

**Messung
der Kräfte und Bewegungen
von profilierten Reifen
in der Kontaktfläche auf
einem Trommelprüfstand
bei realen Geschwindigkeiten**

von
Stephan H. Köhne

**Messung
der Kräfte und Bewegungen
von profilierten Reifen
in der Kontaktfläche auf
einem Trommelprüfstand
bei realen Geschwindigkeiten**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stephan H. Köhne
aus Aachen

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferent:

13.2.2002

Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Gnadler

Professor Dr.-Ing. C. Stiller

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Versuchsabteilung der Firma Continental AG in Hannover.

Herrn Dr. Sommer, dem ehemaligen Leiter der Abteilung Testmaschinen- und Testmethodenentwicklung, danke ich für seine Unterstützung und stetige Förderung der Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Gnadler danke ich für die Übernahme des Hauptreferats und Herrn Professor Dr.-Ing. Christoph Stiller danke ich für die Übernahme des Korreferats und die damit verbundenen Mühen bei der Durchsicht der Arbeit.

Meinem Projektteam bei der Firma Continental, welches mich bei der Verwirklichung des Prüfstandes unterstützt hat, möchte ich auf diesem Wege danken.

Meiner Lebensgefährtin Sylvia Vollwille sowie meinem Vater und meiner Mutter möchte ich für die Unterstützung bei der Korrektur der Arbeit und der Umsetzung in die neue Rechtschreibung danken.

Kurzfassung:

Mit Hilfe eines Trommelprüfstandes werden in dieser Arbeit die Kräfte und Bewegungen in der Kontaktfläche von profilierten Reifen untersucht. Dabei werden die Kräfte des gesamten Reifens mit einer Auflösung von 1mm^2 bei realen Geschwindigkeiten gemessen. Mit Hilfe dieser Daten können sowohl lokale Reibenergien als auch lokale Reibwerte ermittelt werden.

Um dies zu realisieren wird ein komplett neuer Trommelprüfstand entwickelt, der einerseits die Prüfparameter Last, Luftdruck, Geschwindigkeit, Sturz- und Schräglauf einregeln kann und der andererseits den Prüfablauf, bei dem die Radposition über eine Messspur vertikal verschoben wird, durchfahren kann. Zusätzlich muss eine neue Messsensorik entwickelt werden, die unempfindlich auf den Fliehkräfteinfluss bei hohen Geschwindigkeiten ist und mit der eine Übertragung aus der rotierenden Trommel möglich ist.

Zur Validierung des Prüfstandes werden die Messwerte des in dieser Arbeit erstellten Prüfstandes mit Messwerten des Flachbahnprüfstandes der Firma Smithers verglichen. Die Kraft- und Bewegungsmessungen zeigen hierbei eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen auf dem Trommelprüfstand und den Messungen auf dem Flachbahnprüfstand.

Zusätzlich werden Untersuchungen durchgeführt, deren Schwerpunkt in der Ermittlung von unregelmäßigen Abriebsphänomenen liegt. Aus diesem Grund werden die gleichen Prüfstandsbedingungen beim Maschinenabriebstest und den Messungen auf dem Trommelprüfstand gewählt. Bei der Validierung der Abriebsergebnisse zeigt sich, dass das Maschinenabriebsergebnis und die Vorhersage der Abriebsergebnisse mit Hilfe der Daten der 3 Komponenten-Kraftmessung eine gute Übereinstimmung haben. Nur die Abriebsphänomene auf der Außenschulter können mit diesem Verfahren nicht vorausgesagt werden. Zieht man jedoch noch die Bewegungsmessungen in Längsrichtung hinzu, lassen sich auch Angaben über den Abrieb auf der Außenschulter machen.

Bei der Ursachenbetrachtung erkennt man, dass die dynamische Kontur einen großen Einfluss auf den unregelmäßigen Abrieb bei Reifen hat. Blöcke, die beim Einlauf oder Auslauf beispielsweise spitz ein- oder auslaufen, sind im höchsten Maße abriebsgefährdet. Hier finden sich auch die höchsten Abriebsenergien. Bei der Betrachtung der Abriebshöhenverläufe auf dem Umfang des Reifens lassen sich wiederum die Ein- und Auslaufkonturverläufe wiederfinden.

Eine erste Untersuchung zu unterschiedlichen Fahrwerkseinstellungen zeigt den Einfluss von Sturz und Schräglauf auf das Abriebsverhalten von Reifen. Bei diesen Untersuchungen wird gezeigt, dass verschiedene Sturz- und Schräglaufvarianten einen unterschiedlichen Abrieb hervorrufen. Der Grund hierfür liegt in der andersartigen Druck- und Querkraftverteilung in der Bodenaufstandsfläche bei den jeweiligen Zuständen, die sich dann in verschiedenen örtlichen Reibwerten dokumentieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
	1.1 Stand der Technik	8
	1.2 Ziel der Arbeit	9
2	Grundlagen der Mechanik von Luftreifen	11
	2.1 Kontaktfläche	11
	2.2 Normalkraftverteilung	11
	2.3 Tangentialkraftverteilung	12
	2.4 Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche	15
	2.5 Reifenreibung	17
	2.6 Zusammenhang zwischen Reibwert / Reibenergie und Abrieb	18
	2.7 Festlegung der Betrachtungsebenen	21
3	Prüfstands Aufbau	24
	3.1 Literaturrecherche und Motivation zum Prüfstands Aufbau	24
	3.2 Prüfstand	26
4	Messtechnik	30
	4.1 Messtechnik 3K-Kraftmessung	30
	4.1.1 Konzept der 3 K-Kraftmessung am Prüfstand	30
	4.1.2 Realisierung der 3 K-Kraftmessung am Prüfstand	34
	4.1.3 Kalibrierung der 3 K-Kraftmessung	34
	4.2 Messtechnik Schlupfmessung	38
	4.2.1 Konzept der Schlupfmessung am Prüfstand	38
	4.2.2 Realisierung der Schlupfmessung am Prüfstand	39
	4.2.3 Kalibrierung der Schlupfmessung	43
	4.3 Messwerterfassung und Messwertzuordnung	44
	4.3.1 Messwerterfassung der 3 K-Kraftmessung	45
	4.3.2 Messwerterfassung der Schlupfmessung	45
5	Auswertung der 3 K-Messungen	46
	5.1 Korrektur der Störeinflüsse	46
	5.2 Darstellungsformen der Messwerte	46
	5.3 Berechnung der örtlichen Reibwerte	50
	5.4 Berechnung der Reibenergien aus den 3K-Kraftverläufen	50

6	Auswertung der Schlupfmessungen	52
	6.1 Betrachtung und Interpretation der Ergebnisse	52
	6.2 Darstellungsformen der Messwerte	53
	6.3 Konturermittlung aus den Schlupfmessungen unabhängig von der Profilgeometrie	54
7	Validierung der Messung	56
	7.1 Vergleich der 3 K-Messergebnisse von Trommel- und Flachbahnprüfstand	56
	7.2 Vergleich der Schlupfmessung am Trommel- und Flachbahnprüfstand	62
	7.3 Zusammenfassung der Vergleichsuntersuchungen zur Spannungs- und Schlupfverteilung	64
	7.4 Ermittlung der Abriebsenergie aus den 3 K-Messungen	64
	7.5 Vergleich der ermittelten Abriebsenergien mit Maschinenabriebs- ergebnissen	66
	7.6 Untersuchung der Ursachen für den unregelmäßigen Abrieb	72
	7.7 Zusammenfassung der Validierung	74
8	Untersuchung der Fahrwerkseinflussgrößen	75
	8.1 Versuchsprogramm	75
	8.2 Abriebsprognosen	76
	8.3 Ursachen für die unterschiedlichen Abriebsbilder	78
9	Zusammenfassung und Ausblick	84
	9.1 Zusammenfassung	84
	9.2 Ausblick	85
10	Verwendete Formelzeichen	86
11	Literaturverzeichnis	87

1. Einleitung

Die Optimierung des Reibkontaktes zwischen Fahrbahn und Reifen steht schon seit Beginn der Entwicklung von Reifen im Mittelpunkt der Entwicklungsanstrengungen. Ein optimaler Reibkontakt muss bei unterschiedlichsten Zuständen realisiert werden. Diese Zustände sind unter anderem Bremsen, Traktion und Handling (Kurvenfahrten). Zu diesem Zweck werden Reifenkonstruktionen, -mischungen und -profile immer weiter verbessert. Um diese Eigenschaften während der gesamten Lebensdauer eines Reifens gewährleisten zu können, gewinnt gleichförmiger und gleichmäßiger Abrieb bei der Reifenentwicklung einen immer höheren Stellenwert. Jedoch auch Geräusch und Laufleistung stehen immer mehr im Entwicklungsschwerpunkt, insbesondere aufgrund von immer leiseren Fahrzeugen, höheren Anforderungen zur Ressourcenschonung und zur Steigerung der Kundenzufriedenheit.

Dabei ist die Ursache für Abrieb von besonderem Interesse. Zur Zeit werden Abriebsuntersuchungen meist in Form von Straßenabriebsversuchen oder auf Abriebsmaschinen durchgeführt. Neuere Methoden zur Abriebsuntersuchung sind Messungen der Bewegungs- und Kraftverteilung in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Straßenoberfläche, der sogenannten Bodenaufstandsfläche [Pott-99]. Hierbei werden die Ursachen für den Abrieb gesucht, um mit gezielten Maßnahmen Verbesserungen vornehmen zu können. Die Ursachen für Abrieb sind jedoch in der Regel lokal begrenzte Effekte, so dass Auflösungen der Kraft- und Bewegungsmessungen im 1mm² Bereich erforderlich sind. Darüber hinaus sind die Ursachen für Abrieb nicht gleichmäßig auf den Umfang verteilt, was eine Betrachtung des gesamten Reifens erforderlich macht.

Die lokalen Kräfte und Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche spielen aber auch im Hinblick auf das Verständnis von Fahrverhalten und die Modellbildung für Reifensimulationsrechnungen eine immer größere Rolle. Hintergrund hierfür ist, dass die Fahrzeughersteller schon in der Entwicklungsphase mit der Fahrwerksoptimierung beginnen. Da der Reifen einen Teil des Fahrwerks darstellt, benötigen die Automobilhersteller u. a. Daten über die Reifeneigenschaften, um in dieser frühen Phase der Entwicklung Optimierungen vornehmen zu können.

1.1 Stand der Technik

Zur Zeit finden die Untersuchungen der lokalen Kräfte und Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche fahrbahnseitig hauptsächlich auf sogenannten Flachbahnprüfständen und Trommelprüfständen statt [Ludw-98].

Flachbahnprüfstände bestehen aus einem Tisch, der unter dem Reifen in radialer Richtung verfahren werden kann und dessen Länge der Fahrbahn durch die Tischlänge begrenzt ist. Trommelprüfstände hingegen verfügen über eine unbegrenzte Fahrbahn, da der Reifen auf der Trommeloberfläche abrollt und diese Oberfläche eine geschlossene Kreisbahn darstellt.

Der Nachteil der Flachbahnprüfstände besteht zum einen in dem hohen Aufwand zur Ermittlung der Kräfte und Bewegungen, da jeder Messpunkt durch die begrenzte Fahrbahn einzeln angefahren werden muss. Zum anderen besteht ein weiterer Nachteil in der Einschränkung auf niedrige Prüfgeschwindigkeiten, da dem Prüfstand aufgrund der

begrenzten Tischlänge nur geringe Beschleunigungs- und Abbremswege zur Verfügung stehen. Trommelprüfstände ermöglichen höhere Geschwindigkeiten; jedoch ist eine genaue Positionszuordnung der Messungen auf den Reifen bei diesen Prüfständen bisher noch nicht realisiert worden.

Bei den Messungen der Bewegungen und Kräfte werden unterschiedliche Konzepte verfolgt. Dabei handelt es sich um Sensorkonzepte, bei denen der Bewegungssensor im Kraftsensor integriert ist und um Konzepte, bei denen die Messungen unabhängig voneinander erfolgen.

Bei den Messverfahren zur Bewegungsmessung finden die Messungen in Bereichen statt, in denen der Reifen keinen Kontakt zur Fahrbahn hat. Dabei wird eine Nadel im Kontakt mit den Reifen in einem Loch mitbewegt beziehungsweise verbogen, dies führt zu Verfälschungen, da sich unter anderem der Reifen in dem Loch abstützt.

Zur Messung lokaler Phänomene ist eine möglichst geringe Auflösung, d.h. eine kleine Messstiftoberfläche notwendig. Auf Flachbahnprüfständen sind Messstifte mit einer Oberfläche von 1mm^2 realisiert worden, aber die Messung eines gesamten Reifens mit ca. 200000 Messstellen ist aufgrund der Messzeit hier nicht praktikabel. Bei Trommelprüfständen sind zur Zeit nur Messstiftdurchmesser für die Kraftmessung bis 7mm realisiert worden, da bisher der Fliehkrafteinfluss auf den Sensor geringere Messstiftdurchmesser verhinderte.

Eine Betrachtung der gesamten Kräfte in der Bodenaufstandsfläche mit 1mm^2 Auflösung war daher noch nicht möglich, jedoch existieren Verfahren mit deren Hilfe man die Normalkräfte einer Bodenaufstandsfläche eines Reifens mit einer drucksensitiven Folie in einer Auflösung von 1mm^2 ermitteln kann. Desweiteren gibt es Verfahren mit Plexiglasplatten, die eine Erfassung der Normalkraft ermöglichen; diese Verfahren sind jedoch auch auf kleine Geschwindigkeiten beschränkt. Weitere Erläuterungen zu bereits durchgeführten Kraft- und Bewegungsmessungen werden in Abschnitt 3.1 gegeben.

