich für

4 Entwicklung der Messverfahren

eine Paarung (BWE/BWD) deutliche Abweichungen, insbesondere bei der Umfangskraftübertragung, während bei den anderen beiden Paarungen die Testreihenfolge keinen deutlichen Einfluss hat.

Es kann also festgehalten werden, dass die Wiederholbarkeit eines Vergleiches im Mittel bei ca. 2 Prozentpunkten liegt. Abweichungen zwischen zwei vergleichbaren Messungen, die deutlich über 4% liegen, sind nicht zu erwarten. Die Reihenfolge, in der eine Reifenpaarung während der alternierenden Messung untersucht wird, bzw. die Wahl des Startreifens für den Vergleich kann den ermittelten Ratingwert beeinflussen. In welchen Fällen und in welchem Ausmaß dies der Fall ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit noch nicht abschließend geklärt werden. Bestehende Erklärungsansätze werden im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellt.

Tabelle 4.4: Ratingwerte aus dem jeweils paarweisen Vergleich der Reifenvarianten zum Nachweis der Reproduzierbarkeit für die verschiedenen Belastungsarten. Die Buchstabenkürzel stellen die interne Kennung für den jeweiligen Reifen dar, * bzw. - kennzeichnet, ob die abwechselnde Messung mit der erst- bzw. zweitgenannten Reifenvariante des Vergleichs begonnen wurde.

Rating	Antreiben			Bremsen			Seitenführung		
	$\frac{BWF}{BWE}$	$\frac{BWE}{BWD}$	$\frac{BWD}{BWF}$	$\frac{BWF}{BWE}$	$\frac{BWE}{BWD}$	$\frac{BWD}{BWF}$	$\frac{BWF}{BWE}$	$\frac{BWE}{BWD}$	$\frac{BWD}{BWF}$
Start mit									
* —	101%	80%	116%	103%	75%	115%	109%	93%	93%
Start mit									
* —	97%	82%	116%	102%	77%	116%	110%	96%	90%
Start mit									
— *	98%	89%	118%	105%	88%	116%	113%	101%	94%

4.3.5 Validierung

Zur Validierung des entwickelten Verfahrens wurden verschiedene Spikereifen gegen einen Referenz-Spikereifen in Serienkonfiguration getestet, die Betriebsparameter wurden wie in Tabelle 4.5 aufgeführt gewählt. Alle Spikereifen basieren auf demselben Grundreifen der Dimension 205/55 R 16 und unterscheiden sich in der Geometrie der Spikepins und der Spikekörper sowie in den eingestellten Spikeüberständen. Für die Korrelationsbetrachtung wurden Ergebnisse aus dem Fahrzeugversuch herangezogen, die dort mit den identischen Reifen ermittelt wurden²¹. Da für die Untersuchung der Seitenkraftübertragung im Fahrzeugversuch kein etabliertes Verfahren zur Bestimmung von objektiven Messwerten zur Verfügung stand, wurde hier als Vergleichsbasis vor der Durchführung der Messungen am Innentrommelprüfstand eine Prognose der erwarteten Ratingwerte erstellt. Diese Prognose basiert auf Einschätzungen mehrerer Experten aus der Spikereifenentwicklung.

Tabelle 4.5: Parameterwerte für das Messprogramm zur Validierung des Messverfahrens für die Kraftübertragung auf Eis

Parameter	Wert	Einheit
Radlast	4.600	N
Fülldruck	2,2	bar
Fahrgeschwindigkeit	20	km/h
Temperatur	-4	°C

Die Korrelationsbetrachtung, wie im Folgenden beschrieben, vergleicht die am Prüfstand ermittelten Ratingwerte mit den im Fahrzeugversuch ermittelten bzw. den abgeschätzten für die Seitenkraftübertragung. Die Ratingwerte für den Laborversuch ergeben sich, wie in Kap. 4.3.3 erläutert, durch einen Vergleich der mittleren Reibwerte von Referenzreifen

²¹ Die Ergebnisse wurden freundlicherweise von der Continental Reifen Deutschland GmbH zur Verfügung gestellt

und Variante. Im Fahrzeugversuch wird der Ratingwert durch einen Vergleich der Brems- bzw. Beschleunigungsstrecken ermittelt. Diese Strecken sind proportional zur mittleren Beschleunigung während der jeweiligen Messung und somit zum vorliegenden mittleren Reibwert.

In Abbildung 4.14 sind für den Fall der Antriebs- und der Bremskraftübertragung die am Prüfstand ermittelten Ratingwerte über den im Fahrzeugversuch ermittelten aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sowohl für den Fall der Antriebskraft- als auch für den der Bremskraftübertragung gute Korrelationswerte erreicht werden. Allerdings werden diese für die Antriebskraftübertragung in großem Maße durch die zwei stark spreizenden Varianten verursacht. Die nahe beieinander liegenden Werte im Zentrum lassen keinen eindeutigen linearen Zusammenhang erkennen.

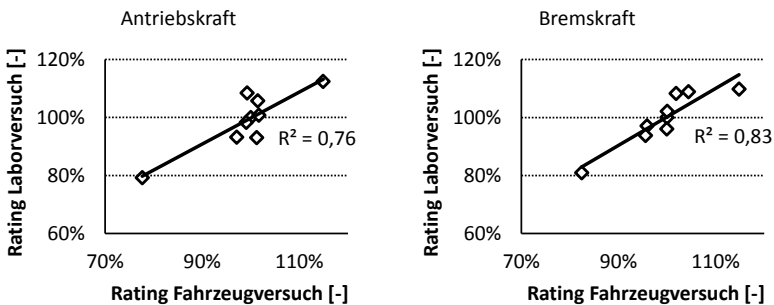


Abbildung 4.14: Korrelation zwischen den im Labor- bzw. im Fahrzeugversuch ermittelten Ratingwerten

Die Ursache wird in Abweichungen der ermittelten Ratingwerte vermutet, die sich bei Werten nahe 100% stärker auswirken als in größerem Abstand zur Referenz. Diese Abweichungen kommen zum einen durch Streuungen der ermittelten Ratingwerte zustande, die sowohl im Fahrzeug- als auch im Laborversuch auftreten, zum anderen können sie durch Unterschiede in der Versuchsanordnung verursacht werden. Während im Fahrzeugversuch das Fahrzeug aus dem Stillstand beschleunigt wird, wird im Prüfstandsversuch der Antriebsschlupf bei konstanter Fahrbahngeschwindigkeit durchfahren. Dadurch ergeben sich unterschiedliche

Schlupfverhältnisse, die sich auf den Ratingwert auswirken können, wobei insbesondere bei Reifen mit ähnlichen Reibwertniveaus eine starke Beeinflussung zu erwarten ist. Für die Bremskraftübertragung zeigen auch die Reifenvarianten mit einem Ratingwert nahe 100% deutlich die lineare Abhängigkeit.

Da für die Seitenkraftübertragung keine objektiven Messergebnisse aus dem Fahrzeugversuch verfügbar waren, wurden, wie oben erwähnt, prognostizierte Ratingwerte für die Validierung verwendet. Die Korrelation der am Prüfstand ermittelten Ratingwerte mit den prognostizierten ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Es zeigt sich eine relativ gute Korrelation, die mit dem Verfahren bestimmten Ratingwerte können als plausibel angesehen werden.

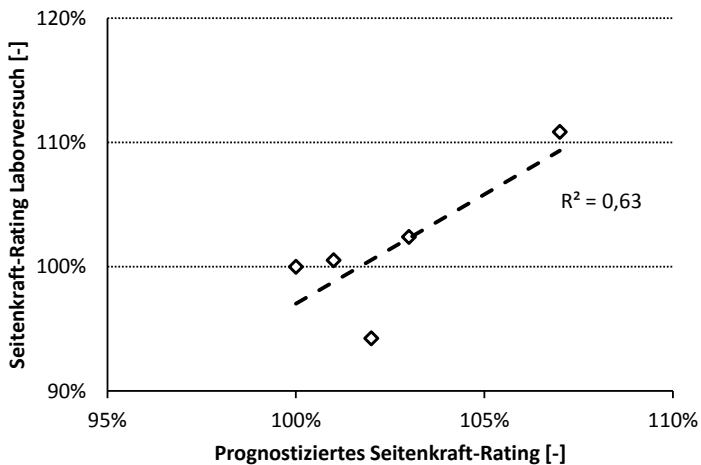


Abbildung 4.15: Korrelation zwischen den im Laborversuch ermittelten und den für die Seitenkraftübertragung prognostizierten Ratingwerten

4.3.6 Erwartete Genauigkeit und Geltungsbereich

Für die Versuche zur Validierung des Verfahrens und die in Abschnitt 5.2 dargestellten Parameterstudien wurden Reifen der Dimension

205/55 R 16 verwendet. Basierend auf Erfahrungen aus anderen Reifenuntersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass das Verfahren auch für abweichende Reifendimensionen seine Validität behält. Beim Vergleich von Reifen deutlich unterschiedlicher Dimensionen ist zu beachten, dass die Krümmung der Innentrommel sich für Reifen unterschiedlicher Dimensionen in unterschiedlicher Weise auswirkt. Aufgrund des großen Trommeldurchmessers beim hier verwendeten Prüfstand ist der Einfluss jedoch als gering anzusehen.

Die Fahrbahngeschwindigkeit betrug bei den dargestellten Messungen 20 km/h. Bei einer Variation der Fahrbahngeschwindigkeit ohne Anpassung der Schlupf- bzw. Raddrehzahlvorgabe in der Messprozedur ist von einer starken Beeinflussung der gemessenen Reibwerte auszugehen. Während der Verfahrensentwicklung hat sich jedoch gezeigt, dass eine ähnliche Qualität der Messergebnisse erzielt werden kann, wenn die Verstellung des Schlupfes innerhalb der Messprozedur mit der Fahrgeschwindigkeit verändert wird. Damit wird die Schlupfverteilung über den Trommelumfang konstant gehalten und eine vergleichbare Fahrbahnbeanspruchung realisiert.

Die Wiederholgenauigkeit des Verfahrens liegt, wie in Abschnitt 4.3.4 gezeigt, im Mittel bei ca. 2 Prozentpunkten bezogen auf den Ratingwert. Dieser Wert bestätigte sich auch in den Parameterstudien. Inwiefern und in welchen Fällen die Reihenfolge der Versuche mit den zu vergleichenden Reifen den Ratingwert beeinflusst, konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschließend geklärt werden. Einige Aspekte, die zu einem unterschiedlichen Rating abhängig von der Testreihenfolge führen können, werden im Rahmen der Diskussion der Parameterstudienergebnisse in Abschnitt 5.1 erläutert.

4.3.7 Bewertung und Abgrenzung zu bestehenden Verfahren

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die Untersuchung der Kraftübertragung an Spikereifen unter Laborbedingungen. Im Gegensatz zu den bestehenden Verfahren im Fahrzeugversuch können die Umgebungsbedingungen mit verhältnismäßig kleinen Abweichungen eingestellt werden.

Außerdem sind Versuche unabhängig von den Außenbedingungen ganzjährig durchführbar. Lediglich bei sehr hohen Außentemperaturen sind sehr tiefe Temperaturen im Prüfstand nicht mehr reproduzierbar einzustellen.

Das Verfahren zur Untersuchung der Umfangskraftübertragung liefert grundsätzlich plausible Ergebnisse. Die Korrelation zwischen Ratingwerten, die mit dem vorgestellten Verfahren bestimmt wurden, und den im Fahrzeugversuch bestimmten ist insbesondere für die Bremskraftübertragung als gut zu bewerten. Das Verfahren bildet also die Realität im Fahrzeugversuch in ausreichend gutem Maße ab. Für die Antriebskraftübertragung sind die ermittelten Korrelationswerte schlechter, insbesondere für nur schwach spreizende Varianten. Wie in Abschnitt 4.3.5 bereits erläutert, ist diese Diskrepanz über Unterschiede in den Versuchsbedingungen bzw. dem Versuchsablauf zwischen Fahrzeug- und Prüfstandsversuch zu erklären.

Neben der Untersuchung der Umfangskraftübertragung ermöglicht das vorgestellte Verfahren zusätzlich die objektive Quantifizierung der Seitenkraftübertragung. Diese wird im Fahrzeugversuch üblicherweise nur subjektiv durch Handlingversuche bewertet. Die erzielten Ergebnisse sind plausibel und stimmen gut mit den erwarteten Verhältnissen zwischen den untersuchten Reifen überein.

4.4 Messverfahren für den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen

Das Messverfahren zur Bestimmung des Fahrbahnverschleißes an Spikereifen orientiert sich an einem bestehenden Verfahren im Fahrzeugversuch, das von UNHOLA ET AL. entwickelt wurde [96], [98] und von der Firma Test World kommerziell angeboten wird [94]. Der durch einen Spikereifen verursachte Fahrbahnverschleiß wird über den Gewichtsverlust von Steinplatten quantifiziert, die mit dem Reifen überfahren werden. Im Fahrzeugversuch sind die Spikereifen an einem Fahrzeug montiert, das über die in den Boden eingelassenen Probenkörper aus Stein fährt. Da viele Überrollungen nötig sind, um ausreichende Verschleißmengen an

den Probenkörpern zu erzielen, ist der Fahrzeugversuch mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Eine ähnliche Versuchsanordnung im Innentrommelprüfstand des KIT ermöglicht eine deutlich effizientere Untersuchung des Verschleißes. Im Folgenden wird das realisierte Labormessverfahren beschrieben.

4.4.1 Messaufbau

Als Messumgebung für die Untersuchungen zum Fahrbahnabrieb dient der Innentrommelprüfstand wie oben dargestellt. Der zu untersuchende Reifen läuft dabei auf einer in der Trommel installierten Fahrbahn, die an einer Stelle unterbrochen ist, um die Probenkörper zu installieren.

Bei den Probenkörpern handelt es sich um kleine Granit-Steinplatten mit definierter Geometrie, die an der Oberseite mit einem definierten Sägemuster versehen sind. Somit ergibt sich an der Plattenoberfläche eine Textur aus kleinen Klötzchen, die die Rauigkeiten auf einer realen Fahrbahnoberfläche repräsentieren. Abbildung 4.16 zeigt schematisch eine solche Oberflächenstruktur²². Die Klötzchen verschleifen durch das Überrollen mit dem Spikereifen in erster Linie an den Kanten, sodass sie sich mit zunehmender Überrollungszahl abrunden.

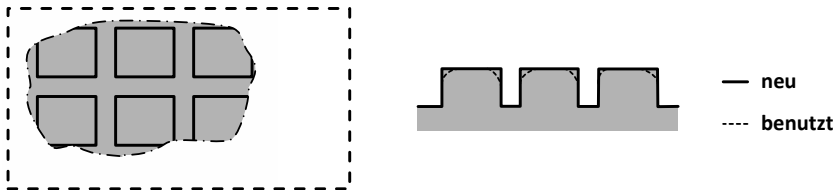


Abbildung 4.16: Beispielhafte Oberflächentextur eines Probenkörpers in der Draufsicht (links) und in der Seitenansicht (rechts, vgl. [29])

²² Die Kantenlänge der Klötzchen liegt bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Probenkörpern in einem Größenbereich, der vergleichbar mit den üblicherweise in Fahrbahndeckschichten verwendeten Gesteinskörnungen ist. Die detaillierte Geometrie der Probenkörper kann hier aus Gründen der Geheimhaltung nicht gezeigt werden.

4.4 Messverfahren für den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen

Die Probenkörper werden von einer Halterung in ihrer Position auf der Trommelinnenseite gehalten. Diese besteht aus einer Grundplatte, auf der die Probenkörper aufliegen, und einem Rahmen, mit dem die Probenkörper auf die Grundplatte gespannt werden. Um ein Abreiben der Platten am Rahmen zu verhindern, ist dieser an allen Stellen, die mit den Probenkörpern in Kontakt stehen, mit Gummi ausgekleidet. Zwischen den Probenkörpern und der Grundplatte wird ein dünnes Gummituch eingelegt, um einerseits Abrieb zu vermeiden, andererseits aber keine ungewünschten Elastizitäten einzubringen. Abbildung 4.17 zeigt die Positionierung der Probenkörper. In Fahrtrichtung gesehen werden drei Reihen mit jeweils zwei Probenkörpern eingebaut. Die einzelnen Probenkörper werden markiert, um sie auch zu einem späteren Zeitpunkt einem bestimmten Versuchsdurchlauf und einer bestimmten Einbauposition zuordnen zu können. Die Markierung setzt sich dabei aus einem zweistelligen fortlaufenden Buchstabenkürzel für den jeweiligen Versuchslauf und einer Zahl für die Einbauposition zusammen.

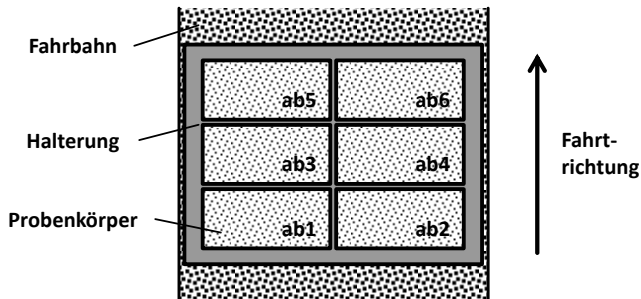


Abbildung 4.17: Anordnung der Probenkörper in der Halterung (vgl. [29])

Während die Probenkörper zur Quantifizierung des Verschleißes verwendet und für jede Messung ausgetauscht werden, dient die Fahrbahn, mit der der größte Teil des Trommelumfangs ausgekleidet ist, lediglich als Lauffläche für die Reifen, um die Trommel zu schützen und einen einheitlichen Trommelradius herzustellen. Die Fahrbahn besteht aus einzelnen Stahlkassetten, die mit Asphalt aufgefüllt sind. Der Aufbau entspricht den Fahrbahnsegmenten, die verwendet werden, um Reifen am Innen-

trommelprüfstand auf verschiedenen realen Fahrbahntypen zu testen. Eines der Fahrbahnsegmente wurde gekürzt, um Platz für die Probenkörperhalterung zu schaffen.

Da bei trockenem Abrollen des Reifens auf den Steinplatten eine Anlagerung von Reifengummi auf den Probenkörpern beobachtet werden konnte und so der Gewichtsverlust durch die Schädigung der Steinplatten nicht einwandfrei bestimmt werden kann, werden die Versuche bei nasser Fahrbahn durchgeführt. Hierzu wird eine Bewässerung in der Trommel installiert, die ständig Wasser zuführt und so die Fahrbahn stets feucht hält.

Als Temperaturbereich für die Versuche wurde der Bereich zwischen 5 und 10 °C gewählt. Für deutlich höhere Temperaturen besteht die Gefahr, dass sich das Bitumen der Asphaltfahrbahn an den Spikes anlagert, was zu einer Veränderung der Schärfe der Spikes und somit zu einer Beeinflussung der Messergebnisse führen könnte. Für Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts ist mit einem Anfrieren des Wassers zur Befeuchtung der Fahrbahn zu rechnen.

Während der Reifen bzw. die Radführung im Innentrommelprüfstand bei Kraftschlussuntersuchungen üblicherweise in Querrichtung arretiert ist, wurde für die Untersuchung des Fahrbahnverschleißes eine Vorrichtung zur gezielten Querverstellung des Reifens eingebaut. Dabei handelt es sich um einen Hydraulikzylinder, mit dem der Reifen während der Messungen kontrolliert in Querrichtung verfahren werden kann. So lässt sich verhindern, dass der Reifen und somit die Spikes auf der Reifenlauffläche stets in einer Spur laufen und sich diskrete Rillen in der Fahrbahn bilden bzw. die Spikes in einer Rille des Sägemusters auf die Probenkörper treffen. Beides würde den Gewichtsverlust der Probenkörper entscheidend beeinflussen.

4.4.2 Messprozedur

Für jede Variante aus Reifen und Betriebsparametern, die untersucht wird, kommt ein neuer Satz von sechs Probenkörpern zum Einsatz. Die Probenkörper werden vor Beginn des Versuchs gewogen – für nähere In-

formationen zum Wiegeprozess wird auf den folgenden Abschnitt verwiesen – und dann mit der Halterung in der Trommel befestigt. Nachdem die Trommel und der Reifen auf die gewünschte Prüfgeschwindigkeit beschleunigt sind, wird der Reifen über ein Steuerprogramm auf die jeweilige Radlast abgesetzt. Der Sturz- oder der Schräglaufwinkel können vor oder während des Versuchsablaufs eingestellt oder verstellt werden, für die im Folgenden dargestellten Untersuchungen wurden diese Größen jedoch nicht variiert. Zusätzlich zu der Radlast kann über den Radantrieb eine Umfangskraft während oder während der kompletten Versuchsdauer aufgebracht werden.

Gleichzeitig wird mit der oben erwähnten Vorrichtung zur Querverstellung die Radführung kontinuierlich in einer oszillierenden Bewegung quer zur Fahrtrichtung verstellt, um den Verschleiß gleichmäßig über die Fahrbahnbreite zu verteilen. Die Verstellgeschwindigkeit kann hier über ein Drosselventil justiert werden. Nach der Zeitspanne, die benötigt wird, um bei der gegebenen Versuchsgeschwindigkeit die gewünschte Überrollungszahl zu erreichen, wird das Rad durch das Steuerprogramm wieder abgehoben und die Platten können zur Auswertung demontiert werden.

4.4.3 Auswertung

Ziel der Auswertung ist es, den Massenverlust der einzelnen Probenkörper und daraus einen Wert für den Fahrbahnverschleiß durch den jeweiligen Spikereifen zu bestimmen. Da die Fahrbahn während des Versuchs wie oben erwähnt bewässert wird, sind die Probenkörper nach dem Versuch zunächst durchnässt. Um das Gewicht der verschlissenen Probenkörper mit dem der trockenen, unbenutzten vor dem Versuch zu vergleichen, müssten sie also zuerst vollständig getrocknet werden, was mit Aufwand verbunden ist und zusätzliche Zeit in Anspruch nimmt, sodass die Ergebnisse erst einige Stunden oder Tage nach der Überrollung am Prüfstand zur Verfügung stünden. Dies ist insbesondere während der Entwicklung des Verfahrens von großem Nachteil, da hier rasch ausgewertete Messergebnisse benötigt werden, um eventuelle Anpassungen an der Messprozedur vornehmen zu können.

Gewichtsbestimmung in teilweise trockenem Zustand

Aus diesem Grund wurde eine Auswertemethode entwickelt, mit der der Gewichtsverlust zeitnah nach dem Ende des Prüfstandsversuchs bestimmt werden kann. Dabei werden die Probenkörper nicht in komplett trockenem sondern in teilweise feuchtem Zustand gewogen. Für eine reproduzierbare Wägung ist es in jedem Fall erforderlich, die Oberfläche der Probenkörper abzutrocknen, um anhaftendes Wasser zu entfernen. Dies geschieht im vorliegenden Fall durch Abblasen mit Druckluft. Da die Oberfläche der verwendeten Steinplatten ihre Farbe deutlich sichtbar ändert, wenn sie nass ist, kann optisch die Trockenheit der Oberfläche leicht überprüft werden. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 4.18 ein Probenkörper während des Trocknungsvorgangs dargestellt.

Nach dem Abtrocknen der Oberfläche verbleibt eine gewisse Restwassermenge im Kern des Probenkörpers, was aber bezüglich der Bestimmung des Massenverlusts kein Problem darstellt, solange die verbleibende Wassermenge reproduzierbar eingestellt werden kann. Für die Wägung kommt eine Präzisionswaage zum Einsatz, die eine Anzeigegenauigkeit von 0,001 g und eine Eichgenauigkeit von 0,01 g aufweist. Es ist also bei der Bestimmung einer Gewichts Differenz eines Probenkörpers von einer Messungenauigkeit von maximal 0,01 g auszugehen.



Abbildung 4.18: Probenkörper während des Trocknungsvorgangs, trockene und nasse Bereiche der Oberfläche sind leicht zu unterscheiden.

Gewichtszunahme durch Wässern der Probenkörper

Um die Aussagefähigkeit des Verfahrens nachzuweisen, wurden verschiedene Vorversuche durchgeführt. Zum einen wurde die Gewichtszunahme verschiedener Probenkörper durch die Lagerung in Wasser untersucht. Dazu wurden die Probenkörper in komplett trockenem Zustand in Wasser gelegt und nach verschiedenen Zeitintervallen gewogen. Für die Wägung wurde die Probe jeweils oberflächlich abgetrocknet, wie oben beschrieben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

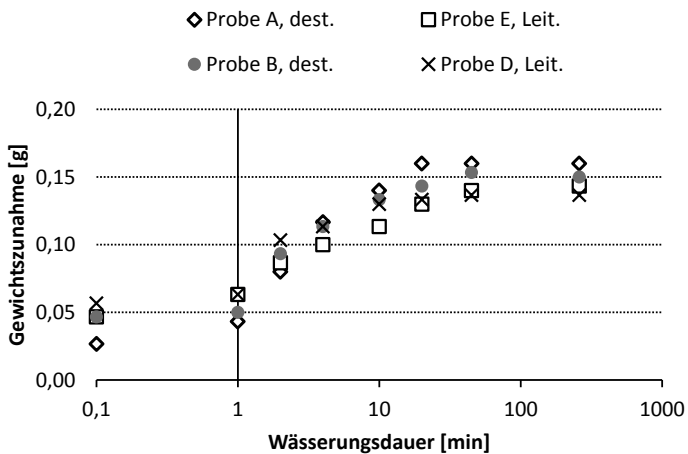


Abbildung 4.19: Gewichtszunahme der oberflächlich abgetrockneten Probenkörper in Abhängigkeit der Wässerungsdauer mit destilliertem (dest.) und Leitungswasser (Leit.)

Es zeigt sich, dass das so bestimmte Gewicht des Probenkörpers mit der Verweildauer im Wasser zunimmt, da der Kern zunehmend durchfeuchtet wird. Nach einer Zeit von ca. vier Stunden ist ein konstanter Wert erreicht, der sich dann auch bei mehrfacher Messung nicht mehr deutlich verändert. Basierend auf diesen Erkenntnissen, werden die Probenkörper für die Untersuchungen mit dem beschriebenen Testverfahren bereits am Tag vor der eigentlichen Versuchsdurchführung in Wasser gelagert, so-

dass zum Zeitpunkt der Wägung vor dem Versuch von einer kompletten Durchfeuchtung der Platte ausgegangen werden kann.

Um den Einfluss eventueller Ablagerungen aus dem Leitungswasser zu untersuchen, wurde bei zwei Probenkörpern destilliertes Wasser verwendet. Hier ist in der Gewichtszunahme durch die Durchfeuchtung weder ein qualitativer noch ein quantitativer Unterschied zu erkennen. Der Gewichtsunterschied zwischen einem komplett trockenen Probenkörper und einem mit komplett durchfeuchteten Kern liegt bei ca. 0,15 g was, bezogen auf das Probenkörpergewicht von ca. 250 g, einer relativen Gewichtszunahme von 0,6 ‰ entspricht.

Gewichtsabnahme bei Trocknung der Probenkörper

Analog zur Untersuchung der Gewichtszunahme durch die Wasseraufnahme wurde die Gewichtsabnahme durch das Trocknen untersucht. Dabei wurden die Probenkörper im Endzustand der vorigen Untersuchung, d.h. mit komplett durchfeuchtetem Kern und abgetrockneter Oberfläche, bei Raumtemperatur gelagert und nach verschiedenen Zeitintervallen das Gewicht ermittelt. Abbildung 4.20 zeigt die Ergebnisse.

Auch hier lässt sich erkennen, dass alle Probenkörper in gleichem Maße das zusätzliche Gewicht durch das aufgenommene Wasser wieder verlieren. Nach spätestens 3000 Minuten, entsprechend 50 Stunden, kann keine bedeutsame Gewichtsveränderung mehr beobachtet werden. Im Rahmen der Messgenauigkeit erreichen alle Probenkörper das Ausgangsgewicht vor der Wässerung, sowohl beim Versuch mit Leitungswasser als auch bei dem mit destilliertem Wasser. Es ergeben sich also auch bei der Verwendung von Leitungswasser bei den Abriebversuchen keine Einflüsse durch mineralische Ablagerungen.

Basierend auf diesen Voruntersuchungen kann festgehalten werden, dass die zuverlässige und rasche Bestimmung des Gewichtsverlusts eines Probenkörpers über die beschriebene Wägung nach teilweiser Trocknung möglich ist.

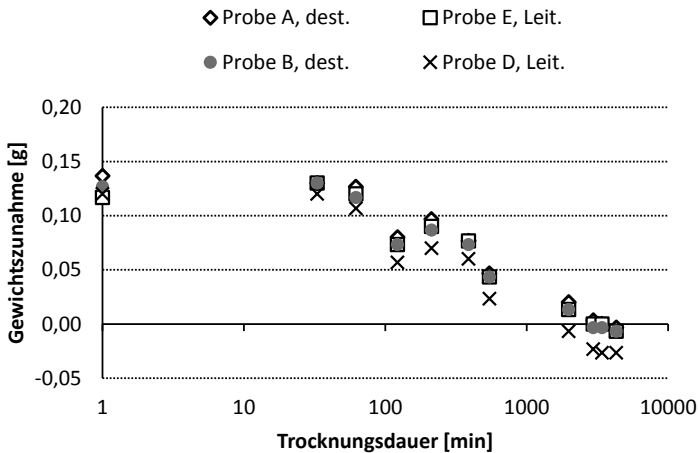


Abbildung 4.20: Abnahme des Gewichts der Probenkörper in Abhängigkeit der Trocknungsdauer

Bestimmung des Verschleißwertes

Um nun einen Wert für den durch einen Spikereifen verursachten Fahrbahnverschleiß zu erhalten, werden die Gewichtsverluste der einzelnen Probenkörper miteinander verrechnet. Dazu werden, wie in Abbildung 4.21 skizziert, die Gewichtsverluste der beiden Probenkörper einer Reihe aufsummiert, über die Werte der drei hintereinander überfahrenen Reihen wird ein Mittelwert bestimmt.

Im Folgenden werden aus Gründen der Geheimhaltung nicht die absoluten Verschleißwerte angegeben sondern relative Werte, bezogen auf den Verschleiß, der von einem als Referenz dienenden Reifen verursacht wurde.

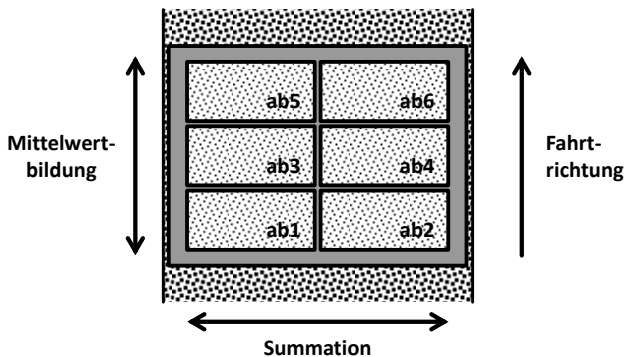


Abbildung 4.21: Systematik der Auswertung für die Abriebsversuche

4.4.4 Reproduzierbarkeit des Verfahrens

Um die Reproduzierbarkeit des Verfahrens zu untersuchen, wurde an zwei vergleichbaren Sätzen von Probenkörpern der Gewichtsverlust nach verschiedenen Überrollungszahlen bestimmt. Die verschiedenen Sätze von Probenkörpern werden mit Buchstabenkürzeln aus zwei Kleinbuchstaben bezeichnet. Um Abrieb der Steinplatten an der Halterung auszuschließen, wurde zudem ein Satz mit einem unbespikten Reifen überrollt. Des Weiteren wurde zu Vergleichszwecken ein Satz von Probenkörpern eines anderen Herstellers mit leicht abweichender Oberflächentextur untersucht. Für alle Versuche mit Spikereifen wurde der identische Spikereifen verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.22 dargestellt.

Es lässt sich erkennen, dass die vergleichbaren Sätze *ac* und *ad* eine sehr gute Übereinstimmung bezüglich des Gewichtsverlusts aufweisen, insbesondere bei den mittleren Überrollungszahlen. Für die kleine Überrollungszahl von 200 kann die Abweichung durch einen größeren Einfluss von Unregelmäßigkeiten im Messablauf erklärt werden. Für die untersuchten Überrollungszahlen oberhalb von 200 liegt die relative Abweichung der Verschleißwerte im Mittel unter 3%.

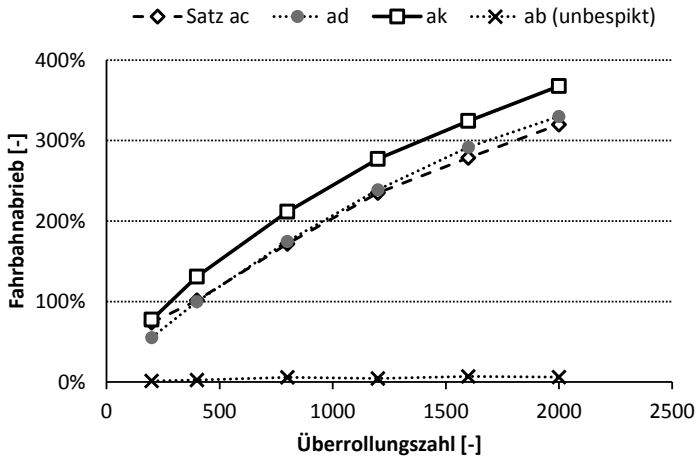


Abbildung 4.22: Relative Verschleißwerte für verschiedene Sätze von Probenkörpern nach bestimmten Anzahlen von Überrollungen mit einem Spikereifen bzw. einem unbespikten Reifen. Als Vergleichswert dient der Wert des Satzes *ac* nach 400 Überrollungen

Des Weiteren wird deutlich, dass der Einfluss auch nur leicht unterschiedlicher Oberflächentexturen bei den Probenkörpern des zweiten Herstellers (Satz *ak*) die Streuung des Messverfahrens bei Weitem übersteigt. Deshalb kamen für die Validierung des Verfahrens (s. Abschnitt 4.4.5) und die Parameterstudien (s. Abschnitt 5.2) jeweils nur Probenkörper eines Herstellers und einer Charge zum Einsatz, die sich in der Oberflächentextur nur in geringem Maße unterscheiden.

Einfluss der Überrollungszahl

Allgemein ist in den Kurvenverläufen eine leicht degressive Tendenz zu erkennen, d.h. der Massenverlust pro Überrollung sinkt mit zunehmender Überrollungszahl. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Verschleiß der Probenkörper weniger auf der ebenen Oberfläche als an den Kanten des Sägemusters stattfindet. Diese werden mit zunehmendem Verschleiß immer weiter abgestumpft und bieten weiterem Verschleiß somit einen

höheren Widerstand. Für Überrollungszahlen bis hinauf zu 1200 zeigt sich eine annähernd lineare Abhängigkeit des Verschleißwerts von der Überrollungszahl.