Zur Untersuchung lokaler Kräfte in den 3 Raumrichtungen und Bewegungen sind höhere Auflösungen als die zur Zeit realisierten Auflösungen notwendig, damit unter anderem das Reifenprofil aufgelöst werden kann. Aufgrund der Messzeit aber auch um Geschwindigkeitseinflüsse untersuchen zu können, müssen höhere Prüfgeschwindigkeiten bei den Messungen realisiert werden. Zur Verbesserung der Bewegungsmessungen müssen Messverfahren entwickelt werden, mit denen im Kontakt gemessen werden kann. Schließlich muss ein Verfahren entwickelt werden, welches die genaue Zuordnung der Messwerte auf den Reifen ermöglicht.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, einen Prüfstand zu entwickeln, mit dem die Erfassung der Bewegungen und Kräfte bei realen Geschwindigkeiten in der Bodenaufstandsfläche des gesamten Reifens möglich ist.

Bei den 3 Komponenten-Kraftmessungen soll eine Messtechnik entwickelt werden, mit deren Hilfe die Kräfte in einer Auflösung von $< 1\text{mm}^2$ am gesamten Reifen gemessen werden können.

Für die Bewegungsmessung soll ein Messequipment entwickelt werden, das die Bewegungen des Reifens im Kontakt mit der Berührfläche erfassen kann.

Die gemessenen Daten sollen möglichst genau dem vermessenen Reifen zugeordnet werden können, so dass für die gemessenen Daten Darstellungsformen und Auswertungen entwickelt werden können.

Mit Hilfe dieser Auswertungen sollen erste Untersuchungen zur Korrelation der Messergebnisse zum unregelmäßigen Abrieb erfolgen und Ursachen für den unregelmäßigen Abrieb aufgezeigt werden.

2. Grundlagen der Mechanik von Luftreifen

Bei der Mechanik von Luftreifen wird grundsätzlich in der Bodenaufstandsfläche zwischen drei Charakteristiken unterschieden [Clar-82]. Diese Charakteristiken sind:

- a) Die Bodenaufstandsfläche oder Kontaktfläche.
- b) Der Schlupf oder die Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn.
- c) Die Normal- und Tangentialkräfte zwischen Reifen und Fahrbahn.

In der Bodenaufstandsfläche von Reifen treten Kräfte in allen drei Raumrichtungen und Bewegungen in zwei Raumrichtungen auf. Die Kraft, die radial auf den Reifen in der Bodenaufstandsfläche wirkt, wird im Folgenden Normalkraft oder Vertikalkraft F_n genannt. Bei den Kräften, die tangential in der Bodenaufstandsfläche auftreten, wird zwischen der Circumferential- oder Umfangskraft F_u , die in Umfangsrichtung auftritt und der Lateral- oder Querkraft F_q , die in Querrichtung auftritt, unterschieden. Die zwischen Reifen und Fahrbahn auftretenden Bewegungen in Umfangsrichtung bezeichnet man als Circumferential- oder Umfangsschlupf S_u und die in Querrichtung als Lateral- oder Querschlupf S_q (siehe auch Abbildung 2.13).

Die Verteilung der Kräfte und Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche hat wesentlichen Einfluss auf die übertragbaren Kräfte und Momente der Reifen (Traktion, Bremsen und Kurvenfahrten). Darüber hinaus beeinflusst die Verteilung der Kräfte und Bewegungen auch das Abriebsverhalten von Reifen.

Bei der Betrachtung der übertragbaren Kräfte müssen im Zusammenhang mit Reifen darüber hinaus auch die viskoelastischen Eigenschaften von Gummi und das daraus resultierende Reibverhalten berücksichtigt werden.

2.1 Kontaktfläche

Die Form und die Größe der Kontaktfläche von Reifen ist im Wesentlichen abhängig von der Struktur (Gürtelkonstruktion) und der Außenkontur des Reifens. Unter gleichen Last-/Luftdruckverhältnissen bleibt die Form der Kontaktfläche konstant, während sich die Kräfte in Normalrichtung in Abhängigkeit vom Luftdruck ändern. Bei höheren Geschwindigkeiten ändert sich die Kontaktfläche, da dem Reifeninnendruck der Fliehkrafteinfluss zunehmend überlagert wird. Die Form der Kontaktfläche ändert sich jedoch auch durch Sturz, Schräglauf, Bremsen etc. .

2.2 Normalkraftverteilung

Die Normalkraft spiegelt die Radlast des Reifens wieder. Die Normalkraftverteilung ist -ähnlich wie die Kontaktfläche- abhängig von der Konstruktion, der Kontur und den oben genannten Freiheitsgraden. Ziel bei der Reifenentwicklung ist es, eine möglichst gleichmäßige Druckverteilung bei Normallast und Bremslast zu erzielen. Der Grund hierfür liegt in der Druckabhängigkeit des Reibkoeffizienten von Gummi, der im Gegensatz zur Coulomb'schen Reibung steht. Bei Gummi wächst die übertragbare Kraft

mit steigendem Druck nicht linear wie zum Beispiel bei Stahl an, d.h. der Reibwert bleibt nicht konstant, sondern der Reibwert nimmt mit zunehmender Last ab. Die Gummireibung ist jedoch nicht nur vom Normaldruck, sondern auch von der Temperatur und der Gleitgeschwindigkeit abhängig (siehe Abbildung 2.1)[Kumm-67].

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{P}{E} \right)^{-n}$$

Darüber hinaus ist jedoch der Reibwert noch von der Oberflächentopologie abhängig. Für rauhe Oberflächen liegt n bei ungefähr 1/9, bei glatten um die 1/3 [Gros-79].

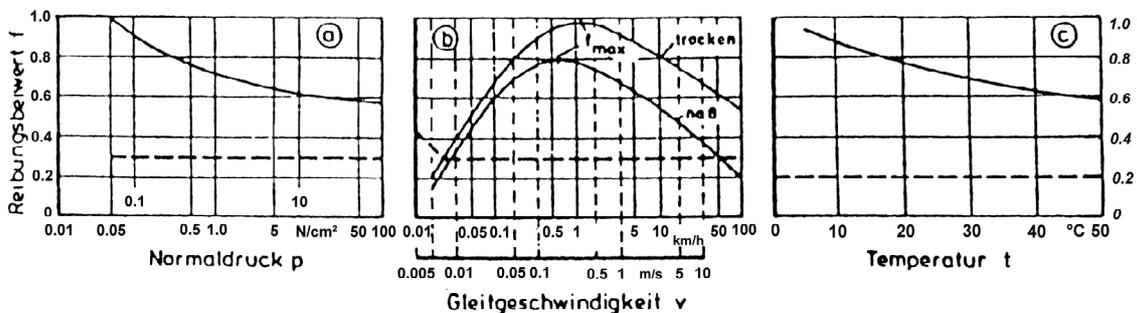


Abbildung 2.1: Vergleich der Gummireibung(—) mit der Coulomb'schen Reibung (---) [Kumm-67]

2.3 Tangentialkraftverteilung

Die Tangentialkräfte werden in eine Komponente in Umfangs- und in eine Komponente in Querrichtung aufgeteilt. Die Quer- und Umfangskräfte entstehen durch die Reifengeometrie und durch die zu übertragenden Kräfte. Bei einem Reifen handelt es sich um einen doppelt gekrümmten Körper, der sowohl in Umfangsrichtung als auch in Querrichtung gekrümmt ist. Wird der Reifen nun abgeplattet, wird der runde Bogen des Reifenschnitts komprimiert und der Gummi des Laufstreifens wird vom Zentrum zur Außenseite gedrückt.

Die dadurch entstehenden entgegengesetzten Tangentialkräfte in Querrichtung sind beim statischen Abdruck alle symmetrisch zur Längsachse nach innen gerichtet (siehe Abbildung 2.2 a) [Kraf-54, Mart-36, Mart-54, Mart-39].

Vergleichbar verhält sich der Reifen in Umfangsrichtung. Die beim Abplatten entstehenden Tangentialkräfte in Umfangsrichtung sind symmetrisch zur Achse der Kontaktfläche und in Fahrtrichtung ausgerichtet (siehe Abbildung 2.2 b).

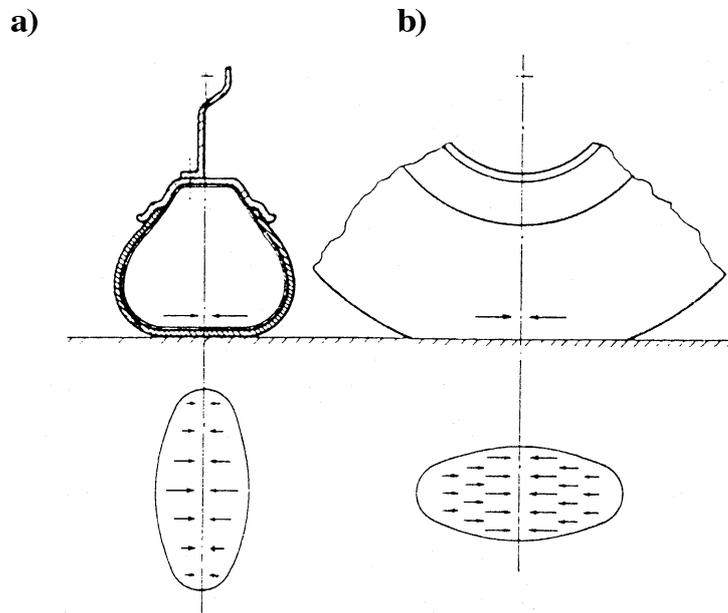


Abbildung 2.2: Tangential Kräfte in Längs- und Querrichtung beim statisch abgeplatteten Reifen [Kraf-54, Mart-36]

Diese Kräfte entstehen durch die Abplattung, da der Reifen in der Kontaktfläche auf eine andere Bahn mit einem anderen Bahnradius und damit mit einer anderen Bahngeschwindigkeit gezwungen wird. Dies führt dann bei einem abrollenden Reifen im Bereich der Einlaufzone zu einem Abbremsen des Profilblocks und im Bereich der Auslaufzone zu einer Beschleunigung (siehe Abbildung 2.3). Durch dieses Abbremsen und Beschleunigen entstehen die charakteristischen Längskraftverläufe.

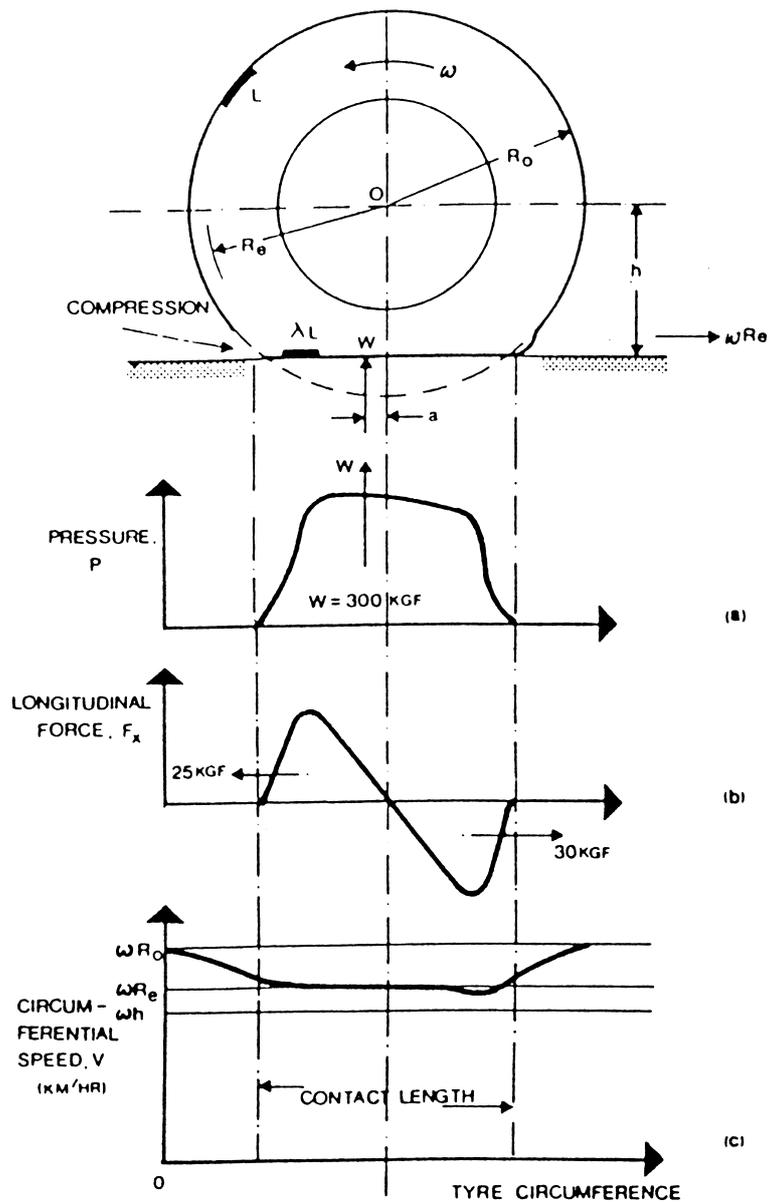


Abbildung 2.3: Resultierende Kräfte und Bewegungen durch die Abplattung [Moor-75]

Betrachtet man nun die Überlagerung der Längs- und Querkräfte, so wird der Verlauf der Kräfte und Bewegungen komplexer (siehe Abbildung 2.4).

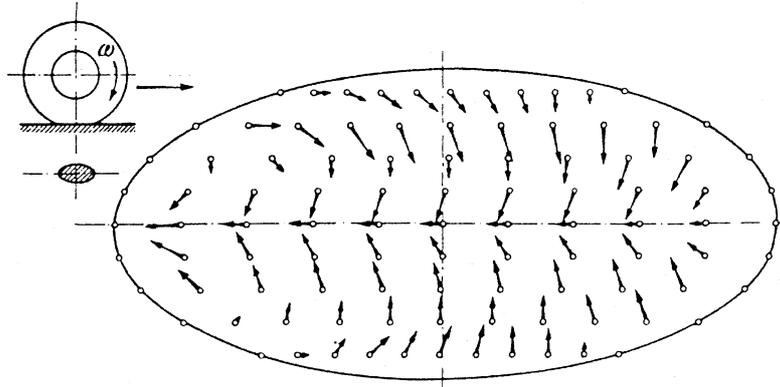


Abbildung 2.4: Tangentialkräfte in Längs- und Querrichtung beim rollenden Reifen [Kraf-54].