Einfluss der Halterung und der Gummireibung des Reifens

Betrachtet man die Verschleißwerte bei Überfahrt mit einem unbespikten Reifen, so unterscheiden sich diese nicht signifikant von null. Es kann also gefolgert werden, dass weder der unbespikte Reifen noch die Halterung der Probenkörper für die betrachteten Überrollungszahlen einen signifikanten Verschleißanteil erzeugt. Der gesamte bestimmte Massenverlust der Probenkörper ist auf die Belastung durch die Spikes im Spikereifen zurückzuführen.

4.4.5 Validierung

Zur Validierung des Messverfahrens wurde ein Programm aus sieben Reifen sowohl am Innentrommelprüfstand als auch im Fahrzeugversuch untersucht. Die untersuchten Reifen basieren auf zwei verschiedenen Grundreifen, in die Spikes mit unterschiedlicher Spikepeingometrie sowie in unterschiedlicher Einbausituation und Anzahl eingesetzt wurden. Die Untersuchungen im Fahrzeugversuch wurden mit dem in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Verfahren durchgeführt²³. Im Folgenden werden für die Ergebnisse, sowohl aus dem Prüfstands- als auch aus dem Fahrzeugversuch, relative Werte angegeben. Als Referenz dient in beiden Fällen ein identischer Serien-Spikereifen der Dimension 205/55 R 16 mit 128 Spikes.

Die Betriebsparameter wurden für die Versuche am Innentrommelprüfstand so festgelegt, dass die am Fahrzeug vorliegende Situation möglichst gut abgebildet wird. So wurden Reifenfülldruck und die Radlast vergleichbar zu den Werten des Fahrzeugversuchs gewählt. Da beim Fahrzeugversuch die Platten jeweils vom Vorder- und Hinterrad einer Fahr-

²³ Die Messungen wurden im Auftrag der Continental Reifen Deutschland GmbH durchgeführt. Die Ergebnisse wurden freundlicherweise für die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung gestellt.

4.4 Messverfahren für den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen

zeugseite überrollt werden, wurde am Prüfstand die Hälfte der Überrollungen mit nicht angetriebenem Rad – entsprechend der nicht angetriebenen Achse am Fahrzeug – durchgeführt, für die zweite Hälfte der Überrollungen wurde eine Umfangskraft aufgebracht, die der erwarteten Antriebskraft des Versuchsfahrzeugs an einem Rad der Antriebsachse entspricht.

Am Prüfstand wurde die Fahrbahnschädigung für zwei verschiedene Überrollungszahlen erfasst: zum einen für die auch im Fahrzeugversuch verwendeten 400 Überrollungen, zum andern für eine Überrollungszahl von 1200. Für letztere wird eine geringere Beeinflussung durch einmalige oder unregelmäßig auftretende Fehler erwartet, es kann aber, basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.4.4 immer noch von einem annähernd linearen Einfluss der Überrollungszahl ausgegangen werden. In Tabelle 4.6 sind die Verfahrensparameter für das Validierungsprogramm nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4.6: Parameterwerte für das Messprogramm zur Validierung des Messverfahrens für den Fahrbahnverschleiß

Parameter	Wert	Einheit
Radlast	4.600	N
Fülldruck	2,2	bar
Fahrgeschwindigkeit	100	km/h
Antriebskraft	220	N
Temperatur	5	°C

In Abbildung 4.23 sind die relativen Verschleißwerte aus dem Laborversuch über den Werten aus dem Fahrzeugversuch für die beiden untersuchten Überrollungszahlen aufgetragen. Für die Validierung des Verfahrens wurde auch hier die Korrelation der Ergebnisse der beiden Verfahren untersucht, wie bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben. Es zeigt sich in beiden Fällen eine gute Übereinstimmung, wobei der Korrelationskoeffi-

zient für die hohe Überrollungszahl am Prüfstand deutlich besser ausfällt. Wie oben bereits vermutet, scheinen sich hier Unregelmäßigkeiten weniger stark auszuwirken.

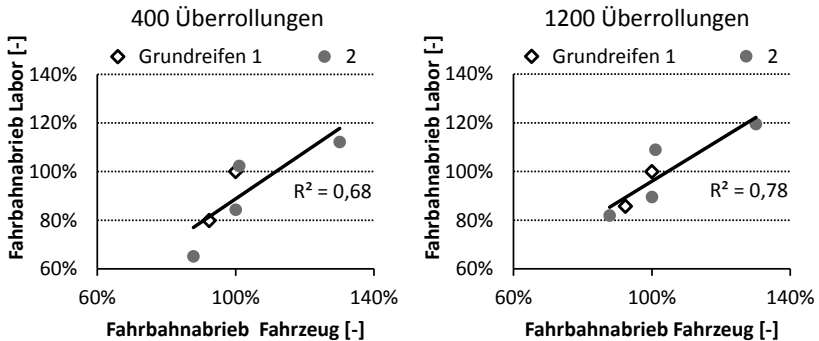


Abbildung 4.23: Korrelation zwischen den im Laborversuch und den im Fahrzeugversuch ermittelten Verschleißwerten, jeweils bezogen auf den Wert des Referenzreifens

4.4.6 Erwartete Genauigkeit und Geltungsbereich

Die Validierung des Verfahrens sowie ein Großteil der bisherigen Versuche wurde an Reifen der Dimension 205/55 R 16 und 205/60 R 16 durchgeführt. Somit ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in erster Linie für diese Reifendimensionen gegeben. Auch für abweichende Reifendimensionen ist eine gute Aussagefähigkeit zu erwarten. Zwar ist je nach Außendurchmesser ein unterschiedlicher Einfluss der Trommelkrümmung zu erwarten, aufgrund des großen Trommeldurchmessers ist dieser allerdings als gering einzustufen.

Aus den in Abschnitt 4.4.4 erläuterten Versuchen zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse (s. Abbildung 4.22) ergibt sich eine mittlere Abweichung der Ergebnisse zweier vergleichbarer Probenkörpertexturen von unter 3% der ermittelten Verschleißwerte. Dies lässt sich als Maß für die Wiederholgenauigkeit des Verschleißwertes verwenden. In späteren Versuchen immer wieder durchgeführte Referenzmessungen zeigten teilwei-

se größere Abweichungen, dies ist jedoch in erster Linie auf längerfristige Veränderungen am Messaufbau zurückzuführen. Eine Fehlerquelle besteht im Verschleiß des kompletten Messaufbaus. Während der Überrollungen durch den Spikereifen werden nicht nur die Probenkörper sondern auch die umgebende Fahrbahn im Prüfstand verschlissen. Erste Erfahrungswerte aus den Versuchen legen eine Verschleißrate von ca. 0,3 mm pro 10^5 Überrollungen nahe. Durch den Verschleiß der Fahrbahn ergibt sich ein Überstand der Probenkörper über das Fahrbahnniveau, der nur in begrenztem Maße ausgeglichen werden kann. Durch die sich ergebende Stufe und die damit stärkere Belastung der Probenkörper ist ein höherer Verschleiß zu erwarten. Um dem entgegenzuwirken, wurden die Fahrbahnkassetten in den Bereichen vor und hinter der Probenkörperhalterung mit Kunstharz auf das Niveau der Probenkörper aufgefüllt. Das Kunstharz ist nach ersten Beobachtungen deutlich verschleißfester als die Asphaltfahrbahn und die Auswirkungen der Fahrbahnabnutzung somit eingedämmt.

Die aufgrund der Wägung zu erwartenden Abweichungen liegen, wie in Abschnitt 4.4.3 gezeigt, eine Größenordnung unter den im Versuch beobachteten Streuungen. Es ist also von keinem signifikanten Einfluss seitens der Prozedur zur Gewichtsbestimmung auszugehen.

4.4.7 Bewertung und Abgrenzung zu bestehenden Verfahren

Mit dem vorgestellten Prüfverfahren kann die Fahrbahnschädigung quantifiziert werden, die durch die Überfahrt eines mit Spikereifen ausgestatteten Fahrzeugs verursacht wird. Der Prüfstand als Versuchsumgebung ermöglicht einen Testbetrieb unabhängig von klimatischen Bedingungen und der Jahreszeit. Außerdem können die Umgebungs- und die Betriebsbedingungen in deutlich weiteren Grenzen eingestellt werden, als dies im Fahrzeugversuch der Fall ist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit handelt es sich bei dem vorgestellten Verfahren um das einzige bekannte, einsatzbereite Verfahren zur Untersuchung des Fahrbahnabriebs von Spikereifen unter Laborbedingungen.

Im Gegensatz zu Labormessverfahren, die in der Vergangenheit Anwendung fanden, wird der Fahrbahnverschleiß im vorliegenden Fall über definierte Probenkörper anstelle von kompletten Fahrbahnen oder großen Teilen einer Fahrbahn bestimmt. Dadurch verringert sich der Aufwand in der Auswertung. Außerdem können die Probenkörper komplexer und spezifischer gestaltet werden.

Verglichen mit den in Abschnitt 2.5.2 erwähnten etablierten Methoden aus dem Fahrzeugversuch, ermöglicht das hier vorgestellte Verfahren eine deutlich gesteigerte Effizienz. Beim Abrollen des Reifens auf der Innentrommel können die zur statistischen Absicherung geforderten Überrollungszahlen in kurzer Zeit erreicht werden. Somit ergibt sich gegenüber dem Fahrzeugversuch eine deutliche Zeit- und Kostenersparnis.

Die Reproduzierbarkeit der mit dem Verfahren gemessenen Verschleißwerte ist wie in Abschnitt 4.4.4 gezeigt gut, die mittlere Abweichung der gemessenen Werte liegt unter 3%. Auch die Korrelation der mit dem vorgestellten Verfahren bestimmten Werte zu denen, die im Fahrzeugversuch bestimmt wurden, ist als gut zu bewerten (s. Abschnitt 4.4.5). Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Verfahren die Vorgänge und Einflüsse im realen Fahrzeugbetrieb in realistischer Weise abbildet.

5 Versuch und Erläuterung der Ergebnisse

Der Fahrbahnverschleiß, den ein Spikereifen verursacht, und die Kräfte, die von einem Spikereifen auf Eis übertragen werden können, hängen von einer Vielzahl von Parametern ab. Diese lassen sich in konstruktive Parameter, wie zum Beispiel den Spikeüberstand und die Anzahl der Spikes, und in Betriebsparameter wie Fülldruck und Radlast unterscheiden. Um die entscheidenden Einflussparameter zu identifizieren und deren Einfluss zu quantifizieren, wurden umfangreiche experimentelle Parameterstudien mit den in Kapitel 4 vorgestellten Messverfahren durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche vorgestellt, die beobachteten Parametereinflüsse diskutiert und mit Hilfe der in Kapitel 3 vorgestellten Mechanismen erklärt. Da nur eine begrenzte Anzahl von Versuchen durchgeführt werden konnte, wurden manche Parametervariationen nur in Bezug auf eine Disziplin, Eisgriff oder Fahrbahnverschleiß, untersucht.

5.1 Kraftübertragung auf Eis

Die Auswirkung verschiedener Parametervariationen auf die Kraftübertragung auf Eis wurde mit Hilfe des im vorigen Kapitel vorgestellten alternierenden Messverfahrens untersucht. Alle Varianten wurden, soweit nicht anders erwähnt, gegen denselben Spikereifen als Referenz verglichen. Dabei handelt es sich um einen Spikereifen der Dimension 205/55 R 16 in Serienbauart. Die in den Diagrammen gezeigten Ratingwerte beschreiben die mittlere Kraftübertragung der jeweiligen Variante im Vergleich zur Referenz gemäß Gleichung (4.6). Für die Referenzmessungen bzw. die nicht variierten Parameter der Variantenuntersuchungen wurden Standardwerte eingestellt, wie in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Der Spikeüberstand ist, bedingt durch den Montageprozess der Spikes, gewissen Schwankungen unterworfen, sodass sich für unterschiedliche Reifen unterschiedliche mittlere Spikeüberstände ergeben. In Abschnitt 5.1.1 wird der Einfluss des Spikeüberstands untersucht, in allen folgenden

Abschnitten wurden die ermittelten Ratingwerte gemäß dem linear interpolierten Zusammenhang zwischen Spikeüberstand und Ratingwert auf den nominellen Spikeüberstand korrigiert.

Tabelle 5.1: Standardwerte für die nicht variierten Parameter in den Parameterstudien zur Kraftübertragung auf Eis

Parameter	Standardwert	Einheit
Radlast	4.600	N
Fülldruck	2,2	bar
Fahrgeschwindigkeit	20	km/h
Temperatur	-5	°C
Spikeüberstand	1,2	mm
Spikemasse	1,1	g

5.1.1 Spikeüberstand

Zur Realisierung unterschiedlicher Spikeüberstände wurden in baugleiche Serienreifen Spikes gleicher Abmessungen und Beschaffenheit unterschiedlich tief eingesetzt. Die Änderungen der Spikeüberstände über die Messungen hinweg liegen unterhalb der Messgenauigkeit. Somit ist sichergestellt, dass stets ein konstanter Unterschied zwischen den verschiedenen Reifenvarianten besteht.

In Abbildung 5.1 sind die Ratingwerte der Überstandsvarianten für Bremsen und Antreiben bezogen auf den Referenzreifen mit Standardspikeüberstand dargestellt. Der Referenzreifen selbst ist wie üblich mit einem Ratingwert von 100% vermerkt. Der alternierende Vergleich gemäß der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorgehensweise wurde dabei je zweimal durchgeführt, wobei die Folge der abwechselnden Messungen in einen Fall mit der Referenz, im anderen Fall mit der jeweiligen Variante begonnen wurde.

Es zeigt sich zunächst ein deutlicher Anstieg der Ratingwerte mit dem Spikeüberstand, d. h. mit zunehmendem Spikeüberstand können größere Kräfte zwischen Spikereifen und Eis übertragen werden. Der Zusammenhang kann in erster Näherung als linear angenommen werden.

Dieses Verhalten ist dadurch zu erklären, dass der Spike mit höherem Überstand tiefer ins Eis eindringen kann. Die Spikekräfte, die benötigt werden, um den Spike bis auf Profilhöhe in den Reifen einzudrücken, steigen mit zunehmendem Spikeüberstand an, der potentielle Kontaktdruck zwischen Spike und Fahrbahn gemäß Gleichung (3.14) erhöht sich und der Spike dringt weiter in die Fahrbahn ein. Auch wenn man davon ausgeht, dass der Spike durch das Kratzen auf der Fahrbahn weiter in diese eindringt, ist die maximale Eindringtiefe durch den Spikeüberstand begrenzt. Schließlich sorgt ein höherer Überstand auch für einen früheren ersten Kontakt zwischen Spike und Fahrbahn. Wie Abbildung 3.2 zu entnehmen, vergrößert sich der Winkel des Aufschlagens bei höherem Spikeüberstand, sodass auch das Eindringen durch das Aufschlagen auf die Eisfahrbahn unterstützt wird. Die größere Eindringtiefe führt dazu, dass gemäß der in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Mechanismen ein größeres Eisvolumen zerspant bzw. abgeschert werden muss. Dadurch ergeben sich höhere Kräfte am einzelnen Spike und somit auch am kompletten Spikereifen.

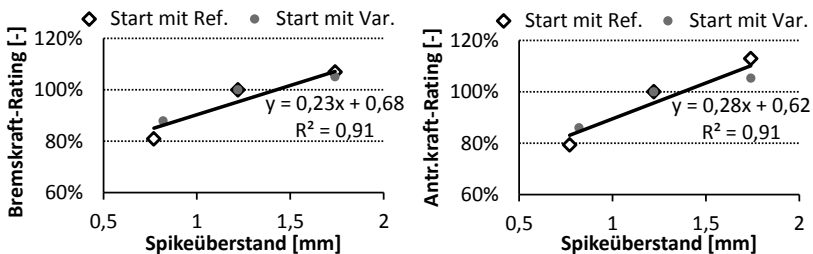


Abbildung 5.1: Einfluss des Spikeüberstands auf die übertragbaren Kräfte für Bremsen (links) und Antreiben (rechts)

Weiterhin ist in den Versuchsergebnissen zu erkennen, dass sich bei einem Start der Messprozedur mit dem Referenzreifen eine größere Sprei-

zung der Ratingwerte ergibt. Anders ausgedrückt wird in einem Vergleich zweier Reifen jener mit dem jeweils geringeren Spikeüberstand besser bewertet, wenn der Vergleich mit diesem Reifen begonnen wird. Eine Erklärung für dieses Verhalten findet sich in der Schädigung der Eisfahrbahn. Dadurch, dass die Spikes auf dem Reifenumfang in diskreten Bahnen angeordnet sind (vgl. Abbildung 2.2), steigt mit zunehmender Überrollungszahl über die Eisfahrbahn die Wahrscheinlichkeit, dass die Spikes auf eine bereits im Eis vorhandene Längsrille treffen. Dabei sinken die übertragbaren Kräfte am Spike, wobei die Auswirkung für den Spike mit geringem Überstand, der auf eine tiefe Rille trifft, die durch den Spike mit großem Überstand verursacht wurde, größer ist als umgekehrt. Aus diesem Grund profitiert der Reifen mit geringem Spikeüberstand deutlicher davon, vor dem jeweils anderen Reifen gemessen zu werden, als der Reifen mit hohem Spikeüberstand.