In Abhängigkeit vom Reibwert der Oberfläche sind unterschiedliche Blockgeometrien optimal. Bei Eis und Schnee - einem sehr geringen Oberflächenreibwert - sind stark lamellierte Profile und bei Nässe grob lamellierte Profile optimal, da die Lamellen sich in der Oberfläche verhaken und so die übertragbare Kraft erhöhen. Bei trockenen Oberflächen mit hohem Reibwert sind umlaufende Blöcke am besten, da sich diese wenig verformen und so die maximale Reibfläche zur Verfügung steht.

Die örtlichen Querkräfte entstehen beim geradeaus rollenden Reifen zum einen durch die Reifengeometrie, da ein gekrümmter Körper auf eine gerade Bahn gezwungen wird, und zum anderen durch die Strukturseitenkraft, die in der unterschiedlichen Abplattung der Gürtellagen begründet liegt.

Auf Fahrzeugen werden in der Regel die Reifen jedoch unter einem Schräglaufwinkel und Sturz montiert, wodurch zusätzliche Seitenkräfte entstehen, die insbesondere auf der Hinterachse zur Stabilisierung des Fahrzeuges dienen. Diese Seitenkräfte entstehen durch die unterschiedlichen Bahnen, auf die die Profilblöcke in der Kontaktfläche gezwungen werden und lassen sich deshalb auch in der Querkraftverteilung in der Bodenaufstandsfläche wiederfinden.

2.4 Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche

Nach der Gummireibungstheorie findet eine Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn nur dann statt, wenn eine Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn stattfindet. Diese Relativbewegung nennt man auch Schlupf [Meye-64]. Beim Schlupf unterscheidet man grundsätzlich zwischen Gleit- und Deformationsschlupf. Als Deformationsschlupf bezeichnet man den Schlupf, der durch die Verformung des Profils entsteht. Der Gleitschlupf, der in diesem Zusammenhang betrachtet wird, ist die Bewegung zwischen Oberfläche und Reifen (siehe Abbildung 2.5).

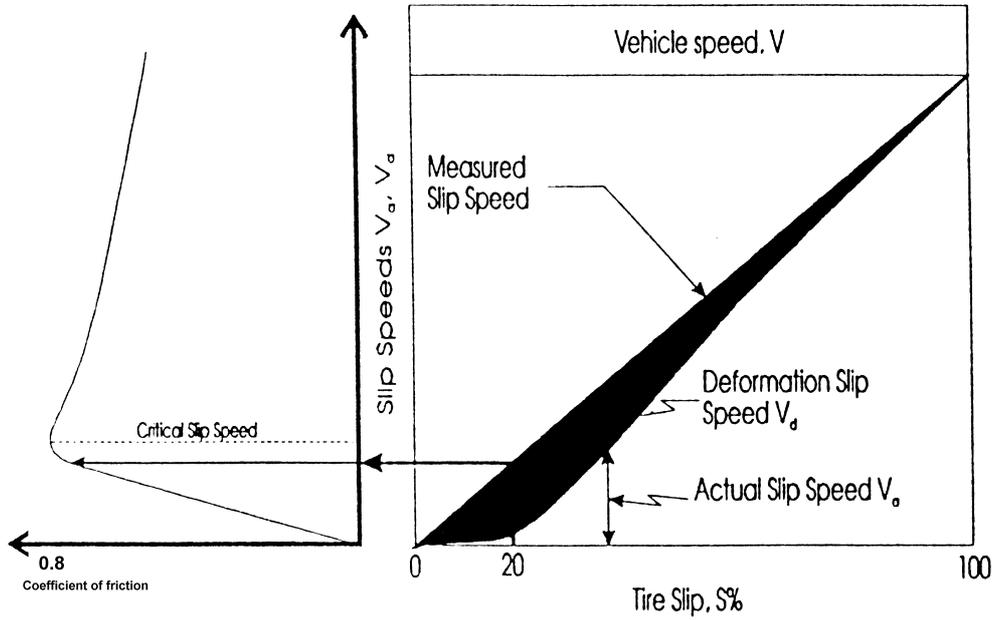


Abbildung 2.5: Schlupfaufteilung in Deformationsschlupf und Gleitschlupf [Rado-94]

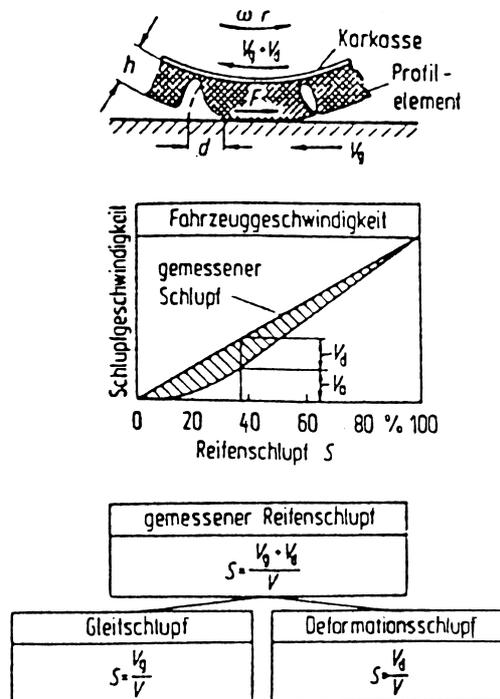


Abbildung 2.6: Modell zur Schlupfaufteilung [Kumm-67]

In Abbildung 2.6 wird deutlich, dass bei kleinen Schlupfgeschwindigkeiten der Schlupf ausschließlich aus Deformationsschlupf besteht und bei einer Erhöhung der Schlupfgeschwindigkeit der Deformationsschlupf zunehmend durch den Gleitschlupf bis zu einem reinen Gleiten der Profilelemente ersetzt wird.

Ähnlich wie bei den Kräften unterscheidet man auch hier zwischen Umfangs- und Querschlupf. Die Ursachen für den Umfangsschlupf und den Querschlupf sind im Wesentlichen die gleichen wie bei den Umfangskräften und den Querkraften. Kommt es zu Bewegungen der Profilblöcke, geschieht dies meistens beim Einlauf / Auslauf der Profile in / aus der Bodenaufstandsfläche. Der Einlauf und der Auslauf sind die Zonen, in denen die Anpassung der jeweiligen Bahngeschwindigkeiten vorgenommen werden, d. h., dass hier Teile des Profils abgebremst beziehungsweise beschleunigt werden. Das Einlaufen wird allgemein auch als „snap in“ und das Auslaufen als „snap out“ bezeichnet (siehe auch Abbildung 2.3).

2.5 Reifenreibung

Bei der Betrachtung der Reifenreibung in der Kontaktfläche sind zunächst die mechanischen Eigenschaften von Gummi grundlegend für das Reibverhalten. Gummi gehorcht aufgrund seines viskoelastischen Verhaltens nicht den Gesetzen der Coulomb'schen Reibung, sondern ist im starken Maße abhängig von den Randbedingungen Normalkraft, Temperatur und der Geschwindigkeit (siehe auch Abbildung 2.1) [Bach-96].

Bei der Gummireibung unterscheidet man zwischen den Komponenten Adhäsionsreibung, Hysteresereibung, Kohäsionsreibung und einem viskosen Reinkraftanteil [Meye-64, Kumm-66, Fink-82].

$$F = F_{ad} + F_{hy} + F_{ko} + F_{vi}$$

Die Adhäsionsreibung beruht auf den molekularen Anziehungskräften zwischen den Reibpartnern und stellt meist den Hauptanteil der Reibung dar [Geye-72]. Werden die molekularen Anziehungskräfte durch rauhere Oberflächen oder Zwischenmedien wie zum Beispiel Wasser reduziert, tritt die Hysteresereibung, die aus den Dämpfungsverlusten der Deformation des Gummis resultiert, in den Vordergrund. Kohäsionsreibung beschreibt die Energieverluste, die bei Abrieb oder Rissen entstehen und für die Erzeugung einer neuen Oberfläche aufgewendet werden müssen. Als viskoser Reibkraftanteil wird die Reibung bezeichnet, die aus der Scherung einer viskosen geschlossenen Flüssigkeitsschicht zwischen den Reibpartnern resultiert [Fink-82].

Zwischen Reifen und Fahrbahn treten von den oben beschriebenen Reibungskomponenten in der Regel nur die Adhäsionsreibung und die Hysteresereibung auf. Der Hystereseeanteil ist dabei auf trockenen Fahrbahnen von geringer Bedeutung.

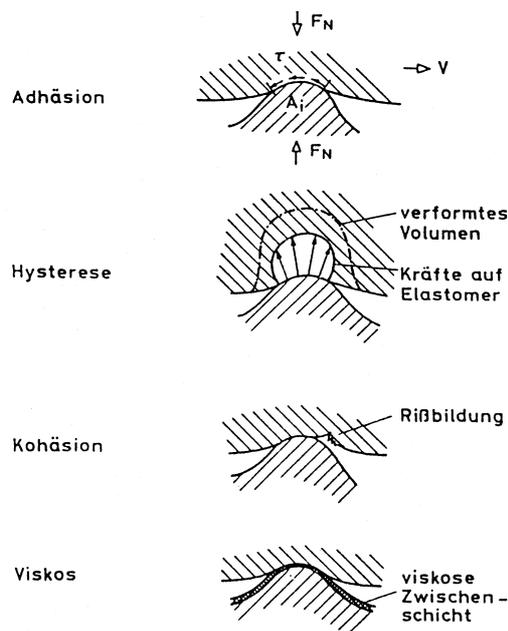


Abbildung 2.7: Einzelkomponenten der Reibung [Geye-72]

2.6 Zusammenhang zwischen Reibwert / Reibenergie und Abrieb

Abrieb entsteht durch die Bewegung des Reifens unter Reibung. Somit ist, wie schon beschrieben, Abrieb insbesondere von den Kräften und Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche abhängig [Scha-61].

Allgemein unterscheidet man beim Abrieb zwischen energetischer Abriebsrate und linearer Abriebsrate. Die lineare Abriebsrate beschreibt das Maß des Gewichtsverlustes des Reifens pro Kilometer und wird angegeben in (g/km). Die energetische Abriebsrate setzt sich aus dem Verhältnis Gewichtsverlust zu Energiekonsum durch Reibung (Reibenergie) zusammen und wird angegeben in (g/Nm) [Gros-79, Saka-96]. Darüber hinaus wird bei Moore ein Energieindex der Reibung beschrieben. Der Index setzt sich aus dem Verhältnis von Abriebsvolumen und aus der benötigten Energie zusammen (cm³/kWh) [Moor-80].

Allgemein bezeichnet man mit dem Reibwert μ die Beschaffenheit beispielsweise von Straßenoberflächen sowie die Reibeigenschaften u.a. von Gummi. Dabei wird aber die Interaktion zwischen Oberfläche und Reibpartner oft vernachlässigt. Der örtliche Reibwert μ setzt sich aus dem Verhältnis des Betrages der örtlichen Tangentialkräfte zu der örtlichen Normalkraft zusammen, meist wird jedoch nur der Maximalwert betrachtet.

$$\mu = \frac{\sqrt{(F_u^2 + F_q^2)}}{F_n}$$

Die Reibenergie E_r ist die Energie, die durch die Profilbewegung entsteht. Sie ergibt sich aus der Energie in Längs- und in Querrichtung.

$$E_r = \int F_u ds_u + \int F_q ds_q$$

In der Literatur wird ein Zusammenhang zwischen Abrieb und Reibwert beschrieben [Gros-79, Saka-96, Moor-80]. Sakai untersucht in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit des Reibwertes und der energetischen Abriebsrate, von der Schlupfgeschwindigkeit, der Temperatur und dem Normaldruck.

Betrachtet man die lineare Abriebsrate im Vergleich zur energetischen Abriebsrate in Abhängigkeit von der Schlupfgeschwindigkeit, so zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Verläufen (Abbildung 2.8, 2.9).

Dabei ist eine klare Korrelation zwischen energetischer Abriebsrate und Reibwert für die Temperatur und Schlupfgeschwindigkeit zu erkennen; beim Normaldruck hingegen gibt es einen gegenläufigen Trend (siehe Abbildungen 2.8, 2.9, 2.10, 2.11). Einen ähnlichen Zusammenhang zwischen energetischer Abriebsrate und Reibwert für unterschiedliche Temperaturen findet sich auch bei Grosch [Gros-79, Gros-74].

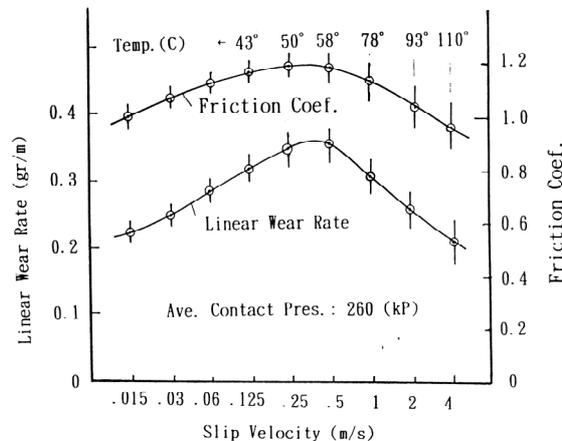


Abbildung 2.8: Abhängigkeit der linearen Abriebsrate und des Reibwertes von der Schlupfgeschwindigkeit [Saka-96]

2. Grundlagen der Mechanik von Luftreifen

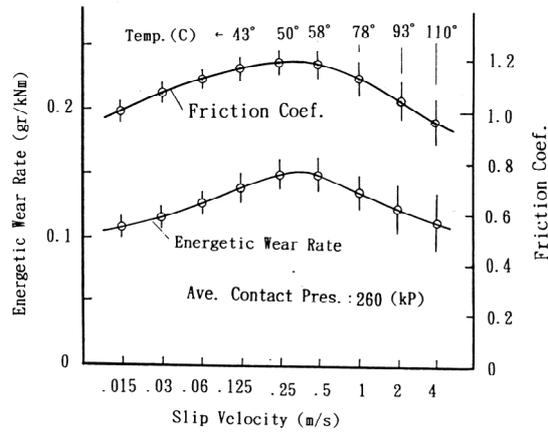


Abbildung 2.9: Abhängigkeit der energetischen Abriebsrate und des Reibwertes von der Schlupfgeschwindigkeit [Saka-96]

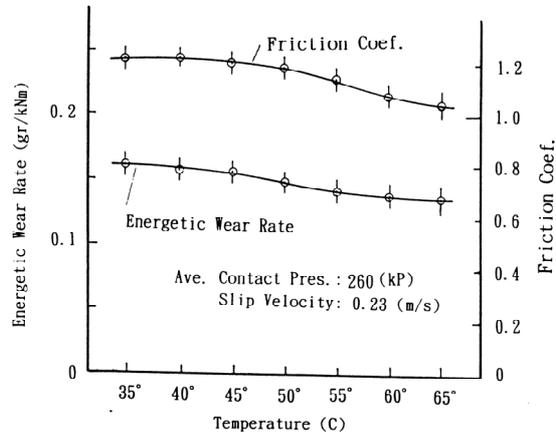


Abbildung 2.10: Abhängigkeit der Abriebsrate und des Reibwertes von der Temperatur [Saka-96]

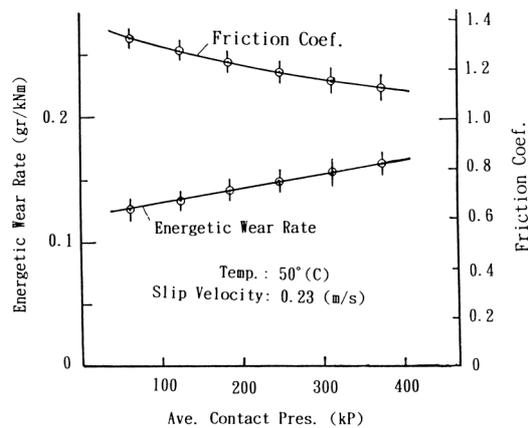


Abbildung 2.11: Abhängigkeit der Abriebsrate und des Reibwertes vom Normaldruck [Saka-96]

In einer Untersuchung von Moore wird ebenfalls der Zusammenhang zwischen dem Reibwert und der energetischen Abriebsrate betrachtet [Moor-80]. Dabei werden zwei Formen von Abrieb unterschieden. Zum einen der Ermüdungsabrieb bei geringen Reibwerten kleiner 1.25, bei dem vergleichbar wenig Abrieb entsteht und dem starken Abrieb bei Reibwerten größer 1.25 (Abbildung 2.12).

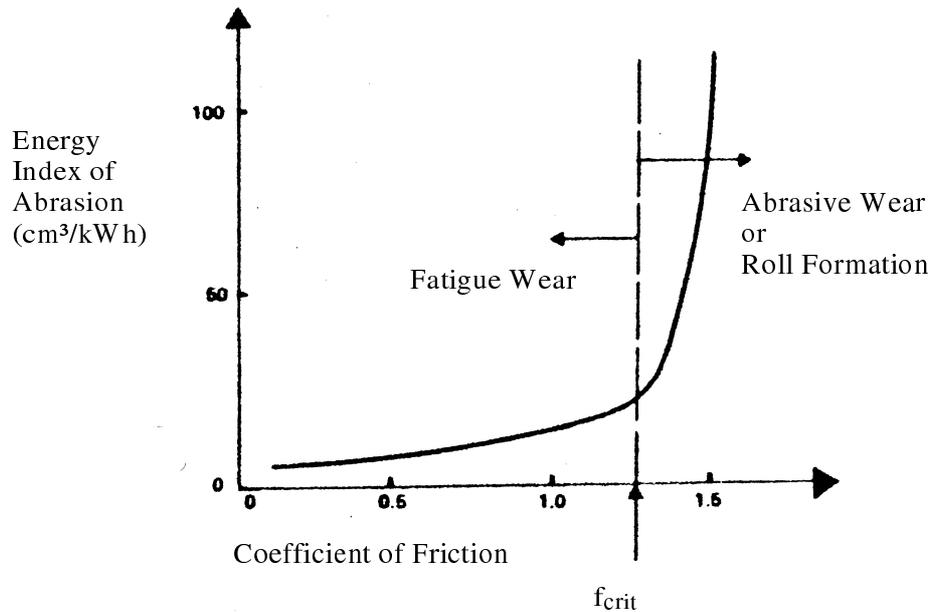


Abbildung 2.12: Korrelation zwischen Reibwert und Abrieb [Moor-80]

2.7 Festlegung der Betrachtungsebenen

Da die Betrachtung von Kräften und Bewegungen im dreidimensionalen Raum immer sehr komplex ist, werden im Folgenden die Vorzeichenrichtungen und die Betrachtungsebene für die gesamte Arbeit festgelegt.

Vorzeichenkonvention:

Die Normalkraft ist immer positiv, da der Druck durch den Messstift ermittelt wird und es nur positiven Druck gibt (Abbildung 2.13). Die Umfangskraft und die Umfangsbewegung in Abrollrichtung sind positiv und entgegen der Abrollrichtung negativ. Betrachtet man die Bodenaufstandsfläche in Abrollrichtung, ist die Querkraft und der Querschlupf nach rechts positiv und nach links negativ.

Festlegung der Betrachtungsebene:

Bei der Betrachtungsebene wird der Reifen vom Boden aus betrachtet. In Abbildung 2.14 ist dargestellt, wie der Reifen betrachtet wird. D. h., der Reifeneinlauf liegt immer unten, der Reifenauslauf entsprechend immer oben. Beispielsweise bei der Betrachtung der Fahrzeugposition hinten links (eingekreist in Abbildung 2.14) liegt die Sturzseite oder Reifeninnenschulter immer rechts und der Schräglaufwinkel in Richtung des Einlaufs zur Sturzseite.

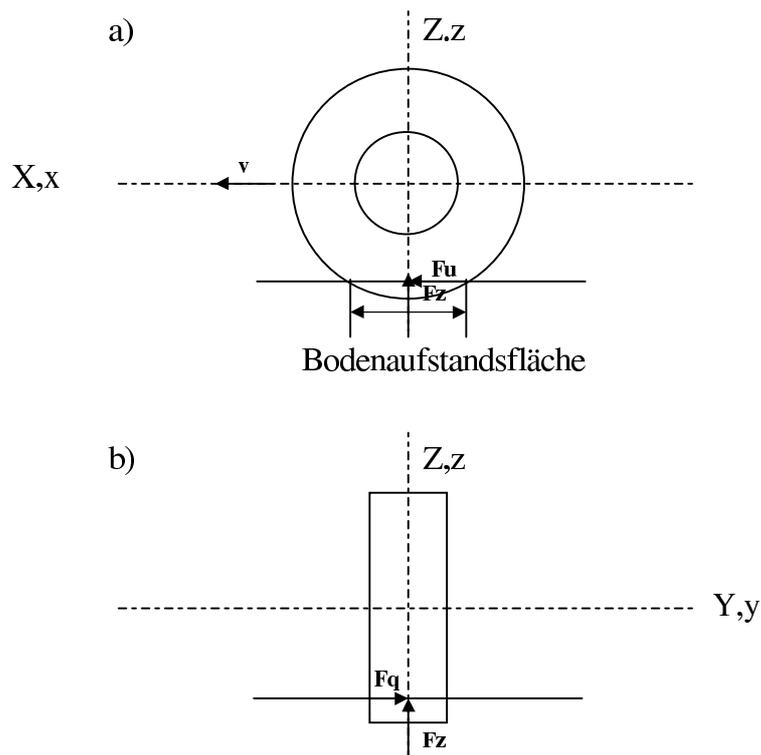


Abbildung 2.13: Festlegung der Raumkoordinaten (Ansicht b) in Abrollrichtung)

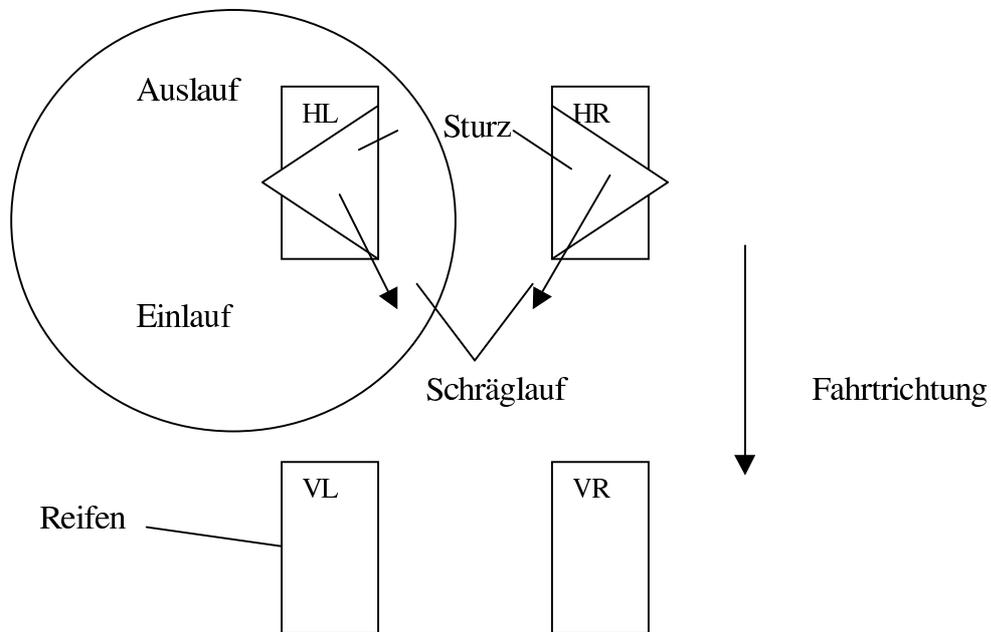


Abbildung 2.14 Blickwinkel auf das Fahrzeug von unten. Die Position im Kreis ist die Fahrzeugposition hinten links.

3 Prüfstandsaufbau

3.1 Literaturrecherche und Motivation zum Prüfstandsaufbau

Literaturrecherche:

Vor der Realisierung des Prüfstands wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Im Rahmen dieser Literaturrecherche wurden Prüfstände und Messequipment, die zur Ermittlung der Kräfte und Bewegungen in der Bodenaufstandsfläche bereits realisiert worden sind, betrachtet. Im Folgenden sind die Verfahren in historischer Reihenfolge aufgeführt.

Statische Messung:

Die ersten Messungen der Kraftverläufe zwischen Reifen und Fahrbahn wurden statisch durchgeführt. Das bedeutet, dass der Reifen im statisch abgeplatteten Zustand untersucht wurde. Solche Untersuchungen stellten das zu diesem Zeitpunkt maximal Mögliche mit dem damaligen Stand der Technik dar.

Schon im Jahre 1935/36 wurden erste Untersuchungen der Kraftverläufe / Druckverläufe zwischen Reifen und Fahrbahn [Schu-35, Mart-36] durchgeführt. Die Vermessung der Druckverläufe erfolgte mit einem sogenannten Bodendruckprüfer, wobei die Druckverläufe mit Gewichten und Messuhr ermittelt wurden.

Ähnliche Messungen mit adaptierten Messequipment wurden zur Bestimmung der Spannung zwischen Fahrbahn und Reifen von Markwick [Mark-54] durchgeführt. Neue statische Messverfahren wurden wegen der hohen Auflösung in den letzten Jahren entwickelt [Saka-95, Arca-85].

Dynamische Messung:

Die ersten dynamischen Untersuchungen der Kräfte in der Bodenaufstandsfläche wurden von Kraft durchgeführt [Kraft-54]. Dazu wurde ein Rohrdynamometer zur Ermittlung der Normalkraft und zwei Federplatten zur Ermittlung der Tangentialkräfte verwendet, dabei wurden jedoch keine lokalen Messungen der Tangentialkräfte, sondern das Verhalten der gesamten Bodenaufstandsfläche gemessen.

Ausgangspunkt dieser Arbeit sind die Dissertationen von Seitz [Seit-69] und Gerresheim [Gerr-75], bei denen die Kräfte und Bewegungen von Reifen auf einem Trommelprüfstand gemessen wurden. Dabei war Seitz der Erste, dem es gelang, Gleitwege bei großen Geschwindigkeiten zu bestimmen. Die Messungen konnten jedoch nicht örtlich zugeordnet werden und verfügten nur über eine unzureichende Auflösung, so dass nur Glattreifen untersucht wurden.

Experimentelle Untersuchungen über die Kraft- und Bewegungsverteilung in der Bodenaufstandsfläche wurden schon in verschiedenster Form durchgeführt [Ginn-93, Anon-96, Beer-96, Berg-77, Bode-62, Kim-00, Clar-82, Ridh-94, Walt-93, Webe-82,

Seve-91, Shio-95, Novo-57, Shio-96]. Dabei kann man grundsätzlich zwischen Prüfständen mit verschiebbaren Oberflächen, sogenannten Flachbahnprüfständen [Seve-91, Seve-88] und Trommeloberflächen [Seit-67, Seit-69, Seit-71, Akas-92, Lind-97, Lipp-74] unterscheiden. Die Flachbahnprüfstände haben den Nachteil, dass auf ihnen Reifen nur bei geringen Geschwindigkeiten untersucht werden können. Trommelprüfstände verfügen nur über eine gekrümmte Oberfläche, jedoch zeigen Untersuchungen zwischen Maschinenabrieb auf diesen Prüfständen und Straßenabriebsversuchen, dass die gleichen Abriebsbilder gefunden werden, somit ist der Einfluss in bezug auf die Abriebsmechanismen gering.

Zur Zeit wird der Reifen meist spurenweise untersucht, d. h. der Reifen rollt über eine Linie nebeneinander liegender Sensoren [Smit-97] oder der Reifen wird nach jeder Messung axial verschoben.

Untersuchungen von [Tret-69] zeigen jedoch, dass die Druckverteilung auch blockweise variiert. Abriebsbilder wie „Irregular Wear“, „Lowered Blocks“ und andere lassen - aufgrund ihrer „stochastischen“ Verteilung auf den Reifenumfang - darauf schließen, dass die Kraft- und Bewegungsverteilung von Profilblock zu Profilblock variiert [Eloy-89, Pott-99, Yama-89, Yama-91].