5.1.2 Spikemasse

Der Einfluss der Spikemasse wurde anhand von Serienreifen untersucht, bei denen Spikes eingesetzt wurden, deren Spikekörper aus verschiedenen Materialien besteht. Abweichend von Aluminium als Standardwerkstoff wurden Spikekörper aus Kunststoff für eine geringere Spikemasse und aus Stahl für eine erhöhte Spikemasse verwendet. Die verwendeten Spikepins haben jeweils die gleiche, runde Form, die Geometrie der verschiedenen Spikekörper-Typen ist nahezu identisch, sodass von einer vergleichbaren Einbettung der Spikes im Profilgummi ausgegangen werden kann.

Die Ergebnisse der Variation in Form von Ratingwerten, bezogen auf die Kraftübertragung des Standardreifens, sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Spikemasse keinen großen Einfluss auf die übertragbaren Kräfte hat. Für das Kratzen der Spikes durch das Eis bzw. das Abstützen am Eis sind seitens der Spikemasse keine bedeutenden Einflüsse zu erwarten. Hier wird, wie in Abschnitt 3.2.3 angeführt, die Geometrie des Kontakts am eingedrungenen Spike als entscheidend angesehen. Der geringe Einfluss der Spikemasse deutet also darauf hin, dass

auch die Eindringtiefe des Spikes kaum von der Spikemasse beeinflusst wird.

Dies ist der Fall, wenn entweder schon für die geringste untersuchte Spikemasse ein nahezu vollständiges Eindringen des Spikes gegeben ist, sodass durch eine Erhöhung der Spikemasse keine Verbesserung des Eindringens mehr erreicht werden kann, oder der Mechanismus des Aufschlagens für das Eindringen des Spikes grundsätzlich nur eine untergeordnete Rolle spielt.

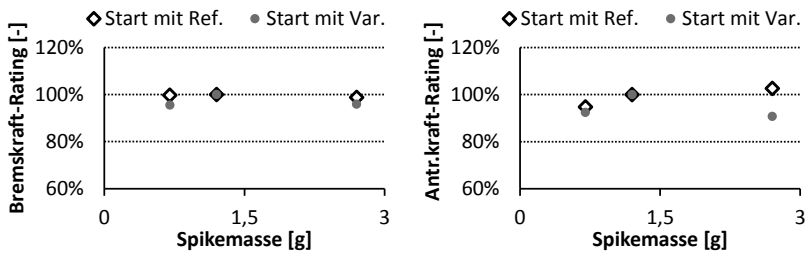


Abbildung 5.2: Einfluss der Spikemasse auf die übertragbaren Kräfte für Bremsen (links) und Antreiben (rechts)

Für den Fall des annähernd kompletten Eindringens spricht der Vergleich zwischen Antreiben und Bremsen. Während die Reihenfolge der Versuchsführung, abgesehen von einem Ausreißer im Fall der Antriebskraftbewertung, keine Rolle spielt, fallen die Umfangskräfte beim Antreiben für die geringe Spikemasse deutlicher ab als beim Bremsen. Beim Bremsen ist durch das in Abschnitt 3.1.4 erwähnte Verkappen des Spikes und die damit einhergehende Kontaktkraftüberhöhung von einer Unterstützung des Eindringens auszugehen, beim Antreiben ist dies hingegen nicht der Fall. Zudem kommt hier durch die tendenziell höheren Aufschlagsgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 3.3) der Spikes dem Eindringen durch Aufschlagen eine höhere Bedeutung zu. Eine mögliche Erklärung für das beobachtete Verhalten besteht also darin, dass am angetriebenen Rad mit der geringen Spikemasse sich das verschlechterte Eindringen der Spikes bemerkbar macht, während für alle anderen Varianten und Betriebszustände von annähernd komplett eingedrungenen Spikes auszugehen ist.

5.1.3 Positivprofilanteil

Die erhabenen Bereiche eines Reifenprofils werden auch als Positivanteil, die abgesenkten, wie Profilirren und sonstige Vertiefungen in der Lauffläche, entsprechend als Negativanteil bezeichnet (siehe z.B. [46]). In der Winterreifenentwicklung spielt der Positivprofilanteil eine große Rolle. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurde die Kraftübertragung an unterschiedlichen Reifen mit experimentellen Profilen untersucht. Abbildung 5.3 zeigt die verschiedenen Profile die aus dem Laufstreifen herausgeschnitzt wurden.

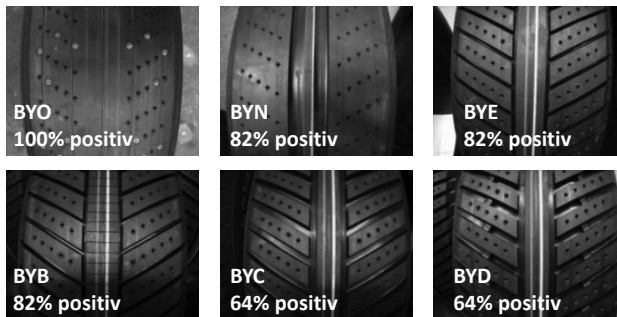


Abbildung 5.3: Profilgestaltung der untersuchten Reifen. In den Abbildungen ist die jeweilige Reifenkennung sowie der Positivanteil des Profils vermerkt. Die Abbildung zeigt die Reifen teilweise vor der Bespikung, die Versuche wurden für alle Varianten mit derselben Spikekonfiguration durchgeführt (vgl. Reifen BYO)

Als Grundlage dient ein *Lochrasterreifen* – ein Reifen, dessen Laufstreifen glatt und unprofiliert ist und lediglich ein Muster aus Löchern zur Spikemontage aufweist (Reifenkennung BYO, in Abbildung 5.3 links oben). Die Profile unterscheiden sich in Anteil und Anordnung des Profilnegativs. Tabelle 5.2 liefert weitere Details zur Gestaltung der Profile, die Spikes wurden für alle Reifen in vergleichbarer Weise eingesetzt.

Die Ratingwerte für die Antriebs- und Bremskraftübertragung der verschiedenen Profile sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Als Referenz für den

Vergleich diente ein Serienreifen mit identischer Spikeanzahl und -bauart. Es lässt sich erkennen, dass mit abnehmendem Positivprofilanteil die übertragbaren Kräfte ansteigen, ob das Profilnegativ in der Laufstreifenmitte oder an den Schultern angeordnet ist, spielt keine Rolle. Auch die Versteifung des Profils durch die Rippen zwischen den Profilstollen (Variante BYD) hat keinen eindeutigen Einfluss.

Erklären lässt sich dieses Verhalten dadurch, dass mit abnehmendem Positivprofilanteil auch die Kontaktfläche zwischen Gummi und Eis kleiner wird und somit ein größerer Anteil der Radlast durch die Spikes abgestützt wird. Folglich erhöhen sich die Kontaktkräfte zwischen Spike und Fahrbahn, was ein besseres Eindringen der Spikes und dadurch höhere übertragbare Kräfte zwischen Spike und Eis ermöglicht. Die daraus resultierende Zunahme der übertragbaren Kräfte wirkt sich stärker aus als die Abnahme durch den verringerten Gummi-Eis-Kontakt.

Tabelle 5.2: Gestaltung der verschiedenen Profile zur Untersuchung des Einflusses des Positivprofilanteils

Reifen- kennung	Positivprofil- anteil [%]	Profilgestaltung
BYO	100	-
BYN	82	Negativ in der Laufstreifenmitte
BYE	82	Negativ an den Schultern
BYB	82	Wie BYE, Laufstreifenmitte geschlitzt bzw. lamelliert
BYC	64	Negativ an den Schultern
BYD	64	Wie BYC, Versteifungsrippen zwischen den Klötzen

Als einzige Variante weicht der Reifen mit der Kennung BYB, dessen Laufstreifenmitte mit Lamellen versehen wurde, deutlich von diesem Trend ab. Die Steigerung der übertragbaren Kräfte lässt sich in diesem Fall

durch eine Verbesserung der Kraftübertragung zwischen Gummi und Eis erklären. Die Lamellen können den Wasserfilm im Kontakt zwischen Gummi und Eis durchbrechen sowie in geringem Maße auch Wasser aufnehmen und so aus dem Kontakt entfernen, wodurch sich ein Anstieg der Kräfte ergibt, die durch viskose Scherung im Wasserfilm übertragen werden können (siehe z. B. [106]).

Auch der Serien-Spikereifen, der als Referenz verwendet wurde, weist wie alle handelsüblichen Winterreifen eine deutliche Lamellierung des Profils auf. Dass keine der untersuchten Reifenvarianten einen Ratingwert größer als 100% erreicht, d.h. alle ein geringeres Kraftübertragungspotential aufweisen als der Serienreifen, lässt sich ebenfalls über den Einfluss der Lamellierung auf die Kraftübertragung im Gummi-Eis-Kontakt begründen.

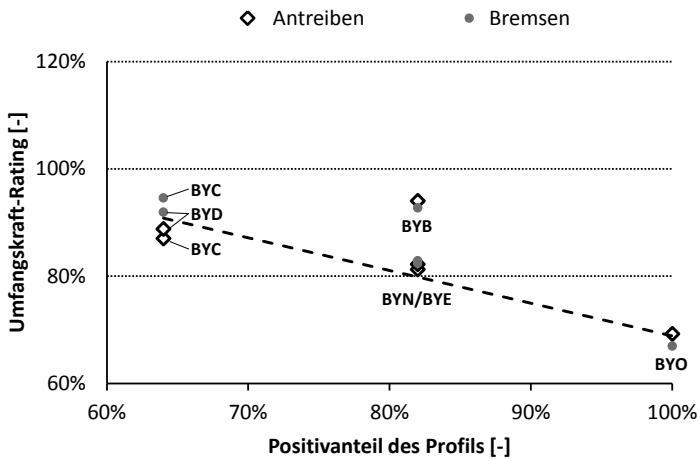


Abbildung 5.4: Einfluss des Positivanteils im Reifenprofil auf die übertragbaren Kräfte

Bei den Varianten mit geringem Positivprofilanteil ergibt sich ein deutliches Aufspreizen der Ratingwerte zwischen Antreiben und Bremsen, insbesondere für das Profil ohne versteifende Rippen zwischen den Profilklötzen. Es liegt also die Schlussfolgerung nahe, dass sich die geringe Um-

fangssteifigkeit des Profils in unterschiedlicher Weise auf die Kraftübertragung bei Bremsen und Antreiben auswirkt. Dieses Verhalten sollte jedoch über weitere Messungen verifiziert werden.

5.1.4 Radlast und Reifenfülldruck

Die Radlast und der Reifenfülldruck wirken sich sowohl auf den Kontaktdruck im Reifenlatsch als auch auf die Kontaktgeometrie des belasteten Reifens aus. Da für die Auswirkung der beiden Parameter ähnliche Mechanismen verantwortlich sind, werden die Einflüsse von Fülldruck- und Radlastvariation in diesem Abschnitt gemeinsam diskutiert.

Betrachtet man die an einem Reifen wirkende Vertikallast, so wird diese zu unterschiedlichen Teilen über die Struktursteifigkeit der Reifenkarkasse und über die stabilisierende Wirkung der Luftfüllung abgestützt. Nach [31] hat die Struktursteifigkeit dabei nur einen untergeordneten Anteil, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Kontaktdruck in der Reifenaufstandsfläche in erster Näherung dem Fülldruck des Reifens entspricht. Variiert man also den Fülldruck des Reifens, so ändert sich der Kontaktdruck in gleichem Maße und bei konstant gehaltener Radlast vergrößert sich entsprechend der Reifenlatsch bei einer Verringerung des Fülldrucks bzw. verkleinert sich der Latsch bei einer Erhöhung des Fülldrucks. Bei einer Variation der Radlast mit konstant gehaltenem Fülldruck ist hingegen davon auszugehen, dass der Kontaktdruck in der Reifenaufstandsfläche ebenfalls annähernd konstant bleibt und der Latsch sich mit zunehmender Radlast vergrößert und umgekehrt.

Durch die Veränderung der Latschlänge bei Variation von Radlast bzw. Fülldruck ändert sich weiterhin die Form des abgeplatteten Reifens und somit auch die Kontaktgeometrie für den Spike zum Zeitpunkt des Aufschlagens auf die Fahrbahn (s. auch Abbildung 3.2). Je größer die Latschlänge, umso kleiner wird der Krümmungsradius des Laufstreifens an den Latschenden und entsprechend umso größer der Winkel, unter dem der Spike auf die Fahrbahn aufschlägt.

In Abbildung 5.5 sind die ermittelten Ratingwerte für verschiedene Radlasten bzw. Luftdrücke aufgetragen. Es lässt sich beobachten, dass sich bei

einer Absenkung der Radlast bzw. einer Steigerung des Fülldrucks kaum eine Änderung der Ratingwerte ergibt. Für einen niedrigen Fülldruck ergibt sich ebenfalls kein eindeutiger Einfluss, eine Erhöhung der Radlast führt zu niedrigeren Ratingwerten. Dieses Verhalten ergibt sich aus dem Zusammenspiel verschiedener gegenläufiger Einflüsse, wie im Folgenden dargestellt wird.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Ratingwerte sich aus einem Vergleich der jeweiligen Reibwerte ergeben. Um beim Vergleich einer Radlastvariante mit den Standardbetriebsbedingungen einen Ratingwert von 100% zu erzielen, muss sich also die übertragene Umfangskraft am Spikereifen in gleichem Maße ändern wie die aufgeprägte Radlast. Wie oben erläutert, führt eine Erhöhung der Radlast bei konstant gehaltenem Fülldruck in einem gewissen Wertebereich um die Standardbetriebsbedingungen zu einer annähernd proportionalen Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche.

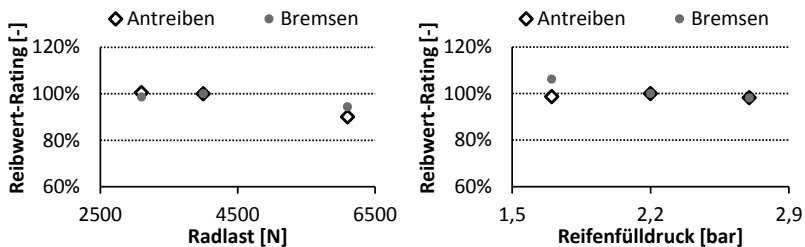


Abbildung 5.5: Einfluss der Radlast (links) und des Reifenfülldrucks (rechts) auf die übertragbaren Umfangskräfte

Die Spikes sind im Mittel gleichmäßig über den Reifenumfang verteilt, es kann also davon ausgegangen werden, dass sich die Zahl der im Latsch befindlichen Spikes mit der Variation der Radlast ändert. Da der Kontaktdruck in der Reifenaufstandsfläche und somit die Kontaktbedingungen für den einzelnen Spike annähernd konstant bleiben, erscheint es plausibel, dass sich die übertragbaren Kräfte proportional zur Radlast verändern. Diese Überlegung gilt jedoch nur, solange die Annahme berechtigt ist, dass sich die Größe der Radaufstandsfläche proportional mit der Rad-

last verändert. Insbesondere für hohe Radlasten ist dies nicht der Fall – je höher die Radlast, umso geringer fällt die Vergrößerung des Reifenlatschs für eine bestimmte Radlasterhöhung aus. Das in Abbildung 5.5 dargestellte Verhalten bei Variation der Radlast ist also dadurch zu erklären, dass sich bei einer Verringerung der Radlast zwar die Anzahl der Spikes im Kontakt und somit die übertragbaren Kräfte in vergleichbarer Weise zur Radlast verringern, bei einer deutlichen Erhöhung der Radlast aber nicht eine Zunahme in ähnlichem Maße möglich ist. Dadurch ergibt sich für die geringere Radlast ein Ratingwert nahe 100%, für die höhere Radlast ein deutlich geringerer Wert.

Bei der Variation des Fülldrucks unter konstanter Radlast ändert sich neben der Größe der Radaufstandsfläche auch der Kontaktdruck in derselbigen. Für eine Erhöhung des Fülldrucks verkleinert sich zum einen die Aufstandsfläche und somit die Zahl der im Kontakt befindlichen Spikes, zum anderen erhöht sich die Pressung im Latsch und damit die Last auf den einzelnen Spike, der dadurch besser eindringen und so höhere Kräfte übertragen kann. Bei einer Verringerung des Fülldrucks sind die Verhältnisse umgekehrt. Diese beiden Mechanismen heben sich teilweise auf. Im Fall des untersuchten Reifens führt dies dazu, dass keine merkliche Veränderung der übertragbaren Kräfte verbleibt und somit durchweg Ratingwerte nahe 100% erzielt werden.

5.1.5 Temperatur

Die Temperatur, bei der ein Spikereifen betrieben wird, hat in erster Linie Einfluss auf die Wirksamkeit der Spikes. Während der zwei Testzeiträume zur Validierung des Verfahrens und für die Parameterstudien wurde jeweils ein dem Referenzreifen baugleicher Reifen ohne Spikes mitgemessen, um den durch Spikes erzielbaren Vorteil gegenüber einem unbespikten Reifen zu bestimmen. In Abbildung 5.6 sind die entsprechenden Ratingwerte aufgetragen, sie ergeben sich aus den mittleren Kraftbeiwerten am Spikereifen, bezogen auf die am unbespikten Reifen.