Messtechnik:

Bei den Messaufnehmern existieren verschiedene Konzepte, einmal die 3 Komponenten-Kraftaufnehmer und der Schlupfsensor als eine Einheit, wobei die Nadel zur Schlupfmessung in dem Kraftsensor integriert ist [Smit-97], und zum anderen getrennte Kraft und Wegaufnehmer [Seit-69]. Bei den meisten Kraftaufnehmern variiert der Durchmesser der Kraftaufnehmer zwischen 5 mm und 10 mm, aber es gibt auch Untersuchungen mit Kraftaufnehmern mit einer Messstiftoberfläche von 1 mm² [Seve-91]. Dieser geringe Durchmesser ist insbesondere für blockweise Untersuchungen und für lokale Abriebsphänomene notwendig. Diese feinen Messstiftoberflächen sind jedoch nur bei Flachbahnprüfständen mit geringen Prüfgeschwindigkeiten realisiert, da bei Trommelprüfständen der Fliehkrafteinfluss eine Realisierung erschwert.

Die Messaufnehmer zur Schlupfmessung bestehen zum Teil aus Nadeln, die bei den Messungen verbogen oder bewegt werden [Smit-97, Gerr-75]. Nachteil dieser Testmethoden ist es, dass sich diese Messaufnehmer in einem Loch befinden müssen, damit die Nadeln die Blockbewegung verfolgen können. Dadurch befindet sich ein erheblicher Teil des zu messenden Profilblocks nicht im Kontakt, was eine Verfälschung des Messergebnisses zur Folge hat. Auch das Zurückschnappen der Nadeln im Auslauf verfälscht das Ergebnis.

Andere Messverfahren sind die Messung der Profilbewegungen mit Hilfe einer Kamera, die mit Punkten markierte Profilblöcke von Reifen, die über eine Glasplatte gerollt werden, verfolgt [Walt-93, Iwas-97]. Diese Bewegungen können selbst mit Hochgeschwindigkeitskameras nur in sehr begrenzten Geschwindigkeitsbereichen verfolgt werden.

Motivation:

Ziel der Arbeit ist es - wie in der Einleitung beschrieben - einen Prüfstand zu entwickeln, auf dem der gesamte Reifen mit einer hohen Auflösung und bei realen Geschwindigkeiten vermessen werden kann. Dieses ist auf Flachbahnprüfständen aus mehreren Gründen nicht möglich. Zum einen kann man auf ihnen nie hohe Geschwindigkeiten realisieren und zum anderen würden Messungen des gesamten Reifens mit einer 1 mm² Auflösung sehr lange dauern. Da die 3 Komponenten Kraftmessung und die Bewegungsmessung zur Zeit nur sehr schwer auf einem „Flat Track“ Prüfstand vorstellbar sind, steht nur ein Trommelprüfstand zur Disposition. Da ein Innentrommelprüfstand in diesem Fall keine Vorteile bringt und aus Kostengründen, fiel die Entscheidung zu Gunsten eines Außentrommelprüfstandes aus.

3.2 Prüfstand

Prüfstandsbeschreibung:

Der Prüfstand ist für PKW- und C-Reifentests vorgesehen. Bei dem Prüfstand handelt es sich um eine liegende, zentral gelagerte Lauftrommel, mit einer angetriebenen Prüfradposition. Auf der Trommeloberfläche befindet sich die Messsensorik. Die Messsensorik besteht aus fünf 3K-Kraftmesssensoren und zwei Schlupfmessstellen (lateral und circumferential). Die gesamte Messsensorik ist auf einer Messspur auf der Trommelmitte angeordnet. Die Prüfradposition ist vertikal beziehungsweise quer zur Abrollrichtung des Reifens verschiebbar. Da mit Hilfe des Prüfstandes der gesamte Reifen vermessen werden soll, ist die Trommelbreite doppelt so breit wie die Reifenbreite des größten messbaren Reifens. Zur Messung des Reifens wird der Reifen in einer vorgegebenen Schrittweite von der vertikalen Verschiebeeinheit über die Messspur der Trommel verschoben. Eine detailliertere Beschreibung der Messtechnik erfolgt in Kapitel 4.

Einzelkomponenten:

Die Maschine besteht aus folgenden Einzelkomponenten:

- Maschinengrundkörper mit horizontaler Prüftrommel aufstellbar auf ebenem Boden
- Prüftrommel mit blanker Oberfläche optional mit Schmirgelbelag beklebbar, mit 7 Messstellen in der Trommeloberfläche (fünf 3K Messstellen, zwei Schlupfmessstellen)
- Trommelantrieb mit regelbarer Prüfgeschwindigkeit
- Radaufnahme von Standard Stahl-Prüfradfelgen (Continental)
- Vertikale Verschiebeeinheit der Prüfradposition
- Eine angetriebene Prüfradposition mit folgenden Stell- und Regelgrößen
 - Last
 - Reifeninnendruck

- Spurwinkel und Sturzwinkel im lastfreien Zustand und während des Betriebes. Die Winkelverstellung erfolgt quasistatisch, dynamische Betriebsweise ist nicht vorgesehen
- Antriebsmoment

Technische Daten:

<i>Reifen:</i>	Außendurchmesser	min.: 450 mm max.: 800 mm
	Aufstandsfläche	max.: 350 mm
<i>Felgen:</i>	Vorbereitung für Standard Stahl- Prüfradfelgen, 5 Loch, ET 15 mm, Teilkreisdurchmesser 175 mm	
<i>Prüftrommeldurchmesser:</i>		2000 mm
<i>Prüftrommelbreite:</i>		min.: 700 mm
<i>Lage der Messspur:</i>		In der mittleren Spur der Prüftrommel

Schlupfmessstelle:

<i>Lateralmessfenster:</i>		mittig zur mittleren Spur
Breite(Breitenrichtung):		20 mm
Länge(Umfangsrichtung):		2.5 mm
<i>Circumferentialmessfenster:</i>		mittig zur mittleren Spur
Breite(Breitenrichtung):		2.5 mm
Länge(Umfangsrichtung):		40 mm
Verteilung über den Umfang		symmetrisch
Bündig mit der Trommel		

3K Kraftmessstelle:

Messstiftdurchmesser:		1 mm
Verteilung über den Umfang		symmetrisch (72°)
Möglichst überschliffen, bündig mit der Trommel		
<i>Prüfgeschwindigkeit:</i>		50 - 140 km/h
Regelgenauigkeit:		+/- 1 km/h

3. Prüfstands Aufbau

<i>Prüflast:</i>	150 – 1500 daN
Regelgenauigkeit:	+/- 6 daN (oder 1 % vom Sollwert)
<i>Reifenfülldruck:</i>	0 – 6.5 bar
Regelgenauigkeit:	+/- 0.1 bar
<i>Antriebsmoment:</i>	200 Nm
Regelgenauigkeit:	+/-2 %
<i>Schräglaufwinkelbereich:</i>	+/- 2°
Regelgenauigkeit:	+/- 0.025°
Verstellgeschwindigkeit:	5 s für 4°
Zustellgröße (Schrittweite zwischen den Sollwerten):	0.05°
<i>Sturzwinkelbereich:</i>	+/- 6°
Regelgenauigkeit:	+/- 0.025°
Verstellgeschwindigkeit:	5 s für 4°
Zustellgröße (Schrittweite zwischen den Sollwerten):	0.05°
<i>Vertikale Verschiebeeinheit:</i>	
Verschiebeweg:	350 mm
Regelgenauigkeit:	0.1 mm
Verstellgeschwindigkeit:	1 s für 1mm
Zustellgröße (Schrittweite zwischen den Sollwerten):	1 mm

In den Abbildungen 3.1 und 3.2 ist der Prüfstand in Draufsicht und Seitenansicht dargestellt. Der runde blaugraue Körper stellt die Trommel der Prüfmaschine dar. Das rote Gestell, welches sich auf dem grünen Ausleger befindet, ist die Prüfradposition, auf der die Räder montiert werden. Diese Prüfradposition ist vertikal verschiebbar, wie man in der Seitenansicht erkennen kann. Die grauen Körper sind die Antriebsmotoren für die Trommel und das Rad. Die beiden schwarzen Körper unter der Prüfradposition sind die Führungen für die Prüfradpositionsverschiebung (vertikale Verschiebeeinheit). Die gesamte Prüfmaschine baut so hoch, da der Motor unter Prüfradposition untergebracht werden musste und die gesamte Prüfradposition 350mm in der Höhe verfahrbar ist. Die schwarze Linie, die auf der Trommel angedeutet ist, stellt die Messspur dar, auf der die Sensoren über den Umfang verteilt angebracht worden sind.