Es lässt sich erkennen, dass der Vorteil des Spikereifens gegenüber dem unbespikten Reifen mit zunehmender Temperatur zunächst langsam, na-

he dem Gefrierpunkt dann schneller ansteigt. Für sehr tiefe Temperaturen scheint der Spikereifen sogar eine schlechtere Kraftübertragung zu ermöglichen als der unbespikete Reifen. Hier ist allerdings zu beachten, dass für den Bereich unterhalb von -10°C nur ein einziger Messwert vorliegt. Wegen der hohen Außentemperaturen während der sommerlichen Messzeiträume konnten Temperaturen unterhalb von -8°C im Prüfstand nicht reproduzierbar eingestellt werden. Somit ist das Verhalten für tiefe Temperaturen in weiteren Messungen zu verifizieren.

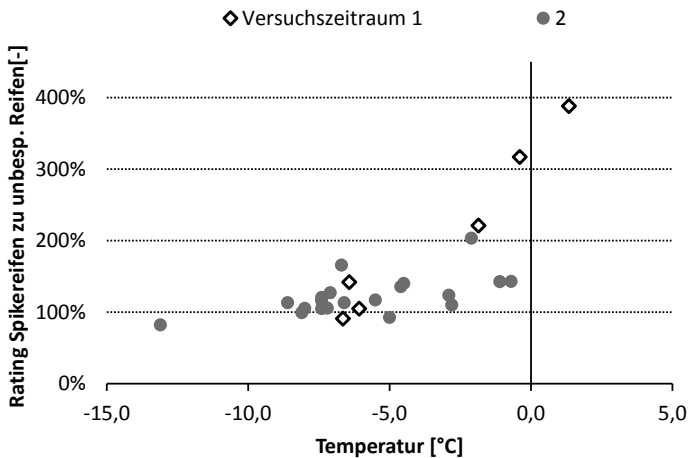


Abbildung 5.6: Ratingwert eines Spikereifens im Vergleich zu einem unbespiketen Reifen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

Der Anstieg der Ratingwerte, insbesondere für Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt, lässt sich dadurch erklären, dass in diesem Bereich die Gummi-Eis-Reibung deutlich abfällt. Je höher die Temperatur, desto leichter kann das Eis durch die Reibwärme im Gummi-Fahrbahn-Kontakt aufgeschmolzen werden. Für Temperaturen um den Gefrierpunkt kann davon ausgegangen werden, dass schon eine deutliche flüssige Wasserschicht an der Oberfläche des Eises vorhanden ist. Durch die stark abfallenden Reibwerte zwischen Gummi und Eis gewinnen die an den Spikes übertragenen Kräfte zunehmend Bedeutung für die Kraftübertragung am

Spikereifen (vgl. Gleichung (3.7)). Im Vergleich zum unbespikten Reifen steigt das Kraftübertragungspotential des Spikereifens für Temperaturen nahe 0°C also stark an.

Umgekehrt wird für tiefe Temperaturen die Kraftübertragung zwischen Gummi und Eis besser, die zusätzliche Kraft durch die Spikes bringt keinen deutlichen Vorteil, insbesondere da durch die Spikes auch der Kontakt zwischen Gummi und Eis reduziert wird (vgl. Abschnitt 3.2.1). Liegen bei tiefen Temperaturen vergleichsweise hohe Reibwerte zwischen Gummi und Eis vor, ist es sogar denkbar, dass die Reduktion des Gummi-Eis-Kontakts schwerer wiegt als die zusätzlichen Kräfte, die an den Spikes übertragen werden können. In diesem Fall kann der unbespikte Reifen höhere Kräfte übertragen als der Spikereifen, was einem Ratingwert kleiner 100% in Abbildung 5.6 entspricht. Begünstigt wird dieses Verhalten durch die zunehmende Härte des Eises bei geringen Temperaturen, die das Eindringen der Spikes erschwert. Dringen die Spikes weniger weit ins Eis ein, findet zum einen eine stärkere Entlastung des Gummis statt (vgl. Abschnitt 3.1.3) zum anderen können nur geringere Kräfte am Eis abgestützt werden. Beide Aspekte führen zu einer Verringerung der übertragbaren Kräfte.

5.2 Fahrbahnverschleiß

Mit dem in Abschnitt 4.4 vorgestellten Verfahren zur Quantifizierung des durch Spikereifen verursachten Fahrbahnverschleißes wurde der Einfluss verschiedener Parameter untersucht. Im Folgenden sind aus Gründen der Geheimhaltung relative Verschleißwerte angegeben. Als Bezugsgröße dient dabei, soweit nicht anders angegeben, der Verschleiß, der durch einen in allen Untersuchungen verwendeten Serienreifen der Dimension 205/55 R 16 mit 130 Spikes verursacht wurde. Die Parameterwerte, die für diese Bezugsvariante und jeweils auch für die nicht variierten Parameter verwendet wurden, sind in Tabelle 5.3 aufgeführt. Die genannte Antriebskraft wurde dabei jeweils für die Hälfte der Überrollungen aufgebracht, um die Betriebsbedingungen an einem realen Fahrzeug mit einer angetriebenen und einer nicht angetriebenen Achse möglichst genau ab-

zubilden. Teile der im Folgenden vorgestellten Ergebnisse wurden bereits in [29] veröffentlicht.

Tabelle 5.3: Standardwerte für die nicht variierten Parameter in den Parameterstudien zum Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen

Parameter	Standardwert	Einheit
Radlast	4.600	N
Fülldruck	2,2	bar
Fahrgeschwindigkeit	100	km/h
Antriebskraft	220	N
Temperatur	5-10	°C
Spikeanzahl	130	-
Spikeüberstand	1,2	mm
Spikemasse	1,1	g

5.2.1 Spikeüberstand

In Abschnitt 5.1.1 wurde gezeigt, dass der Spikeüberstand eine wichtige Größe für die Kraftübertragung am Spikereifen auf Eis darstellt. Auch für den Fahrbahnabrieb ist ein Einfluss des Spikeüberstands zu erwarten. Die Auswirkung verschiedener Spikeüberstände wurde untersucht, indem der Fahrbahnverschleiß für verschiedene Reifen mit unterschiedlichen Spikeüberständen, wie bereits in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, bestimmt wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Fahrbahnabriebs mit zunehmendem Spikeüberstand, der Zusammenhang ist in sehr guter Näherung als linear anzunehmen. Dieser Einfluss lässt sich über die Aufschlagsschädigung erklären: Mit zunehmendem Spikeüberstand verschiebt sich der erste Kontaktpunkt zwischen Spike und Fahrbahn weg vom Reifenlatsch, es ergibt sich somit ein größerer Auftreffwinkel für den Spike (vgl. Abbildung 3.2). Folg-

lich steigt auch die Differenzgeschwindigkeit gemäß Gleichung (3.1) an, die im Kontakt abgebaut werden muss und so zu einer Schädigung der Fahrbahn führt (vgl. Gleichung (3.22)).

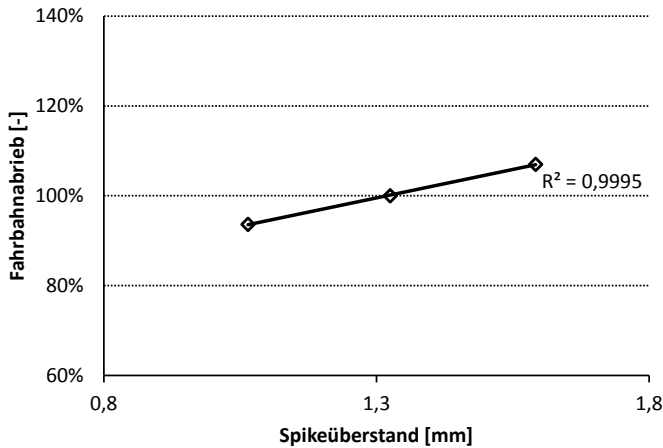


Abbildung 5.7: Einfluss des Spikeüberstands auf den Fahrbahnabrieb

Des Weiteren ergeben sich bei einem größeren Spikeüberstand ohne weitere Änderungen am Reifen größere vertikale Kontaktkräfte zwischen Spike und Fahrbahn, wie in Abschnitt 3.1.3 gezeigt wurde. Höhere vertikale Kontaktkräfte sorgen für eine höhere Belastung des Fahrbahnmaterials in vertikaler Richtung, was den Mechanismus des Versagens unter Druckbelastung begünstigt. Auch die Reibarbeit und somit der Fahrbahnverschleiß durch Kratzen steigt durch die vertikale Last auf dem Spike an. Bei den geringen anliegenden Umfangskräften ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Mechanismus eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. auch Abschnitt 5.2.4 zur experimentellen Untersuchung des Einflusses der Umfangskraft).

5.2.2 Spikemasse

Der in Abschnitt 3.3.1 vorgestellte Mechanismus der Fahrbahnschädigung durch Aufschlagen lässt weiterhin einen deutlichen Einfluss der Spike-

masse erwarten. Zur experimentellen Verifizierung dieses Einflusses wurden auf einem Grundreifen basierende Reifenvarianten mit unterschiedlichen Spikes ausgestattet. Wie bereits bei der Untersuchung des Eisgriffs erläutert, wurden die Spikemassen variiert, indem verschiedene Materialien für den Spikekörper zum Einsatz kamen. Die Geometrie der Spikekörper ist ähnlich, sodass von einer vergleichbaren Einbettung im Reifengummi eingegangen werden kann, die verwendeten Spikepins, die in erster Linie mit der Fahrbahnoberfläche in Kontakt stehen und den Verschleiß verursachen, sind identisch.

Der Einfluss der Spikemasse auf den ermittelten Fahrabrieb ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Während bei der Untersuchung des Eisgriffs kein deutlicher Effekt der Spikemasse beobachtet werden konnte²⁴, lässt sich hier erkennen, dass die Spikemasse den erwarteten großen Einfluss auf die Fahrbahnschädigung hat. Eine Verdoppelung der Spikemasse ausgehend von der Referenzvariante sorgt auch für eine Verdoppelung des Fahrabriebs. Die Vermutung eines linearen Einflusses (vgl. Gleichung (3.22)) ist berechtigt, es ergibt sich ein exzellenter Wert für das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression.

Da die Spikemasse einen derart starken Einfluss auf die Fahrbahnschädigung hat, wurde das oben dargestellte Reifenprogramm mit verschiedenen Spikemassen auch im Fahrzeugversuch mit dem bereits in Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Verfahren untersucht. Abbildung 5.9 zeigt die Korrelation der beiden Untersuchungen zum Einfluss der Spikemasse. Die Vorgehensweise für den Vergleich ist identisch zu der bei der Validierung des Verfahrens angewendeten (vgl. Abschnitt 4.4.5). Es zeigt sich eine äußerst gute Korrelation der Ergebnisse aus beiden Versuchsreihen. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren bildet also den Einfluss der Spikemasse in nahezu identischer Weise ab wie das bestehende Verfahren im Fahrzeugversuch, bei dem ein reales, mit Spikereifen ausgestattetes Fahrzeug verwendet wird.

²⁴ Wie in Kapitel 5.1.2 gezeigt, kann davon ausgegangen werden, dass auf der vergleichsweise weichen Eisfahrbahn bereits für geringe Spikemassen die Spikes aufgrund ihrer elastischen Bettung im Reifen und der daraus resultierenden Kräfte nahezu vollständig ins Eis eindringen.

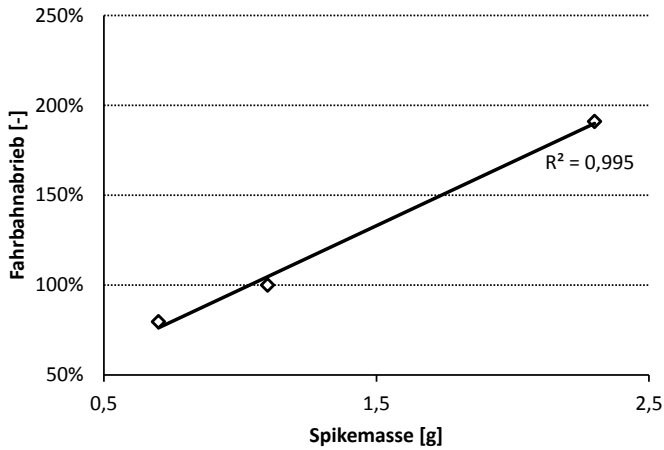


Abbildung 5.8: Einfluss der Spikemasse auf den Fahrbahnabrieb

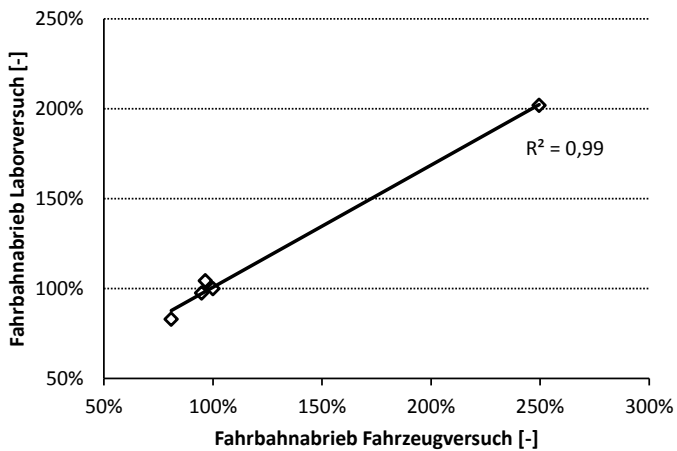


Abbildung 5.9: Vergleich und Korrelation der Versuchsreihen zum Einfluss der Spikemasse im Labor- und Fahrzeugversuch

5.2.3 Spikeanzahl

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Mechanismen für den Fahrbahnverschleiß wirken bei jedem Kontakt zwischen Spike und Fahrbahn. Dementsprechend ist für einen Spikereifen mit einer höheren Anzahl an Spikes eine stärkere Schädigung der Fahrbahn zu erwarten und umgekehrt. In Abbildung 5.10 ist der Fahrbahnabrieb in Abhängigkeit der Spikeanzahl aufgetragen. Zum einen wurden aus einem Serienreifen mit 130 Spikes durch Entfernen von Spikes unterschiedliche Varianten abgeleitet: eine Variante mit 70 Spikes sowie zwei Varianten mit 100 Spikes. Diese unterscheiden sich dadurch, dass in einem Fall Spikes nahe der Laufstreifenmitte, im anderen Fall Spikes am Rande des Laufstreifens entfernt wurden. Zum anderen wurden dieselben Spikeanordnungen sowie eine Variante mit höherer Spikeanzahl auf einem Lochrasterreifen realisiert (vgl. Abbildung 5.3, Reifenkennung BYO).

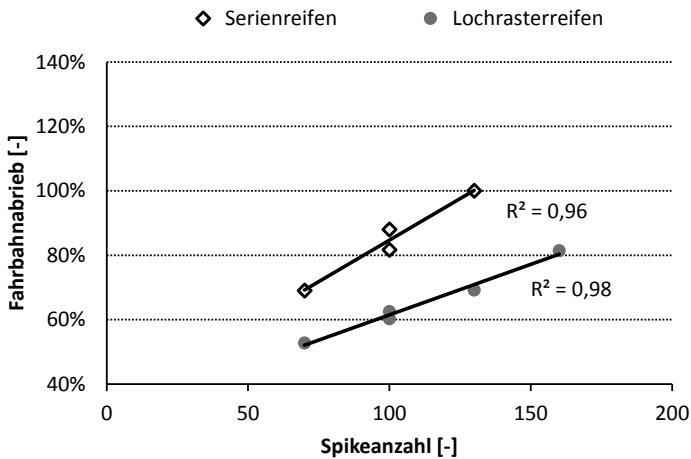


Abbildung 5.10: Einfluss der Spikeanzahl auf den Fahrbahnabrieb

Es ist zunächst zu erkennen, dass für beide Grundreifen, d. h. Serienreifen und Lochrasterreifen, der Fahrbahnabrieb annähernd linear mit der Spikeanzahl ansteigt. Dies bestätigt die Vermutung, dass die einzelnen

Spikes in erster Näherung zu gleichen Teilen zum Fahrbahnverschleiß beitragen und jeder zusätzliche Spike an einem Reifen zusätzlichen Verschleiß erzeugt. Betrachtet man die Varianten mit 100 Spikes, zeigt sich jeweils ein Unterschied zwischen den beiden Varianten eines Grundreifens: In beiden Fällen erzeugt der Reifen den höheren Verschleiß, bei dem die Spikes an den Laufstreifenrändern entfernt wurden und der so eine höhere Spikedichte nahe der Mitte des Laufstreifens aufweist. Dieses Verhalten lässt sich über die Geometrie der Reifenaufstandsfläche begründen: Üblicherweise besitzt diese eine leicht ovale Form (vgl. z.B. [31]), sodass die Kontaktlänge für einen Spike nahe der Laufstreifenmitte länger ist als am Rand und dieser somit einen höheren Verschleiß durch Kratzen und Druckversagen²⁵ des Fahrbahnmaterials verursacht. Auch der Auftreffwinkel vergrößert sich mit größerer Kontaktlänge tendenziell, was zu einer stärkeren Aufschlagschädigung führt.

Des Weiteren ist beachtenswert, dass der Lochrasterreifen unabhängig von der Spikeanzahl einen deutlich geringeren Fahrbahnabrieb verursacht als der Serienreifen. Die Ursache für dieses Verhalten wird darin vermutet, dass der Lochrasterreifen im belasteten Zustand durch die höhere Profil- bzw. Laufstreifensteifigkeit einen größeren Übergangsradius zwischen Reifenumfang und -latsch aufweist. Dadurch verringert sich der Winkel, unter dem der Spike auf die Fahrbahn auftrifft, und somit die Fahrbahnschädigung durch das Aufschlagen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Denkbar ist auch, dass das vertikale Kratzen, wie in Abschnitt 3.3.3 dargestellt, durch die steifere Einbettung der Spikes vermindert wird, da die Spikes so weniger leicht verkippeln können.