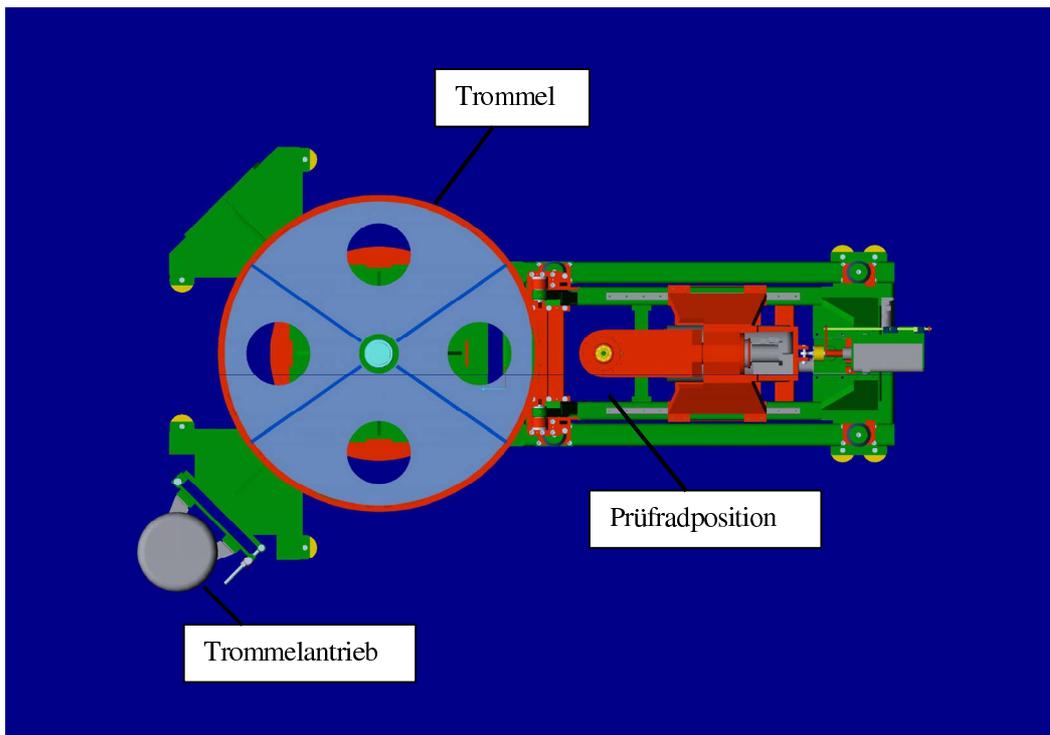


Abbildung 3.1: Maschinenkonstruktion in der Draufsicht

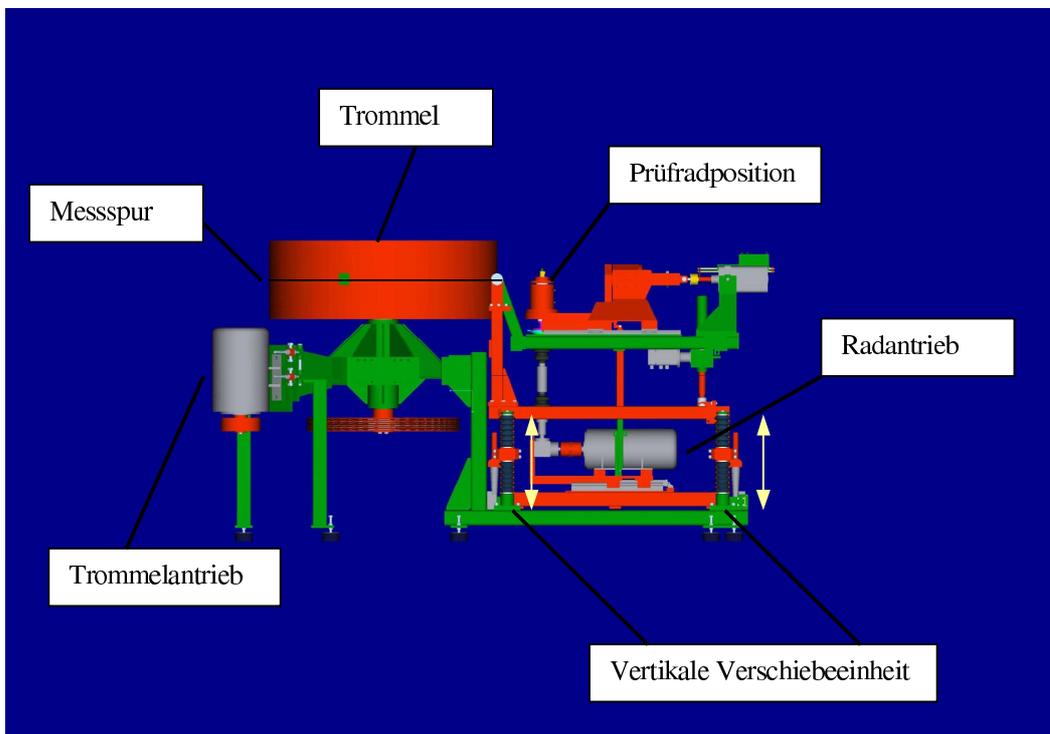


Abbildung 3.2: Maschinenkonstruktion in der Seitenansicht

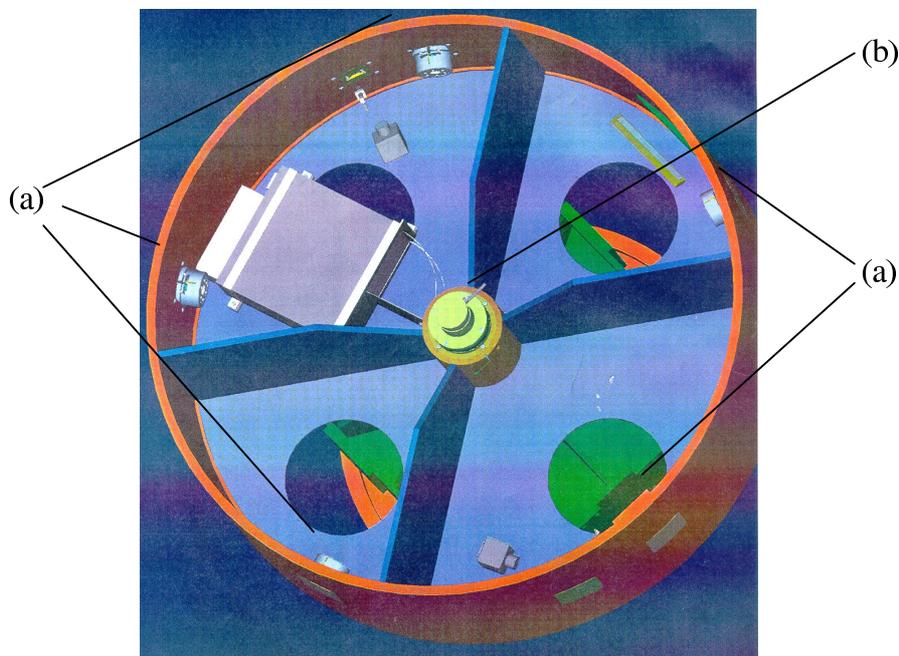
4. Messtechnik

4.1 Messtechnik 3 K-Kraftmessung

Die 3 Komponenten (3 K)-Kraftmessung ist bei Messungen der Kräfte von Reifen in der Bodenaufstandsfläche notwendig, da zur Ermittlung der Reibpaarung Oberfläche / Reifen sowohl Vertikal- als auch Tangentialkräfte erfasst werden müssen. Um die Herkunft der Tangentialkräfte und deren resultierende Richtung zu ermitteln ist es wichtig, die Tangentialkräfte in Umfangs- und Querrichtung zu ermitteln. Die Tangentialkräfte in Umfangsrichtung entstehen hauptsächlich durch Rollwiderstand, Antriebs- und Bremskräfte, und die Tangentialkräfte in Querrichtung durch die Reifenkontur, Strukturseitenkraft und den Reifenschräglauf.

4.1.1 Konzept der 3 K-Kraftmessung am Prüfstand

Ziel der 3 Komponenten-Kraftmessung am Prüfstand ist es, den gesamten Reifen mit einer Auflösung von 1mm^2 zu vermessen [Köhn-00, Köhn-97, Reis-97]. Um dies zu realisieren, muss die Trommeloberfläche mit Sensoren mit einem Stiftdurchmesser von $d = 1\text{mm}$ versehen werden. Da eine Messung mit einem 3 K-Sensor bei 60 km/h , 4000 Messungen pro Spur umfasst und 150 Spuren ca. 90 Stunden dauern würde, wurden 5 Sensoren auf einer Spur mit einem Abstand von 72° auf der Trommeloberfläche verteilt. Durch den Einsatz von 5 Sensoren kann die Messzeit auf 18 Stunden reduziert werden.



4.1 Abbildung: Fünf 3K-Kraftmessdosen (a) und Telemetrieinheit (b)

Als 3 K-Kraftmessdosen werden Mehrkomponenten Kraftsensoren Typ 9017 von der Firma Kistler eingesetzt. Diese Sensoren verfügen über die notwendige Sensitivität von 12 pC/N bei einer Verstärkung von 10 pC in x- und y-Richtung und einer Verstärkung von 20 pC in z-Richtung. Die Sensoren haben eine Linearität kleiner gleich 3% und ein Übersprechverhalten von 1 - 3%. Mit den 3 K-Kraftaufnehmern müssen maximale Kräfte von 0.8 N und Minimalkräfte von 0.008 N in x- und y- Richtung erfasst werden können (siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3). Bei der z-Richtung muss die Fläche des Messloches berücksichtigt werden, da sich Teile des Reifens, die sich zwischen Messstift und Messloch befinden, auf dem Messstift abstützen. Dieses wurde in x und y Richtung nicht beobachtet. Aus diesem Grund werden hier Kräfte in z- Richtung in dem Bereich bis 1.6 N und Minimalkräfte bis 0.016 N erfasst.

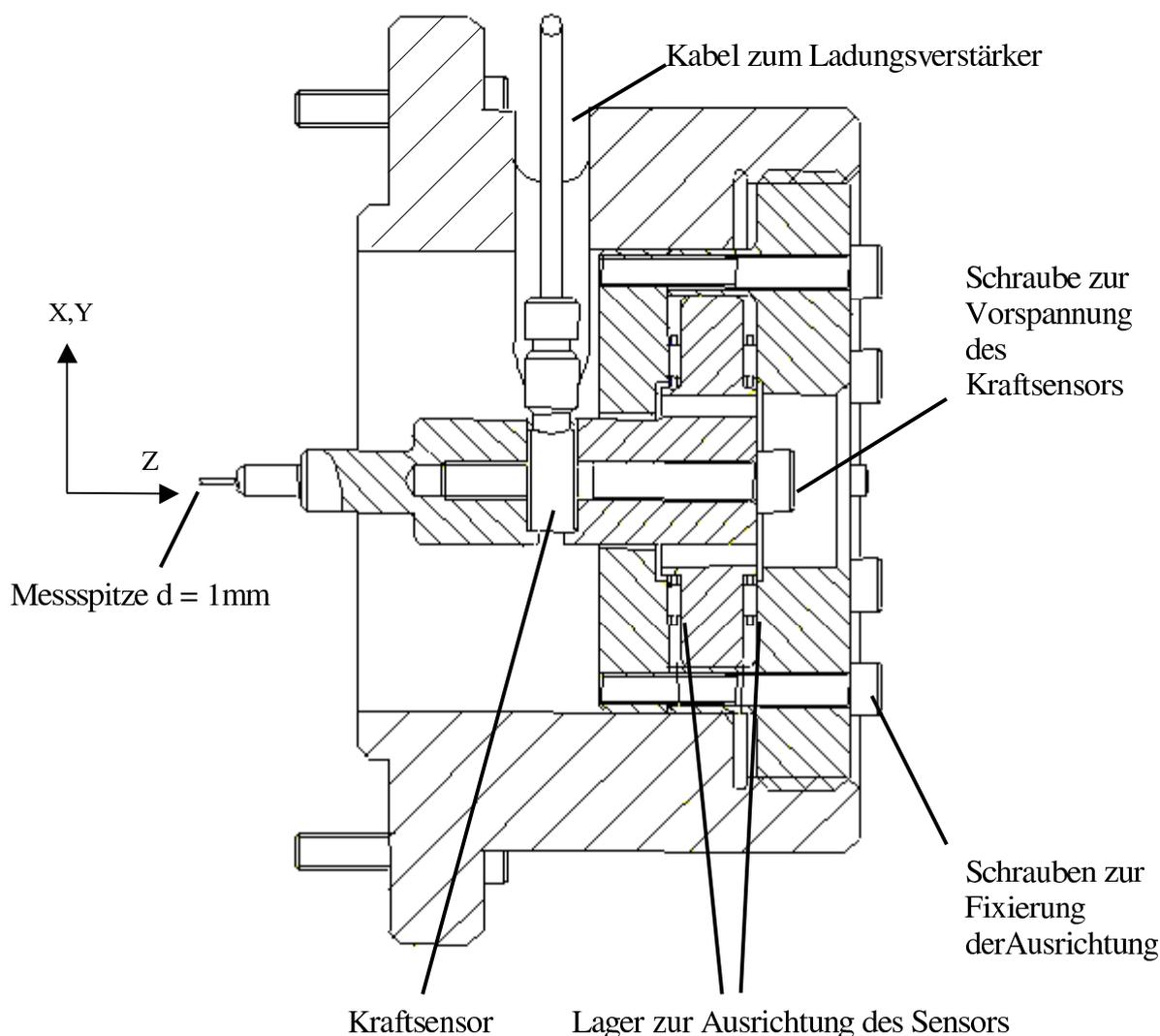


Abbildung 4.2: Konstruktionszeichnung 3K-Messdose

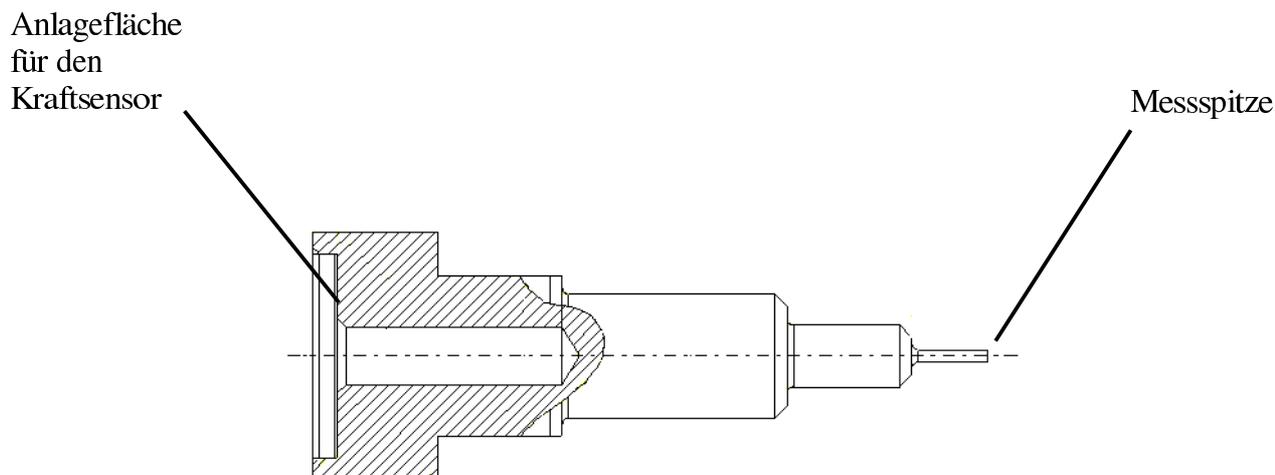


Abbildung 4.3: Konstruktionszeichnung des Messstiftes

Zur Übertragung der Messwerte aus der Trommel wird eine Telemetrieinheit der Firma PSI Betriebsforschungsinstitut eingesetzt, in der die Messsignale zunächst verstärkt und dann analog/digital gewandelt und schließlich pulscodiert übertragen werden. Diese Telemetrie wird schon seit Jahren standardmäßig zur Ermittlung von Normalkräften bei Walzen eingesetzt. Aus Kosten- und Aufwandsgründen werden die Daten anschließend wieder DA und AD gewandelt, da die DA Wandeinheit zur Telemetrieinheit der Firma PSI gehört.

Die Sensoren sind bei einer Trommelgeschwindigkeit von 120 km/h einer Beschleunigung von ca. 111g ausgesetzt. Da die Ladungsverstärker bei solchen Beschleunigungen zurückgesetzt werden müssen, ist nur ein Einsatz von einer Telemetrieinheit mit Resetfunktion möglich. Die Ladungsverstärker müssen nach jeder Trommelumdrehung zurückgesetzt werden, da schon geringe Geschwindigkeitsschwankungen des Prüfstandes einen Einfluss auf die Messungen haben. Diese Resetfunktion ist auch bei der Telemetrieinheit der Firma PSI vorgesehen, so dass ein Reset der Sensoren nach jeder Trommelumdrehung erfolgen kann (siehe Abbildung 4.4). Der Reset erfolgt durch den 0-Impuls des Inkrementalgebers der Telemetrieinheit.

Die zeitlich/räumliche Auflösung der Kraftverläufe der Sensoren ermöglicht die Erfassung eines Messwertes alle 1,25 mm, das entspricht 5000 Messpunkte pro Trommelumdrehung oder einer Abtastrate von 26 kHz bei 120 km/h.

Insgesamt werden 150 Messwerte pro Einzelmessung erfasst, was einer Länge der Bodenaufstandsfläche von 188 mm entspricht. Mit der Telemetrieinheit der Firma PSI könnten sogar Abtastraten bis 50 kHz pro Kanal realisiert werden.