²⁵ Der Verschleiß durch das Druckversagen bzw. die vertikale Belastung kann gemäß Abschnitt 3.3.3 als ein einmaliges Ereignis pro Spikekontakt beschrieben werden: je nachdem, wie der Spike die Fahrbahn berührt, kann er ein Versagen des Fahrbahnmaterials verursachen oder nicht. Durch die größere Kontaktlänge erhöht sich nicht die Anzahl der Spikekontakte pro Radumdrehung, wohl aber durch schlupfbedingte Verschiebungen zwischen Spike und Fahrbahn die Wahrscheinlichkeit, dass der Spike an einer Stelle der Fahrbahn Kontakt hat, an der er ein Versagen verursachen kann. Somit ergibt sich auch hier ein im Mittel höherer Verschleiß bei größerer Kontaktlänge.

5.2.4 Umfangskraft

Wie bereits einleitend erwähnt, wurden die Überrollungen der Steinplatten im Rahmen der Parameterstudien jeweils hälftig mit und ohne Antriebskraft durchgeführt, um die Situation am tatsächlichen Fahrzeug möglichst realistisch abzubilden. Um die Sensitivität des Verfahrens auf Umfangkraftschwankungen einerseits und den grundsätzlichen Einfluss der Antriebskraft am Fahrzeug andererseits zu untersuchen, wurden Versuche mit unterschiedlichen Umfangkräften durchgeführt. Neben einem Versuchsdurchlauf mit komplett frei rollendem Rad wurde dabei jeweils für die Hälfte der Überrollungen eine definierte Umfangskraft aufgebracht. Es ergeben sich die Verschleißwerte wie in Abbildung 5.11 dargestellt.

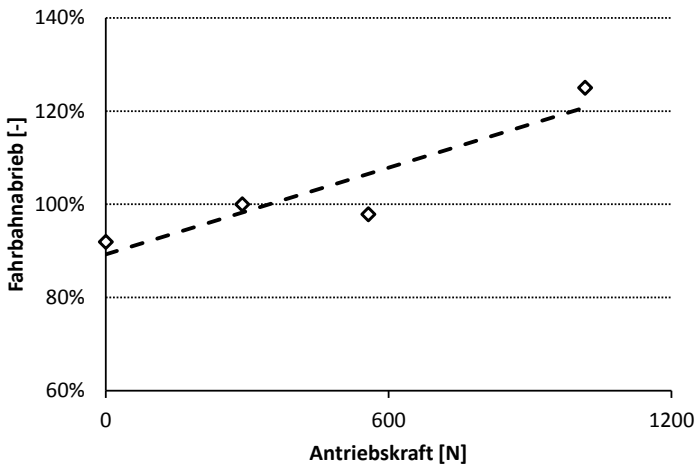


Abbildung 5.11: Einfluss der anliegenden Antriebskraft auf den Fahrbahnabrieb

Tendenziell lässt sich ein Anstieg der Fahrbahnschädigung mit zunehmender Umfangskraft erkennen. Bei kleinen Werten ergibt sich dabei nur ein geringer Einfluss, es kann also davon ausgegangen werden, dass Schwankungen der Umfangskraft in einem gewissen Bereich um den Standardwert von 220N das Ergebnis nicht drastisch beeinflussen. Erst

für hohe Umfangskräfte ergibt sich eine deutliche Zunahme des Fahrbahnabriebs. Dies lässt sich über die Verhältnisse im Latsch bei unterschiedlichen Umfangskräften und somit unterschiedlichem Schlupf erklären. Während für geringe Schlupfwerte, wie in Abschnitt 3.1.4 dargestellt, ein großer Anteil der Schlupfgeschwindigkeit über Deformationsschlupf realisiert werden kann, liegt bei höheren Schlupfwerten, die in gewissem Maße für hohe Umfangskräfte erforderlich sind, zunehmend mehr Gleiten im Latsch vor. Diese tatsächlichen Gleitvorgänge im Latsch erzeugen zusätzlichen Verschleiß durch das Kratzen der Spikes über das Fahrbahnmaterial.

5.2.5 Fahrgeschwindigkeit

Um den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit zu bestimmen, wurden Abriebsversuche bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Die Dauer der Messung wurde entsprechend angepasst, um für alle Geschwindigkeiten dieselbe Überrollungszahl zu erreichen. Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene Reifen verwendet: Zum einen der Referenzreifen wie oben spezifiziert, zum anderen der Reifen mit schweren Spikes aus dem Programm zur Untersuchung der Spikemasse. Es ist zu beachten, dass dieser Reifen neben der abweichenden Spikemasse auch über einen runden Spikepin verfügt, dessen Geometrie von der des Spikepins am Referenzreifen abweicht. Die Geometrie der Spikekörper ist vergleichbar, so dass von einer gleichen Einbettung der Spikes im Reifen ausgegangen werden kann.

Abbildung 5.12 zeigt die Ergebnisse der Variation der Fahrgeschwindigkeit für die verschiedenen Reifen. Die beiden verwendeten Spikepingeometrien sind dabei mit *Pin A* und *Pin B* markiert. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit stark von der Spikemasse abhängt. Für den Reifen mit den schweren Spikes zeigt sich ein sehr deutlicher Einfluss der Fahrgeschwindigkeit. Ein quadratischer Einfluss, wie er anhand des Mechanismus der Aufschlagschädigung zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 3.3.1), ist plausibel. Für geringere Spikemassen fällt der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit geringer aus.

Weiterhin ist zu beobachten, dass beide Reifen für kleine Fahrgeschwindigkeiten auf einen konstanten Wert für den Fahrbahnabrieb hin streben. Es kann hierdurch also bestätigt werden, dass, wie in Abschnitt 3.3 postuliert, an einem Spikereifen ein gewisser Anteil des Verschleißes durch die vertikale Belastung sowie eventuell Kratzen im Latsch entsteht, der nicht durch die Spikemasse und die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst wird. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit entsteht ein zusätzlicher Verschleiß durch das Aufschlagen der Spikes auf die Fahrbahn, der sich insbesondere für hohe Spikemassen bemerkbar macht.

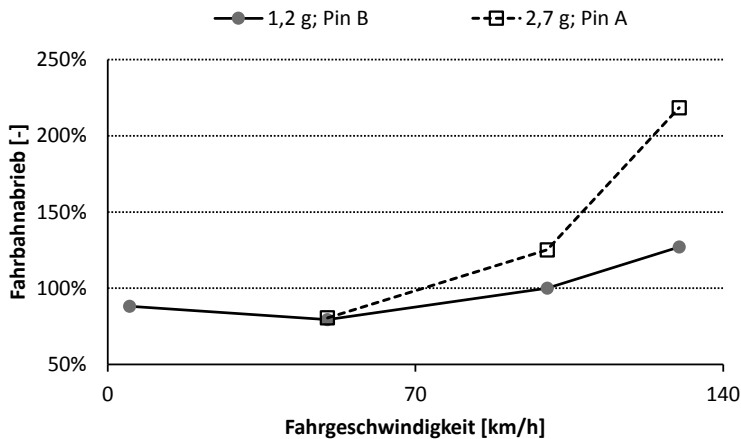


Abbildung 5.12: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf den Fahrbahnabrieb (Pin A entspricht einem runden Spikepin, Pin B dem Spikepin im Referenzreifen)

Für den Referenzreifen wurde zusätzlich der Verschleiß bei sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten von ca. 5 km/h untersucht. Aufgrund der sehr langen Versuchsdauer bei geringen Geschwindigkeiten konnte diese Variante nicht für beide Reifen geprüft werden. Hier bestätigt sich die Vermutung, dass auch für sehr kleine Fahrgeschwindigkeiten ein deutlicher Anteil des Fahrbahnabriebs erhalten bleibt.

5.2.6 Radlast und Reifenfülldruck

In der Diskussion der Ergebnisse zum Eisgriff in Abschnitt 5.1.4 wurden bereits die grundsätzlichen Auswirkungen von Radlast- und Fülldruckvariationen auf den Kontakt von Reifen und Fahrbahn behandelt. Eine Erhöhung des Fülldrucks bei konstanter Radlast bzw. eine Absenkung der Radlast bei konstantem Fülldruck führen zu einer Verkleinerung der Reifenaufstandsfläche, Veränderungen in umgekehrter Richtung zu einer Vergrößerung derselbigen. Der Unterschied besteht darin, dass bei einer Variation des Fülldrucks sich auch der Kontaktdruck in vergleichbarer Weise ändert, bei Variation der Radlast mit konstantem Fülldruck kann von einem annähernd konstanten Kontaktdruck ausgegangen werden. Weiterhin ist zu beachten, dass mit größerer Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn auch mit einem tendenziell größeren Auftreffwinkel des Spikes und somit höheren Differenzgeschwindigkeiten beim Aufschlagen zu rechnen ist.

Die Auswirkungen von Radlast- und Fülldruckvariation sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Es zeigt sich zunächst eine deutliche Zunahme des Fahrbahnabriebs mit zunehmender Radlast. Dies entspricht den Erwartungen: die mit der Radlast steigende Kontaktfläche sorgt zum einen dafür, dass mehr Spikes gleichzeitig im Kontakt mit der Fahrbahn sind bzw. ein einzelner Spike länger im Kontakt mit der Fahrbahn ist. Dies erhöht den Verschleiß durch die vertikale Belastung (vgl. Fußnote 25 auf Seite 141) und, falls im jeweiligen Betriebszustand relevant, durch das Kratzen der Spikes über die Fahrbahn. Zum anderen steigen mit der Latschlänge durch das steilere Auftreffen der Spikes die Differenzgeschwindigkeiten beim Aufschlagen, was einen höheren Verschleiß durch die Aufschlagschädigung verursacht.

Eine Erhöhung des Fülldrucks wirkt sich auf die Geometrie des Reifens unter Belastung in umgekehrter Weise aus wie eine Radlasterhöhung. Somit ist durch die oben beschriebenen, geometrisch bestimmten Mechanismen für eine Erhöhung des Fülldrucks mit einer Verringerung des Fahrbahnabriebs zu rechnen. Die Versuchsergebnisse in Abbildung 5.13 zeigen jedoch eindeutig, dass das Gegenteil der Fall ist: Bei einer Anhe-

bung des Fülldrucks ergibt sich eine deutliche Zunahme des Fahrbahnabriebs. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Steigerung des Kontaktdrucks sich über eine Erhöhung der vertikalen Kontaktkräfte zwischen Spike und Fahrbahn sehr stark auf die Fahrbahnschädigung durch das Versagen unter vertikaler Belastung auswirkt. Dieser Einfluss scheint die zu erwartende Abnahme des Verschleißes durch eine Verringerung der Spikeanzahl im Kontakt bzw. der Kontaktdauer der Spikes sowie dem reduzierten Auftreffwinkel bei einer Verkürzung des Reifenlatschs überzukompensieren.

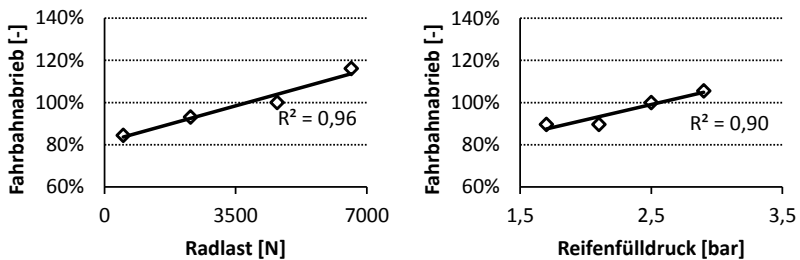


Abbildung 5.13: Einfluss der Radlast (links) und des Reifenfülldrucks (rechts) auf den Fahrbahnabrieb

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Spikereifen leisten einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit im Straßenverkehr bei winterlichen Bedingungen. Die in die Reifenlauf­fläche eingelassenen Spikes können sich in vereisten Fahrbahnen verzahnen und so für eine deutliche Verbesserung der Kraftübertragung sorgen. Werden Spikereifen auf unbedeckten Fahrbahnen betrieben, ergibt sich jedoch ein deutlich gesteigerter Fahrbahnverschleiß.

Der Zielkonflikt zwischen hoher Fahrsicherheit auf Eis und möglichst geringem Fahrbahnverschleiß als eine der großen Herausforderungen der Spikereifenentwicklung wurde im Rahmen dieser Arbeit eingehend behandelt. Dazu wurden, ausgehend vom Stand der Forschung zum Reifenverhalten auf winterlichen Fahrbahnen und zum durch Spikereifen hervorgerufenen Fahrbahnverschleiß, Modellvorstellungen entwickelt, die den Kontakt zwischen Spikereifen und Fahrbahn sowie verschiedene Wirkmechanismen für die Kraftübertragung auf Eis und den Fahrbahnverschleiß detailliert beschreiben. Basierend auf diesen Mechanismen wurden die Einflüsse verschiedener Konstruktions- und Betriebsparameter von Spikereifen abgeschätzt. Wo möglich, wurden die abgeschätzten Parametereinflüsse mit Hilfe von Forschungsergebnissen zu vergleichbaren Problemstellungen plausibilisiert.

Es zeigte sich, dass für den Eisgriff neben verschiedenen Parametern wie z. B. der Temperatur, die sich auf die Eigenschaften des Eises auswirken, der Spikeüberstand, die Spikekraft und die Geometrie des Spikepins wichtige Einflussgrößen sind. Sie beeinflussen das Eindringen des Spikes ins Eis und die Kraftübertragung am Spike im eingedrungenen Zustand in entscheidendem Maße.

Für den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen wurden drei verschiedene Wirkmechanismen identifiziert: Das Aufschlagen des Spikes auf die Fahr-

bahn, das Kratzen des Spikes über die Fahrbahn und das Versagen des Fahrbahnmaterials unter der Druckbelastung durch den Spike. Auch hier ergibt sich ein Einfluss des Spikeüberstands und, eng damit verbunden, der Spikekraft. Weiterhin wurden über den Mechanismus des Aufschlagens die Spikemasse und die Fahrgeschwindigkeit als entscheidende Einflussparameter identifiziert.

Zur experimentellen Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Parametervariationen auf den Eisgriff und den Fahrbahnverschleiß wurden Versuchsmethoden zur Bewertung von Spikereifen bezüglich dieser beiden Aspekte entwickelt. Um die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf den Einsatz am Fahrzeug zu belegen, wurden beide Messverfahren durch einen Vergleich zu bestehenden Verfahren aus dem Fahrzeugversuch validiert. Für beide Verfahren ergeben sich hierbei gute Korrelationswerte.

Das entwickelte Verfahren zur Bewertung des Eisgriffs von Spikereifen ermöglicht den reproduzierbaren Vergleich zweier Spikereifen unter Laborbedingungen. Eine große Herausforderung während der Verfahrensentwicklung bestand im Umgang mit dem Verschleiß der Eisfahrbahn durch die Spikes. Durch eine geschickte Versuchsanordnung, dem alternierenden Vergleich zweier Spikereifen, konnte der Einfluss dieser Schädigung auf die Versuchsergebnisse zu großen Teilen kompensiert werden. Lediglich bei einzelnen Vergleichen wurde ein Einfluss der Prüfreihefolge beobachtet, dessen Ursachen im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend identifiziert werden konnten. Ein großer Vorteil besteht neben der guten Einstellbarkeit der Umgebungsbedingungen in der ganzjährigen Verfügbarkeit, losgelöst von äußeren Witterungsbedingungen und Jahreszeiten. Zudem konnte mit dem vorgestellten Verfahren erstmals ein produktiv einsetzbares Messverfahren zur objektiven Bewertung der Seitenkraftübertragung von Spikereifen für die Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt werden.

Mit dem entwickelten Verfahren zur Bestimmung des Fahrbahnverschleißes in einem Innentrommelprüfstand kann die Effizienz gegenüber dem bestehenden Verfahren im Fahrzeugversuch deutlich gesteigert werden. Auch können die Betriebsparameter am Prüfstand deutlich ein-

facher und in weiteren Bereichen variiert werden als an einem realen Fahrzeug.

Anhand von umfangreichen Parameterstudien wurden die anhand der Wirkmechanismen abgeleiteten Parametereinflüsse experimentell plausibilisiert. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorhergesagten Tendenzen. So bestätigte sich beispielsweise der große Einfluss des Spikeüberstandes auf den Eisgriff eines Spikereifens. Über die Variation des Positivprofilanteils konnte indirekt auch die vermutete Auswirkung der Spikekraft bestätigt werden. Für den Fahrbahnverschleiß zeigt sich auch im Experiment der erwartete große Einfluss der Spikemasse und der Fahrgeschwindigkeit. Die basierend auf den Wirkmechanismen postulierten qualitativen Einflüsse – linear für die Spikemasse und quadratisch für die Fahrgeschwindigkeit – konnten tendenziell bestätigt werden.

Die vorliegende Arbeit trägt in verschiedener Weise zur Behandlung des Zielkonflikts zwischen Eisgriff und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen bei: Zum einen stehen mit den entwickelten Messverfahren Werkzeuge zur Verfügung, die in der Reifenentwicklung zur Bewertung von neuartigen Reifenmodellen und -konzepten bezüglich ihrer Eigenschaften in den beiden Disziplinen eingesetzt werden können. Durch die ganzjährige Verfügbarkeit können Ergebnisse zeitnah bereitgestellt werden und so zu einer Verkürzung des Entwicklungsprozesses beitragen.