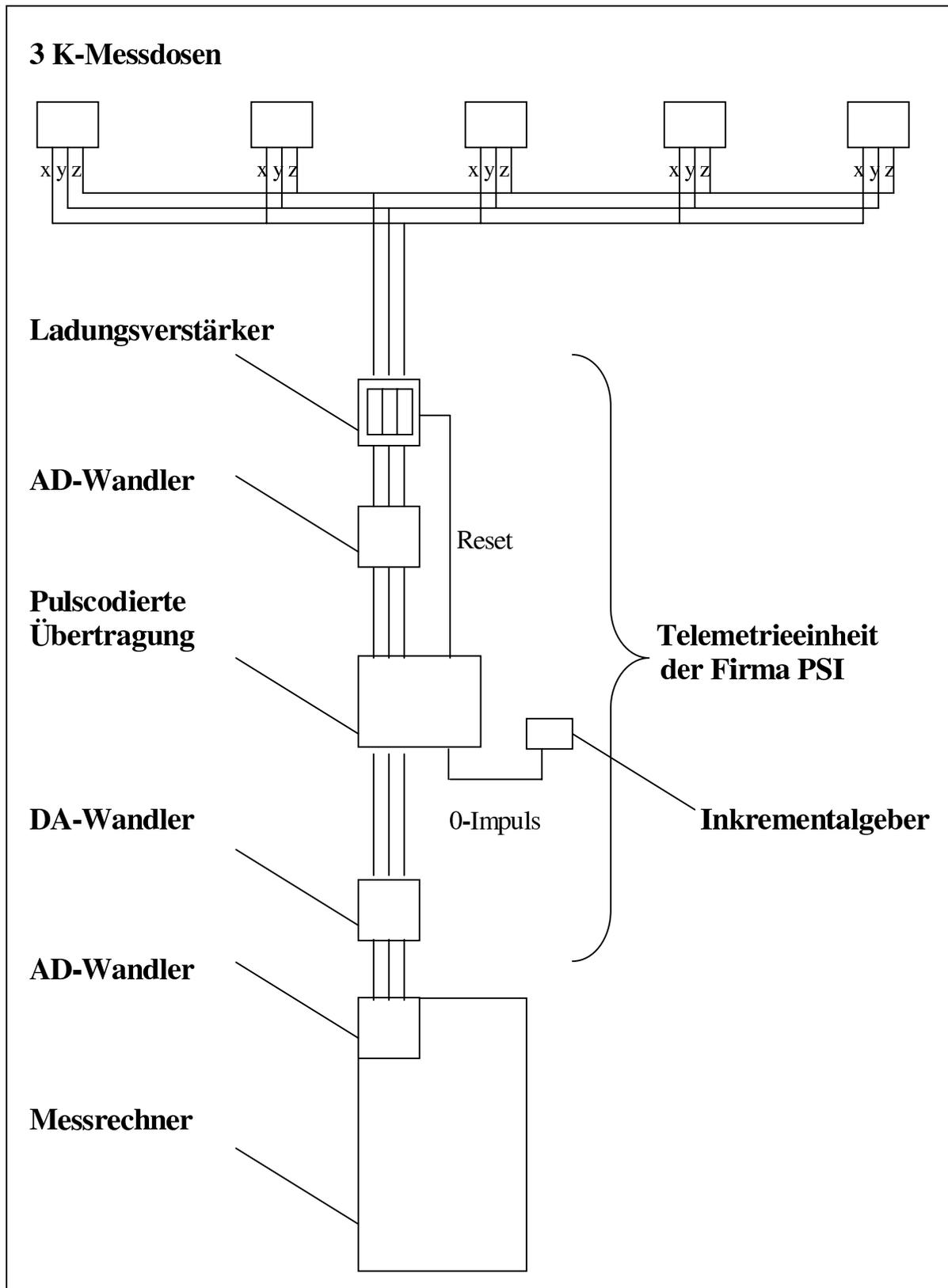


Abbildung 4.4: Skizze der Messkette

Die Anordnung der Sensoren ist eine Parallelschaltung, d.h. alle Kanäle der Sensoren in x Richtung und alle in y- und z- Richtung hängen jeweils an dem gleichen Messverstärker, damit müssen nur 3 Kanäle aus der Trommel übertragen und nur 3 Messverstärker in die Trommel eingebaut werden, was den gesamten Aufwand erheblich reduziert.

4.1.2 Realisierung der 3 K-Kraftmessung am Prüfstand

Für die Realisierung der 3 K-Kraftmessung am Prüfstand ist die Betrachtung der unterschiedlichen Freiheitsgrade der Kraftmessdose im Raum erforderlich. Zunächst muss die Stiftoberfläche bündig mit der Trommeloberfläche abschließen. Zudem muss der Stift mittig in einem 1.2 mm Durchmesser Loch stehen; außerdem muss der Sensor in Längs- und Querrichtung ausgerichtet werden, und schließlich müssen die Sensoren mit dem gleichen Drehmoment vorgespannt werden.

Die Höhenabstimmung der 3 K-Kraftmessdose ist durch ein Feingewinde im Fuß des Kraftaufnehmers realisiert worden. Mit Hilfe des Feingewindes kann der Sensor in der Höhe feinjustiert werden. Damit trotz der Verdrehung bei der Höhenausrichtung eine Ausrichtung der Kraftmessung in Umfangs- und Querrichtung möglich ist, ist der Sensor auf Nagellagern gelagert, die eine Ausrichtung in x und y Richtung ermöglichen. Die Ausrichtung des Messstiftes in dem Loch in der Trommeloberfläche erfolgt über 2 Dreibeinkonstruktionen, die auch zur Fixierung der Lager dienen.

4.1.3 Kalibrierung der 3 K-Kraftmessung

Die Kalibrierung erfolgt in mehreren Schritten:

- 1) Kalibrierprotokoll der einzelnen Piezosensoren von der Firma Kistler.
- 2) Zusammenspiel der Sensoren in der Kraftmesseinheit.
- 3) Ausrichtung der x und y Richtung der Kraftmesseinheit.
- 4) Ausrichtung der Sensoren in der Trommel.
- 5) Abgleich der Summe der Kräfte in der Bodenaufstandsfläche mit den integralen Messwerten des Reifens (Last, Rollwiderstand, Querkraft (u.a. Strukturseitenkraft)) zur Berücksichtigung des Messlochs in der Trommeloberfläche
 - a) Last mit der Summe der Kräfte in z-Richtung
 - b) Rollwiderstand mit der Summe der Kräfte in x- Richtung
 - c) Querkraft mit der Summe der Kräfte in y-Richtung

Der Rollwiderstand und die Querkraft wurden mit einem Eichreifen auf einem anderen Prüfstand ermittelt und die Kalibrierung erfolgte dann mit diesem Eichreifen.

Die Abweichung von der Linearität liegt bei allen Sensoren unter 3% und das Übersprechverhalten ist kleiner als 3% in alle Richtungen. Dies zeigt, dass die Sensoren die einzelnen Kräfte sehr genau erfassen können.

Nach dem Einbau der Sensoren in die Kraftmesseinheit wurde das Zusammenspiel Sensor, Messstift und Halterung untersucht. Dies erfolgte in einer Kalibriereinheit, in der

die gesamte Kraftmesseinheit eingespannt werden kann und welche dann in alle Richtungen ($\pm x$, $\pm y$, z) gedreht werden kann (siehe Abbildung 4.5).

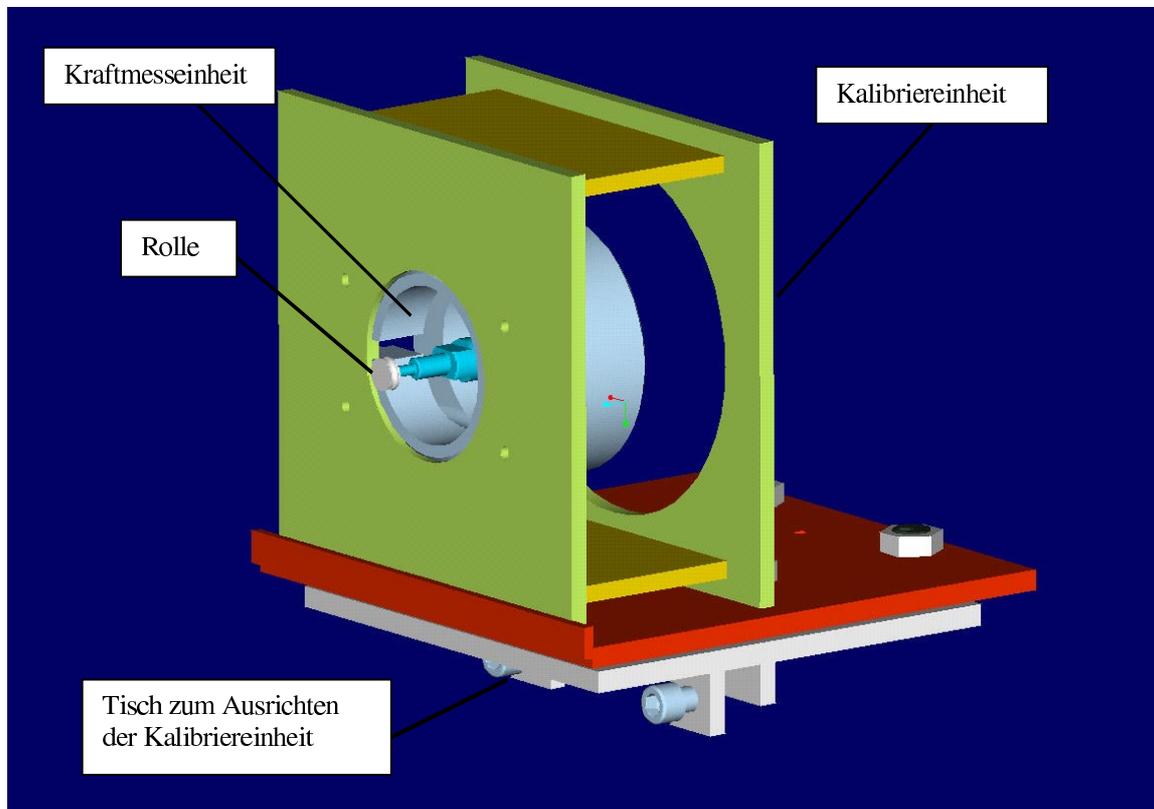


Abbildung 4.5: Kalibriereinrichtung zur Kalibrierung Sensor und Messeinheit

Für die Kalibrierung der Kraftverläufe werden Gewichte über eine Rolle an die Sensoren gehängt. Die Rolle sorgt über die Fadenkraft in Richtung der Schwerkraft für ein sehr geringes Übersprechen der Kraft. Das Gewicht der kleinen Rolle, die auf die Sensorspitze geschoben wird, wird durch den Reset zu Null gesetzt.

Kalibrierkurven der 3 K-Sensoren in x- und y Richtung

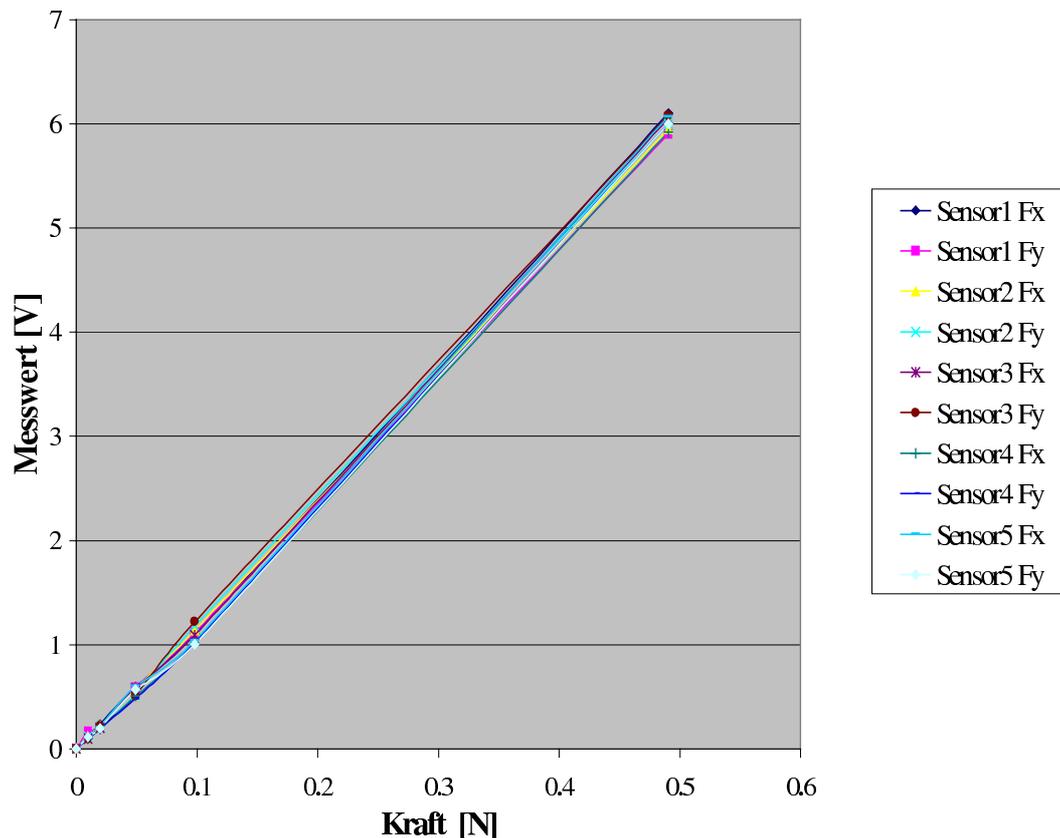


Abbildung 4.6: Kalibrierung der 3 K-Sensoren in x- und y-Richtung [Seti-01]

Abbildung 4.6 zeigt, dass das lineare Verhalten der Sensoren auch im eingebauten Zustand erhalten bleibt.

Dann erfolgt die Ausrichtung der x und y Achse der Kraftmeseinheit. Zu diesem Zweck wird die Kraftmeseinheit in die in Abbildung 4.5 dargestellte Kalibriereinrichtung eingespannt. Die Kalibriereinrichtung besteht aus im 90° Winkel angeordneten Flächen, so dass sie in jede Richtung umgesetzt werden kann und somit die Ausrichtung in x und y ohne Demontage erfolgen kann. Zur Messung des Übersprechverhaltens werden die Kanäle x und y an die Polardarstellung eines Oszilloskops angeschlossen. Der Leuchtpunkt stellt die Sensorspitze dar. Wird diese nun mit dem Gewicht belastet, wandert der Leuchtpunkt bei korrekter Einstellung des Oszilloskops nach unten und bei einer Fehlstellung des Koordinatensystem um den zu korrigierenden Winkel zur Seite. Die Einstellung wird sowohl in x- als auch in y-Richtung überprüft.

Sobald das Übersprechverhalten minimiert worden ist, wird die Position auf den entsprechenden Stellen der Kraftmesseinheit markiert, so dass beim Einbau die exakte x-y Ausrichtung erfolgen kann.

Beim Einbau der Sensoren in die Trommeloberfläche müssen die Sensoren so in der Trommel ausgerichtet werden, dass sie mit der Trommeloberfläche abschließen. Dafür wird eine Messuhr halb auf die Trommeloberfläche und halb auf das Loch ausgerichtet. Sobald sich die Messnadel bewegt, wird der Sensor an der Trommel fixiert. Nach der Fixierung wird dann mit einem Glattreifen überprüft, in wie weit die 5 Sensoren die gleichen Messwerte liefern. Gegebenenfalls erfolgt eine erneute Ausrichtung in der Trommel. Wenn die Sensoren annähernd so platziert wurden, dass die Sensoren gleiche Messwerte liefern, werden die Abweichungen bestimmt, damit nach der Messwerterfassung eine Korrektur erfolgen kann.