Zum anderen stellen die Ergebnisse der Parameterstudien ein breites Grundlagenwissen über die Auswirkung verschiedener Veränderungen im Spikereifenaufbau und -betrieb bereit und können so erste Ansätze liefern, wie ein Spikereifen im Spannungsfeld zwischen Eisgriff und Fahrbahnabrieb idealerweise auszulegen ist. Für beide Disziplinen wurden hierbei unter anderem Parameter als bedeutsam identifiziert, deren Einfluss gemäß dem Stand der Forschung noch nicht bekannt war. Mit den präsentierten Wirkmechanismen wird weiterhin eine Möglichkeit gegeben, die Auswirkung der Parametervariationen physikalisch basiert zu erklären und zu begründen. Der Einfluss noch unbekannter Parameter kann anhand der Wirkmechanismen abgeschätzt werden.

6.2 Ausblick

Die Beschreibung der Spikereifen-Fahrbahn-Interaktion im Rahmen dieser Arbeit über verschiedene Kontaktphasen und Wirkmechanismen liefert ein Verständnis dafür, welche Phänomene im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn auftreten und wie sich die verschiedenen Kontaktbedingungen auf den Eisgriff und den Fahrbahnverschleiß auswirken. Auch Tendenzen für die Auswirkungen verschiedener Parametervariationen lassen sich voraussagen. Eine Quantifizierung dieser Auswirkungen ist jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Auch lässt sich im momentanen Stand der Modellbildung keine quantitative Aussage treffen, welchen Anteil welcher Mechanismus zum Eisgriff bzw. zum Fahrbahnverschleiß beiträgt.

Um die Modelle diesbezüglich zu konkretisieren, ist es notwendig, sowohl die Beanspruchung der Fahrbahn durch den Reifen als auch das Verhalten des jeweiligen Fahrbahnmaterials, Eis oder Asphalt, unter der Beanspruchung quantitativ zu beschreiben. Dafür sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar: Zum einen kann das Verhalten von Reifen und Fahrbahnmaterial über Modelle beschrieben werden. Dabei ist sowohl eine detaillierte physikalische Beschreibung der zugrundeliegenden Phänomene als auch eine numerische Simulation der einzelnen Belastungsfälle mit Finiten Elementen denkbar. In beiden Fällen sind jedoch grundsätzliche Informationen über das Materialverhalten in Form von Kennzahlen oder Materialmodellen nötig, die von bestehenden Ansätzen übernommen bzw. aufbauend darauf entwickelt werden sollten.

Zum anderen besteht die Möglichkeit der experimentellen Untersuchung der grundlegenden Kontaktphänomene. So kann sowohl die Beanspruchung der Fahrbahn durch den Spike am Reifen als auch das Verhalten des Fahrbahnmaterials mit geeigneten Versuchsaufbauten untersucht und der Einfluss bestimmter Betriebs-, Kontakt- und Umgebungsparameter ermittelt werden. Ausgehend davon lassen sich mathematische Modelle zur Beschreibung der Kontaktvorgänge erstellen, die dann Eingangsgrößen für die Modellierung gemäß den in dieser Arbeit vorgestellten Ansätzen liefern. Ein Beispiel hierfür ist die experimentelle Bestimmung der

Schnittkräfte an einem durchs Eis kratzenden Spike in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie der vertikalen Belastung, dem Verkippungswinkel und der Umgebungs- bzw. Eistemperatur.

Bezüglich der Messverfahren lag der Fokus im Rahmen dieser Arbeit auf der Darstellung zuverlässiger und gut umsetzbarer Methoden. Durch die automatisierte Eisproduktion im Falle des Messverfahrens für den Eisgriff konnte bereits ein effizienter Messbetrieb realisiert werden. Auch mit dem neu entwickelten Verfahren zur Bestimmung des Fahrbahnabriebs kann sehr viel wirtschaftlicher gearbeitet werden, als mit dem vorhandenen Verfahren im Fahrzeugversuch, da die geforderte Anzahl an Überrollungen am Prüfstand in deutlich kürzerer Zeit erreicht wird. Trotzdem ist in Zukunft eine Steigerung der Effizienz der Verfahren durch eine Optimierung der Prozessabläufe anzustreben.

Bei der Bewertung des Eisgriffs konnte weiterhin der Einfluss der Prüfreihenfolge noch nicht abschließend geklärt werden. Es hängt von der Konstruktion und von den Betriebsparametern der beiden zu vergleichenden Reifen ab, ob die Wahl des Startreifens für den Vergleich einen Einfluss auf den ermittelten Ratingwert hat. Hier sollten weitere Studien durchgeführt werden, um herauszufinden, wodurch dieser Unterschied verursacht wird und in welchen Fällen demzufolge ein Vergleich in umgekehrter Reihenfolge wiederholt werden muss, damit die Reifen in korrekter Weise bewerten werden.

Schließlich sollten ergänzende Parameterstudien durchgeführt werden, um die vorhandenen Wirkmechanismen weiter zu plausibilisieren und die vorhandenen Erklärungsansätze zu festigen. Insbesondere im Vergleich der Auswirkungen von Radlast und Fülldruck auf den Fahrbahnverschleiß ergeben sich noch Unstimmigkeiten. Hier können weitere Messungen durchgeführt werden, um die experimentellen Ergebnisse zu untermauern. Eine gleichzeitige Variation von Radlast und Fülldruck erscheint als vielversprechendes Mittel, um die Einflüsse der Kontaktgeometrie einerseits und der Flächenpressung andererseits auf den Fahrbahnverschleiß aufzulösen.

Abschließend ist der Einsatz der Versuchsmethoden und der Erkenntnisse der Arbeit in der Spikereifenentwicklung zu empfehlen, um zukünftige Spikereifenkonstruktionen weiter zu optimieren und den Fahrbahnverschleiß bei Aufrechterhaltung oder sogar Steigerung der Fahrsicherheit vermindern zu können.

A Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Spikeaufstandsfläche	mm ²
A_G	Grundfläche des abgescherten Eiskeils	mm ²
A_S	Seitenfläche des abgescherten Eiskeils	mm ²
a, b	Regressionsparameter	
b_0, b_1	Koeffizienten des linearisierten Reibwertverlaufs	-
b_{Spike}	Breite des Spikepins (quer zur Fahrtrichtung)	mm
<i>BYO</i> u.a.	Interne Kürzel zur Identifikation eines Prüfreifens	-
D_{krit}	Kritische Differenz	-
E_{dam}	Schädigungsenergie	J
E_{kin}	Kinetische Energie allgemein	J
$E_{kin,\Delta}$	Kinetische Energie aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Spike und Fahrbahn	J
E_{Reib}	Energie bzw. Arbeit aus der Reibung zwischen Spike und Fahrbahn	J
F_{hor}	Horizontalkraft am Reifen	N
$F_{hor,Gummi}$	Zwischen Gummi und Fahrbahn übertragene Horizontalkraft	N
$F_{hor,Spike}$	Zwischen Spike und Fahrbahn übertragene Horizontalkraft	N
F_{Kont}	(vertikale) Kontaktkraft zwischen Spike und Fahrbahn	N

A Formelzeichen

f_n	Normale Schnittkraft nach LIEU und MOTE [48]	N
F_{Spike}	Spikekraft (Kraft die zum Eindrücken des Spikes auf Profilhöhe benötigt wird)	N
$F_{Spike,reib}$	Horizontalkraft zwischen Spike und Fahrbahn durch Reibung	N
$F_{Spike,kratzt}$	Horizontalkraft zwischen Spike und Fahrbahn durch Kratzen bzw. Abstützen des Spikes in der Fahrbahn	N
f_t	Tangentiale Schnittkraft nach LIEU und MOTE [48]	N
F_x	Umfangskraft am Reifen	N
F_y	Seitenkraft am Reifen	N
F_z	Radlast	N
h_E	Eindrücktiefe des Spikes in den Reifen	mm
h_i	Eindringtiefe des Spikes in die Fahrbahn	mm
h_p	Spikeüberstand	mm
K	Anzahl der Einzelmessungen (Stichprobenumfang)	-
l	Schnitttiefe nach LIEU und MOTE [48]	mm
l_{Spike}	Länge des Spikepins (in Fahrtrichtung)	mm
m	Anzahl der zu vergleichenden Reifengruppen	-
m_{Spike}	Spikemasse	g
n	Messposition bei mehrfacher, aufeinanderfolgender Messung	-
p	Reifenfülldruck	bar
p_{Spike}	Traganteil der Spikes an der Radlast	-

$q_{m(k-1),m,0.95}$	Oberes Quantil der studentisierten Wahrscheinlichkeitsverteilung für 5% Irrtumswahrscheinlichkeit	-
R	Korrelationskoeffizient	-
R	Krümmungsradius des Reifens im Bereich des Auftreffens des Spikes auf der Fahrbahn	mm
r_0	Radius des undeformierten Reifens	mm
r_{dyn}	Dynamischer Rollhalbmesser	mm
RW_{Fzg}	Im Fahrzeugversuch ermittelter Ratingwert	-
RW_{Lab}	Im Laborversuch ermittelter Ratingwert	-
s	Nicht über die lineare Regression erklärte empirische Standardabweichung	div.
s	Schlupf	-
T	Temperatur	°C
v	Geschwindigkeit allgemein	m/s
V	Kratervolumen	mm ³
v_d	Deformationsschlupfgeschwindigkeit	m/s
v_{Fb}	Fahrbahngeschwindigkeit	m/s
v_{Fzg}	Fahrzeug- oder Fahrgeschwindigkeit	m/s
v_g	Gleitschlupfgeschwindigkeit	m/s
v_{gleit}	Gleitgeschwindigkeit eines Profilelements	m/s
v_{Rad}	Umfangsgeschwindigkeit des Reifens im Latsch	m/s
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zwischen Spike und Fahrbahn	m/s
v_s	Umfangsschlupfgeschwindigkeit	m/s
v_{Spike}	Geschwindigkeit des Spikes	m/s

A Formelzeichen

x_{gleit}	Koordinate im Reifenlatsch, an der die Profilelemente zu gleiten beginnen	mm
α	Schräglaufwinkel	°
β	Auftreffwinkel des Spikes	°
γ	Schnittwinkel nach LIEU und MOTE [48]	°
γ	Sturzwinkel	°
Δv	Differenzgeschwindigkeit zwischen Spike und Fahrbahn	m/s
Δv_{hor}	Horizontale Komponente der Differenzgeschwindigkeit	m/s
Δv_{vert}	Vertikale Komponente der Differenzgeschwindigkeit	m/s
Δx	Gleitweg des Spikes im Kontakt	mm
$\hat{\mu}(n)$	Linearisierter Reibwertverlauf über mehrere aufeinanderfolgende Messungen	-
μ_{Gummi}	Reibwert zwischen Gummi und Eis	-
μ_{Spike}	Reibwert zwischen Spikepinmaterial und Eis	-
$\mu_{Spike,FB}$	Reibwert zwischen Spike und (unbedeckter) Fahrbahn	-
μ_x	Umfangskraftbeiwert	-
μ_y	Seitenkraftbeiwert	-
σ	Standardabweichung	div.
σ_D	Druckspannung in der Kontaktfläche zwischen Spike und Fahrbahn	N/mm ²
τ_m	Scherfestigkeit des Eises	N/mm ²
φ	Auffächerungswinkel des abgescherten Eiskeils	°

ψ	Keilwinkel des abgescherten Eiskeils	°
ω	Raddrehwinkelgeschwindigkeit	s ⁻¹
$\overline{(\dots)}$	Gemittelte Größe	
$(\dots)_{Ref}$	Größe, bezogen auf den Referenzreifen	
$(\dots)_{RW}$	Größe, bezogen auf den Ratingwert	
$(\dots)_i$	Größe, bezogen auf den i -ten Spike bzw. die i -te Variante	
$(\dots)_{I/II}$	Größe, bezogen auf den I -ten bzw. II -ten Ansatz zur Beschreibung des abgescherten Eiskeils	
$(\dots)_j$	Größe, bezogen auf den j -ten Reifen eines Vergleichs	
$(\dots)_k$	Größe, bezogen auf die k -te Messposition	
$(\dots)_{Var}$	Größe, bezogen auf eine Reifenvariante	

B Literaturverzeichnis

- [1] *Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau : Teil : Messverfahren SRT ; TP Griff-StB (SRT)*. Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, Köln, 2004
- [2] AI, H. ; AHRENS, T.: *Simulation of dynamic response of granite: A numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters*. In: *International Journal of Impact Engineering* 33 (2006), 1-12, S. 1–10
- [3] ANGERINOS, M. J. ; MAHONEY, J. P. ; MOORE, R. L. ; O'BRIEN, A. J.: *A Synthesis on Studded Tires*. Washington State Transportation Center (TRAC), University of Washington, 1999
- [4] F2493. *Standard Specification for P225/60R16 97S Radial Standard Reference Test Tire*. ASTM
- [5] F1572-08. *Standard Test Methods for Tire Performance Testing on Snow and Ice Surfaces*. ASTM
- [6] AUGUSTIN, M. ; UNRAU, H.-J.: *TiME : Final Report of Workpackage 2*. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, 1997
- [7] BACHMANN, T.: *Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik, Nr. 286* : VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [8] BACKHAUS, K.: *Multivariate Analysemethoden : Eine anwendungsorientierte Einführung*. 13. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2011
- [9] BARRETTE, P. ; POND, J. ; JORDAAN, I.: *Ice Damage and Layer Formation in Small-Scale Indentation Experiments*. In: *Ice in the environment : Proceedings 16th International Symposium on Ice*. Dunedin, New Zealand. 2-6 December 2002, International Association for Hydraulic Engineering and Research. [Dunedin, New Zealand] : Dep. of Physic, Univ. of Otago, 2002

- [10] BOLZ, G.: *Entwicklung eines Prüfverfahrens für Reifenmessungen auf Schnee im Labor*. Universität Karlsruhe (TH), Dissertation. Aachen : Shaker, 2006
- [11] BOWDEN, F. P. ; HUGHES, T. P.: *The Mechanisms of Sliding on Ice and Snow*. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 172 (1939), Nr. 949, S. 280–298
- [12] BURCHELL, M. J. ; GREY, I. D. S. ; SHRINE, N. R. G.: *Laboratory investigations of hypervelocity impact cratering in ice*. In: *Advanced Space Research* 28 (2001), Nr. 10, S. 1521–1526
- [13] BURNETT, W. B. ; KEARNEY, E. J.: *Studded Tires - Skid Resistance and Pavement Damage*. In: *Highway Research Record* 136 (1966), S. 24–30
- [14] CANTZ, R.: *New Tire-Stud Developments*. In: *Highway Research Record* 418 (1972), S. 11–25
- [15] CHOCRON BENLOULO, I. ; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, V.: *A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors*. In: *International Journal of Impact Engineering* 21 (1998), Nr. 6, S. 461–471
- [16] CLARK, Samuel K. (Hrsg.): *Mechanics of Pneumatic Tires* : U.S. Department of Transportation, 1981
- [17] DÖPPENSCHMIDT, A.: *Die Eisoberfläche : Untersuchungen mit dem Rasterkraftmikroskop*. Herdecke : GCA-Verl., 2000 (Forschen und Wissen — Chemie)
- [18] DÖRRIE, H. ; SCHRÖDER, C. ; WIES, B.: *Winter Tires: Operating Conditions, Tire Characteristics and Vehicle Driving Behavior*. In: *Tire Science and Technology* 38 (2010), S. 119–136
- [19] DUTTA, P. K. ; COLE, D. M. ; SCHULSON, E. M. ; SODHI, D. S.: *A Fracture Study of Ice Under High Strain Rate Loading*. In: *The proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. Honolulu, Hawaii. May 25-30, 2003. [Cupertino, Calif.] : International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003, S. 465–472
- [20] EICHHORN, K. ; GRÜN, E.: *High-velocity impacts of dust particles in low-temperature water ice*. In: *Planetary and Space Science* 41 (1993), Nr. 6, S. 429–433

-
- [21] FACH, M.: *Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. Dissertation. 1999
- [22] FISCHLEIN, H.: *Untersuchung des Fahrbahnoberflächeneinflusses auf das Kraftschlußverhalten von Pkw-Reifen*. Universität Karlsruhe (TH), Dissertation. Düsseldorf : VDI-Verl., 2000
- [23] FISH, A. M. ; ZARETSKY, Y. K.: *Ice Strength as a Function of Hydrostatic Pressure and Temperature*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997 (CRREL Report 97-6)
- [24] FUJIOKA, T. ; GODA, K.: *Discrete Brush Tire Model for Calculating Tire Forces with Large Camber Angle*. In: *Vehicle System Dynamics* 25 (1996), Nr. 1, S. 200–216
- [25] GIEBLER, M.: *Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2012 (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik 11)
- [26] GIESSLER, M. ; GAUTERIN, F. ; WIESE, K. ; WIES, B.: *Influence of Friction Heat on Tire Traction on Ice and Snow*. In: *Tire Science and Technology* 38 (2010), Nr. 1, S. 4–23
- [27] GNADLER, R. ; UNRAU, H.-J.: *EC-Research Project TIME — Tire Measurements Forces and Moments : Analysis of Parameter Influences on Tire F&M Testing* (Recitation Additional Colloquium to the EAEC congress), Barcelona, 29. Juni 1999
- [28] GNADLER, R. ; UNRAU, H.-J. ; FISCHLEIN, H. ; FREY, M.: *Ermittlung von μ -Schlupf-Kurven an Pkw-Reifen*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik, 1995 (FAT Schriftenreihe 119)
- [29] GÜTLINGER, J. ; GAUTERIN, F. ; BRANDAU, C. ; SCHLITTENHARD, J. ; WIES, B.: *Investigations of Road Wear Caused by Studded Tires*. In: *Tire Science and Technology* 42 (2014), Nr. 1, S. 2–15
- [30] GÜNTER, F.: *Experimentelle Untersuchung der Verlustleistung von Pkw-Reifen*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH). Dissertation. 1994

- [31] HEIBING, B. ; ERSOY, M.: *Fahrwerkhandbuch : Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011
- [32] HJORT, M. ; BRUZELIUS, F. ; ANDERSSON, H.: *Oversteering on ice and snow with different winter tyres – Method development and field study*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), 2011 (VTI rapport 708)
- [33] HOGAN, J. D. ; ROGERS, R. J. ; SPRAY, J. G. ; BOONSUE, S.: *Dynamic fragmentation of granite for impact energies of 6–28J*. In: *Engineering Fracture Mechanics* 79 (2012), S. 103–125
- [34] HOGAN, J. D. ; SPRAY, J. G. ; ROGERS, R. J. ; VINCENT, G. ; SCHNEIDER, M.: *Dynamic fragmentation of natural ceramic tiles: Ejecta measurements and kinetic consequences*. In: *International Journal of Impact Engineering* 58 (2013), S. 1–16
- [35] HORZ, H. W.: *Aufstellung von Standardversuchen zur Prüfung des Verschleisses von Strassenbelägen im Innentrommelprüfstand der BASt*. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1983 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 388)
- [36] JACOBSON, T. ; WÄGBERG, L.-G.: *Prediction models for pavement wear and associated costs*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), 2005 (VTI särtryck 366A)
- [37] JACOBSON, T. ; WÄGBERG, L.-G.: *Developing and upgrading of a prediction model of wear caused by studded tyres and an overview of the knowledge of the factors influencing the wear*. VTI, 2007 (VTI notat 7-2007)
- [38] JONES, S. J.: *High Strain-Rate Compression Tests on Ice*. In: *The Journal of Physical Chemistry B* 101 (1997), Nr. 32, S. 6099–6101
- [39] KATO, M. ; IJIMA, Y.-I. ; ARAKAWA, M. ; OKIMURA, Y. ; FUKIMURA, A. ; MAENO, N. ; MIZUTANI, H.: *Ice-on-Ice Impact Experiments*. In: *Icarus* 113 (1995), Nr. 2, S. 423–441

- [40] KOLARI, K.: *Damage mechanics model for brittle failure of transversely isotropic solids : Finite element implentation*. [Espoo, Finland] : VTT, 2007 (VTT Publications 628)
- [41] KOUTNY, F.: *Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires*. URL <http://www.koutny-math.com/?download=TIRES.pdf> – Überprüfungsdatum 2013-09-29
- [42] KOUTNY, F.: *A Method for Computing the Radial Deformation Characteristics of Belted Tires*. In: *Tire Science and Technology* 4 (1976), Nr. 3, S. 190–212
- [43] KUMMER, H. W. ; MEYER, W. E.: *Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn - Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie*. Teil 1. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 69 (1967), Nr. 8, S. 245–251
- [44] KUMMER, H. W. ; MEYER, W. E.: *Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn - Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie*. Teil 2. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 69 (1967), Nr. 11, S. 382–386
- [45] LANGE, M. A. ; AHRENS, T. J.: *Impact experiments in low-temperature ice*. In: *Icarus* 69 (1987), Nr. 3, S. 506–518
- [46] LEISTER, G.: *Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung : Strategie, Methoden, Tools*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009
- [47] LEISTER, G. ; RUNTSCH, G.: Ermittlung objektiver Reifeneigenschaften im Entwicklungsprozess mit einem Reifenmessbus. In: BREUER, Bert (Hrsg.): *2. Darmstädter Reifenkolloquium : 16. Oktober 1998*. Düsseldorf : VDI-Verl, 1998 (Berichte aus dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, 362).
- [48] LIEU, D. K. ; MOTE, C. D.: *Experiments in the machining of ice at negative rake angles*. In: *Journal of Glaciology* 30 (1984), S. 77–81
- [49] LU, J. J.: *Studded Tire Performance and Safety*. Transportation Research Center, University of Alaska, [Fairbanks, Alaska], 1994
- [50] LU, J. J.: *Winter Vehicle Traction Controllability Performance*. Transportation Research Center, University of Alaska, [Fairbanks, Alaska], 1995

- [51] LUNDY, J. R. ; HICKS, R. G. ; Scholz T. V. ; ESCH, D. C.: Wheel Track Rutting Due to Studded Tires, Bd. 1348. In: KASSABIAN, Naomi (Hrsg.): *Pavement surface properties : Roughness, rutting, skid resistance, and surface distress*. Washington, D.C : National Academy Press, 1992 (Transportation research record, 1348), S. 18–28
- [52] MADHU, V. ; RAMANJANEYULU, K. ; BALAKRISHNA BHAT, T. ; GUPTA, N.: *An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact*. In: *International Journal of Impact Engineering* 32 (2005), 1-4, S. 337–350
- [53] MAEKELAE, T. ; MERILINNA, M. ; ANTILA, J.: SAE Technical Paper Nr. 940092: New Information on the Differences Between Studded and Unstudded Tyres. In: *1994 Subzero Engineering Conditions Conference proceedings*. Brainerd, Minnesota. February 21-24, 1994 (P-273).
- [54] MILLER, W. P.: *The Winter Tire Stud*. In: *Highway Research Record* 136 (1966), S. 1–6
- [55] MISHRA, D. ; BASU, A.: *Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system*. In: *Engineering Geology* 160 (2013), S. 54–68
- [56] MOTOYASHIKI, Y. ; HASEGAWA, S. ; OKUDAIRA, K. ; SATO, E.: *Micro-meteoroid impact on ceramic thin components for interplanetary probe*. In: *International Journal of Impact Engineering* 35 (2008), Nr. 12, S. 1666–1671
- [57] MUNDL, R. ; MESCHKE, G. ; LIEDERER, W.: *Friction Mechanism of Tread Blocks on Snow Surfaces*. In: *Tire Science and Technology* 25 (1997), Nr. 4, S. 245–264
- [58] NORDSTRÖM, O.: *The VTI Flat Bed Tyre Test Facility - A New Tool for Testing Commercial Tyre Characteristics*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), 1994
- [59] NORDSTRÖM, O.: *The correlation between grip on rough ice of winter tyres and their age, tread depth and tread rubber hardness*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), 2003 (VTI notat 34-2003)
- [60] NORDSTRÖM, O.: *The friction on smooth ice for new and used winter tyres*. VTI, 2003 (VTI meddelande 923)

- [61] NORDSTRÖM, O.: *The friction on wet smooth ice for new and used winter tyres*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), 2004 (VTI meddelande 965)
- [62] NORDSTRÖM, O.: *Friction on ice for new and used winter tyres*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), 2004 (VTI meddelande 966)
- [63] NORDSTRÖM, O. ; ASTRÖM, H.: Upgrading of VTI friction test vehicle BV12 for combined braking and steering tests under aquaplaning and winter conditions. In: *2nd International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction : Friction Potential and Safety: Prediction on Handling Behavior*. Florence. 23.2.2001, 2001
- [64] NORDSTRÖM, O. ; SAMUELSSON, E.: *Studded and non-studded winter tyres*. In: *Nordic Road & Transport Research* (1991), S. 30–37
- [65] OCHIAI, T. ; HIROKI, E.: *Development of indoor tire traction test on compact snow surface*. In: *Technical Notes / JSAE Review* 15 (1994), S. 341–365
- [66] OKSANEN, P. ; KEINONEN, J.: *The mechanism of friction of ice*. In: *Wear* 78 (1982), Nr. 3, S. 315–324
- [67] PACEJKA, H. B. ; BESSELINK, I.: *Tire and vehicle dynamics*. 3rd ed. Oxford, UK, Waltham, MA, [Warrendale, PA] : Butterworth-Heinemann; Distributed in conjunction with SAE International, 2012
- [68] PETRENKO, V. F. ; WHITWORTH, R. W.: *Physics of ice*. Oxford, New York : Oxford University Press, 1999
- [69] RIPKA, S. ; GÄBEL, G. ; WANGENHEIM, M.: *Dynamics of a Siped Tire Tread Block - Experiment and Simulation*. In: *Tire Science and Technology TSTCA* 37 (2009), Nr. 4, S. 323–339
- [70] RIST, M. A. ; S. A. F. Murrell: *Ice triaxial deformation and failure*. In: *Journal of Glaciology* 40 (1994), Nr. 135, S. 305–318
- [71] ROSENBERG, R.: *Why Is Ice Slippery?* In: *Physics Today* 58 (2005), Nr. 12, S. 50–55
- [72] SACHS, L.: *Angewandte Statistik : Anwendung statistischer Methoden*. 11. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2004

- [73] SACHS, L. ; HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik : Methodensammlung mit R*. 12. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006
- [74] SANDBERG, U. ; EJSMONT, J. A.: *Tyre/road noise reference book*. 1. Aufl. Kisa, Sweden, Harg, Sweden : INFORMEX, 2002
- [75] Scandinavian Tire & Rim Organization (STRO): *Nordic Regulations*. URL http://stro.se/english/nordic_regulations.pdf – Überprüfungsdatum 2013-09-29
- [76] Scandinavian Tire & Rim Organization (STRO): *Rules for studded tyres in Europe*. URL <http://www.stro.se/studded.pdf> – Überprüfungsdatum 2013-09-29
- [77] SCHÄFER, Volker (Hrsg.): *Ausschreiben von Asphaltarbeiten* : Deutscher Asphaltverband e.V, 2010
- [78] SCHEIBE, R. R.: *An Overview of Studded and Studless Tire Traction and Safety*. Washington State Transportation Center (TRAC), 2002
- [79] SCHERB, S.: *Entwicklung eines Verfahrens zur effizienten Aufbereitung der Eisfahrbahn im Innentrommelprüfstand*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik. Diplomarbeit. 2010
- [80] SCHEUBA, N.: *Das Zusammenspiel von Spikes und Reifen*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 73 (1971), Nr. 1, S. 18–22
- [81] SCHEUBA, N.: *Die Beanspruchung der Fahrbahn durch Spike-Reifen beim reinen Abrollen*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 74 (1972), Nr. 1, S. 9–13
- [82] SCHINDLER, P.: *Konstruktion und Realisierung einer Vorrichtung zur effizienten Aufbereitung der Eisfahrbahn am Innentrommelprüfstand*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik. Diplomarbeit. 2011
- [83] SCHULSON, E. M.: *The Structure and Mechanical Behavior of Ice*. In: *JOM* 51 (1999), Nr. 2, S. 21–27
- [84] SCHULZE, K. H.: *Untersuchung über den Verschleiß an Straßenoberflächen durch Winterreifen mit Spikes*. In: *Straße und Autobahn* (1968), Nr. 12, S. 455–456

- [85] SHAH, Q. H. ; HAMDANI, A.: *The damage of unconfined granite edge due to the impact of varying stiffness projectiles*. In: *International Journal of Impact Engineering* 59 (2013), S. 11–17
- [86] SHAZLY, M. ; PRAKASH, V. ; LERCH, B. A.: *High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression*. In: *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009), Nr. 6, S. 1499–1515
- [87] SHIMIZU, K. ; IKEYA, C.: *Indoor Test of Ice and Snow Tires on Iced Drum - Development of Tester and Characteristics of Coated Ice for Test*. Society of Automotive Engineers, 1989 (SAE Technical Paper 890004)
- [88] SHRINE, N. R. G. ; BURCHELL, M. J. ; GREY, I. D. S.: *Velocity Scaling of Impact Craters in Water Ice over the Range 1 to 7.3 km s⁻¹*. In: *Icarus* 155 (2002), S. 475–485
- [89] SLIBAR, A. ; SPRINGER, H.: *Mechanische Auswirkungen von Spikes-Reifen verschiedener Profile auf Beton- und bituminöse Fahrbahndecken*. Bundesministerium für Bauten und Technik Österreich, 1974
- [90] SODHI, D. S.: *Nonsimultaneous crushing during edge indentation of freshwater ice sheets*. In: *Cold Regions Science and Technology* 27 (1998), Nr. 3, S. 179–195
- [91] SPRINGENSCHMID, R. ; SOMMER, H.: *Untersuchungen über die Verschleißfestigkeit von Straßenbeton bei Spikereifen-Verkehr*. In: *Straße und Autobahn* 22 (1971), Nr. 4, S. 136–141
- [92] SPRINGENSCHMID, R. ; SOMMER, H.: *Einflüsse von Spikereifen und Geschwindigkeit auf den Verschleiß von Straßenbeton*. In: *Straße und Autobahn* 22 (1971), Nr. 11, S. 483–488
- [93] SVENDENIUS, Jacob ; WITTENMARK, Björn: *Brush Tire Model with Increased Flexibility*. URL <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ecc03/pdfs/317.pdf> – Überprüfungsdatum 2013-09-29
- [94] Test World Ltd: *Determination of road wear caused by studded winter tyres*. URL http://www.testworld.fi/sites/default/files/tiedostot/pdf/TestWorld_Over-Run_method.pdf – Überprüfungsdatum 2013-09-29

- [95] THE MINISTRY OF COMMUNICATION, FINLAND: *Decree for studs in tyres for vehicles* (in Kraft getr. am 18. 6. 2009) (2009-06-18). URL http://www.tikkaspikes.fi/material/LVM_asetus-renkaiden-nastoista_2009-06-18_EN.pdf – Überprüfungsdatum 2013-09-29
- [96] UNHOLA, T.: *Road wear of studded tyres as influenced by some vehicular factors. Over-run test 2004*. Ministry of Transport and Communications Finland, 2004 (Publications of the Ministry of Transport and Communications 72/2004)
- [97] UNHOLA, T.: *Report on the demand for revisal of the restrictions concerning studded tyres and their type approval*. Ministry of Transport and Communications Finland, 2008 (Publications of the Ministry of Transport and Communications 51/2008)
- [98] UNHOLA, T. ; SOLLA, A. ; VESALA, H.: *Road wear caused by studded tyres - Over-run and dust measuring vacuum method*. Ministry of Transport and Communications Finland, 2004 (Publications of the Ministry of Transport and Communications 12/2004)
- [99] UNRAU, H.-J. ; ZAMOW, J.: *TYDEX-Format : Description and Reference Manual*. Release 1.3, 09.01.1997
- [100] USAMI, K. ; FUKUDA, K. ; YAMANOI, K.: *On-Snow Tire-Testing Method, on-Snow Tire-Testing System, and Road Surface for on-Snow Tire Tests*. Bridgestone Corporation. Schutzrecht, Veröffentlichungsnr. US 6,408,689
- [101] VAINIKKA, J. ; PIRJOLA, H. ; SAINIO, P. ; JUHALA, M.: *Mini- μ -Road and LONTRA - Arctic Friction Measuring Devices in Laboratory and on Field and their Correlation*. Helsinki University of Technology, Laboratory of Automotive Engineering, 2004
- [102] WACHTER, L. M. ; RENSHAW, C. E. ; SCHULSON, E. M.: *Transition in brittle failure mode in ice under low confinement*. In: *Acta Materialia* 57 (2009), S. 345–355
- [103] WEBER, R.: *Der Kraftschluss von Fahrzeugreifen und Gummiprüfungen auf vereisten Oberflächen*. Universität Karlsruhe. Dissertation. 1970

- [104] WELLS, J. ; JORDAAN, I. ; DERRADJI-AOUAT, A. ; TAYLOR, R.: *Small-scale laboratory experiments on the indentation failure of polycrystalline ice in compression: Main results and pressure distribution*. In: *Cold Regions Science and Technology* 65 (2011), Nr. 3, S. 314–325
- [105] WHITEHURST, E. A. ; EASTON, A. H.: *An Evaluation of Studded Tire Performance*. In: *Highway Research Record* 171 (1967), S. 14–27
- [106] WIESE, K. ; KESSEL, T. M. ; MUNDL, R. ; WIES, B.: *An Analytical Thermodynamic Approach to Friction of Rubber on Ice*. In: *Tire Science and Technology* 40 (2012), S. 124–150
- [107] WONG, J. Y.: *Theory of ground vehicles*. 4. Aufl. Hoboken, N.J : Wiley, 2008

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrentriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert
Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen
Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3

Spikereifen ermöglichen eine verbesserte Kraftübertragung und ein stabileres Fahrzeugverhalten auf vereisten Fahrbahnen. Im direkten Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche verursachen sie jedoch einen Verschleiß der Fahrbahndeckschicht. Dieser Zielkonflikt zwischen guter Kraftübertragung auf Eis einerseits und geringem Fahrbahnverschleiß andererseits stellt eine große Herausforderung in der Spikereifenentwicklung dar.

Vor diesem Hintergrund verfolgt diese Arbeit das Ziel, Verständnis über die Wirkmechanismen für die Kraftübertragung und den Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen zu entwickeln und den Einfluss verschiedener Konstruktions- und Betriebsparameter zu identifizieren. Dazu wird ein ein physikalisches Modell entwickelt, das die Interaktion zwischen Spikereifen und Fahrbahn beschreibt, und es werden Labormessverfahren vorgestellt, mit denen sich die Eigenschaften von Spikereifen experimentell bewerten lassen. Anhand umfangreicher Parameterstudien werden die aus der theoretischen Betrachtung abgeleiteten Einflüsse experimentell überprüft.