Die exakte Messgröße kann zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht bestimmt werden. Zwar werden in anderen Arbeiten [Seve-91] die Korrektur des Loches zum Kraftaufnehmer mit der halben Fläche des Loches angegeben; diese Annahme scheint jedoch willkürlich zu sein. Bei dem in dieser Arbeit entwickelten Prüfstand ist es jedoch möglich, die Radlast und die Verteilung der Last in der Bodenaufstandsfläche aufeinander abzustimmen, wodurch eine sehr genaue Bestimmung der Kräfte möglich ist. Das bedeutet, die Messergebnisse werden so sortiert, dass sie den Kräften in der Bodenaufstandsfläche entsprechen und sie zur integralen Last addiert werden können. Das Gleiche erfolgt dann mit der Quer- und Längskraft. Da die Kraftverläufe, wie oben gesehen linear sind, kann so die exakte Kraftskalierung bestimmt werden.

4.2 Messtechnik Schlupfmessung

Nach der Gummireibungstheorie findet, wie eingangs schon beschrieben, eine Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn nur dann statt, wenn eine Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn herrscht. Diese Relativbewegung wird als Schlupf bezeichnet. Beim Schlupf unterscheidet man grundsätzlich zwischen Gleit- und Deformationsschlupf. Als Deformationsschlupf bezeichnet man den Schlupf, der durch die Verformung des Profils entsteht. Der Gleitschlupf, der in diesem Zusammenhang betrachtet wird, ist die Bewegung zwischen Oberfläche und Reifen. In diesem Fall besteht nur die Möglichkeit, den Gleitschlupf zu erfassen, da nur die Bewegung an der Profiloberfläche gemessen wird und nicht die Verformung des Profilblockes.

4.2.1 Konzept der Schlupfmessung am Prüfstand

Ziel der Schlupfmessungen ist es, den Schlupf in der gleichen Auflösung wie bei den 3 K-Kraftverläufen zu erfassen. Da der Schlupf nicht wie üblich ohne, sondern im Kontakt zur Oberfläche gemessen werden soll, ist die Messung nur mit einem Glasschlitz und einer Kamera möglich [Köln-97]. Das Verfahren ermöglicht, durch eine in die Trommel eingelassene Glasscheibe, die Messung der Bewegung im Kontakt. In einem Winkel wird die Glasplatte mit einem Linienlaser bestrahlt. Auf der Oberfläche der Glasplatte ändert sich bei Kontakt mit einem Reifenblock die Lichtstärke, da das Licht dann an der Oberfläche reflektiert wird (siehe Abbildung 4.1 Punkt a)). Befindet sich kein Reifenblock im Kontakt, wird das Licht am Profilgrund an einer anderen Stelle reflektiert (siehe Abbildung 4.1 Punkt b)). Eine Zeilenkamera, die senkrecht über der Glasplatte steht, nimmt diese Veränderung der Lichtstärke auf.

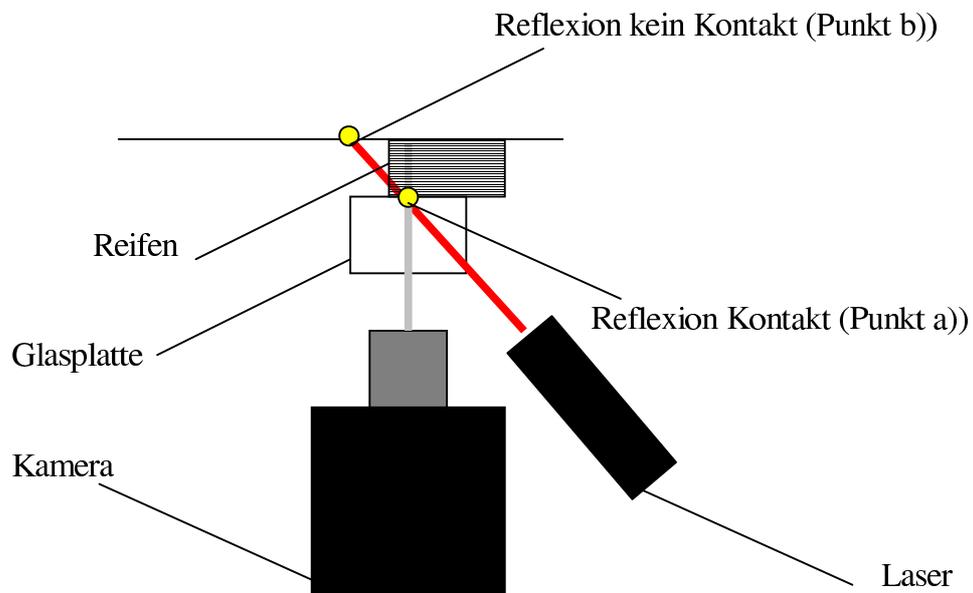


Abbildung 4.1: Skizze Messprinzip

Bewegt sich nun der Reifenblock auf der Glasplatte, ändert sich das Linienbild, das die Zeilenkamera aufnimmt (siehe Abbildung 4.2). Zum Zeitpunkt $T = 0$ (Abbildung 4.2 a)) befindet sich der dickumrandete Block im Kontakt, der rot markierte Bereich innerhalb der Kamerazeile stellt den Kontaktbereich dar. Zum Zeitpunkt $T = 1$ (Abbildung 4.2 b)) hat sich der Block zum jetzt dickumrandeten Bereich weiterbewegt, der nun rot markierte Bereich innerhalb der Kamerazeile stellt den Kontaktbereich dar. Das Gleiche gilt für den Zeitpunkt $T = 2$ (Abbildung 4.2 c)).

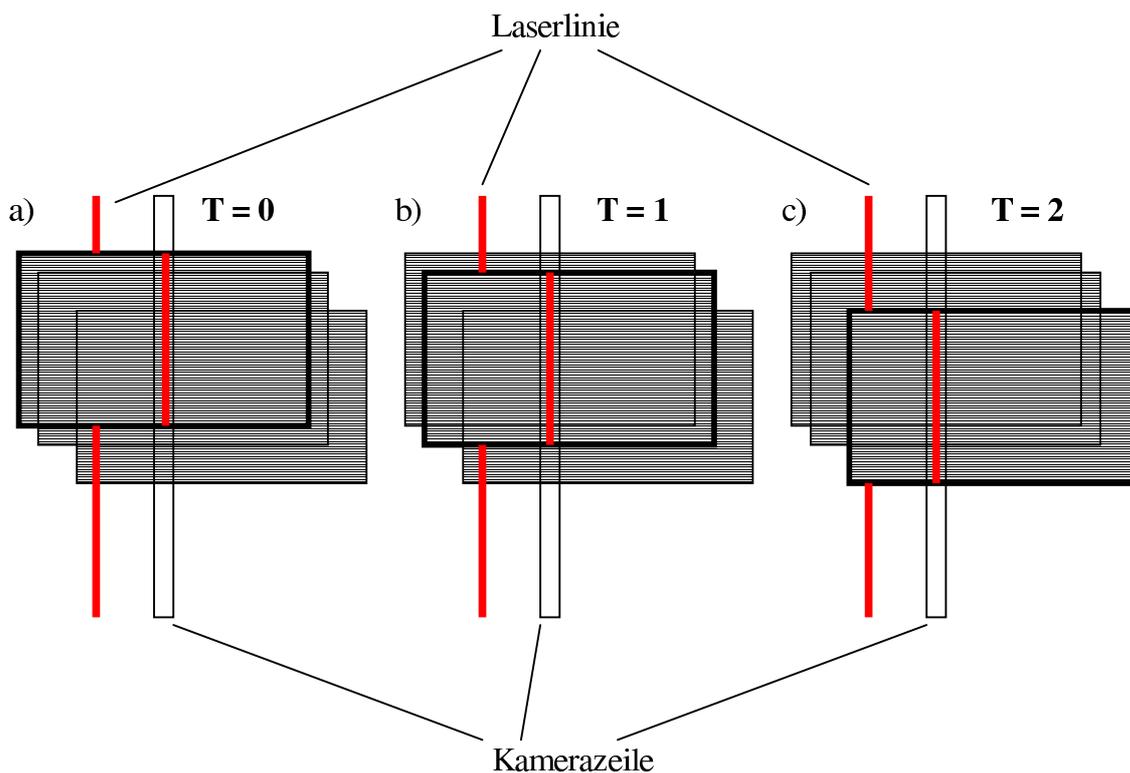


Abbildung 4.2: Reflexion eines bewegten Profilblockes zu unterschiedlichen Zeitpunkten

4.2.2 Realisierung der Schlupfmessung am Prüfstand

Die Zeilenkameras und Laser müssen sich mit der Trommel mitbewegen, um die geforderte Auflösung bei der Schlupfmessung zu erreichen, da man nur eine Kamera auf einer Messspur außerhalb der Trommel installieren könnte und diese Kamera schon mindestens 350 mm von der Trommelmitte entfernt wäre. Da in der Trommel bei 120 km/h Fliehkräfte im Bereich von 110 g herrschen, muss sowohl die Kamera- als auch die Laserhalterung sehr stabil ausgelegt sein (siehe Abbildungen 4.2, 4.3, 4.4).

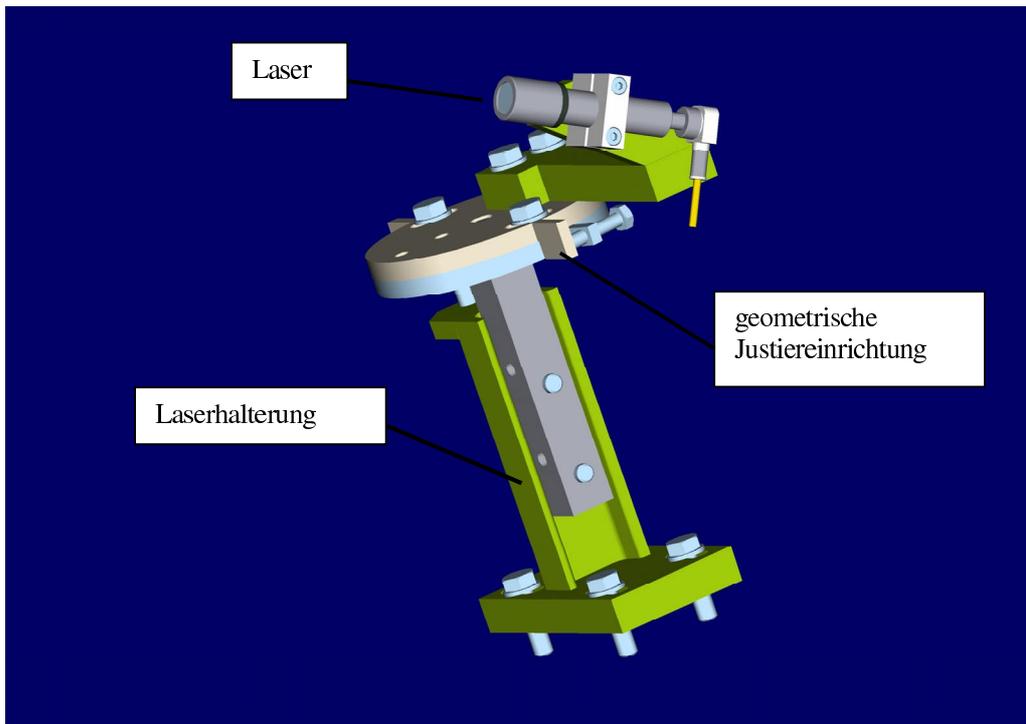


Abbildung 4.2: Konstruktionszeichnung Laser

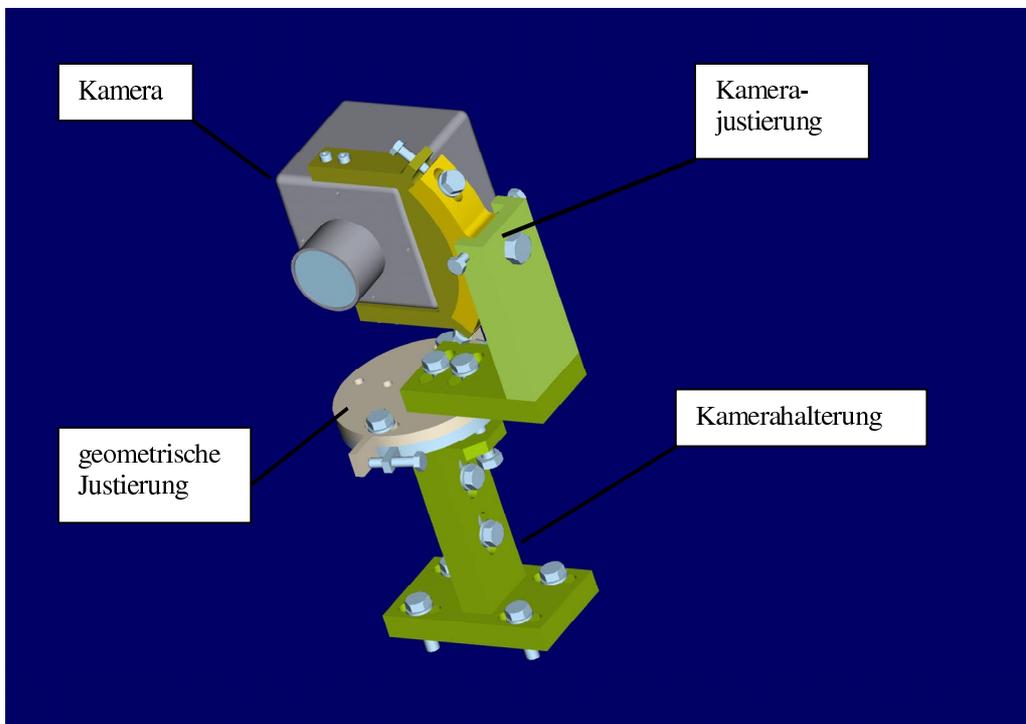


Abbildung 4.3: Kamerahalterung

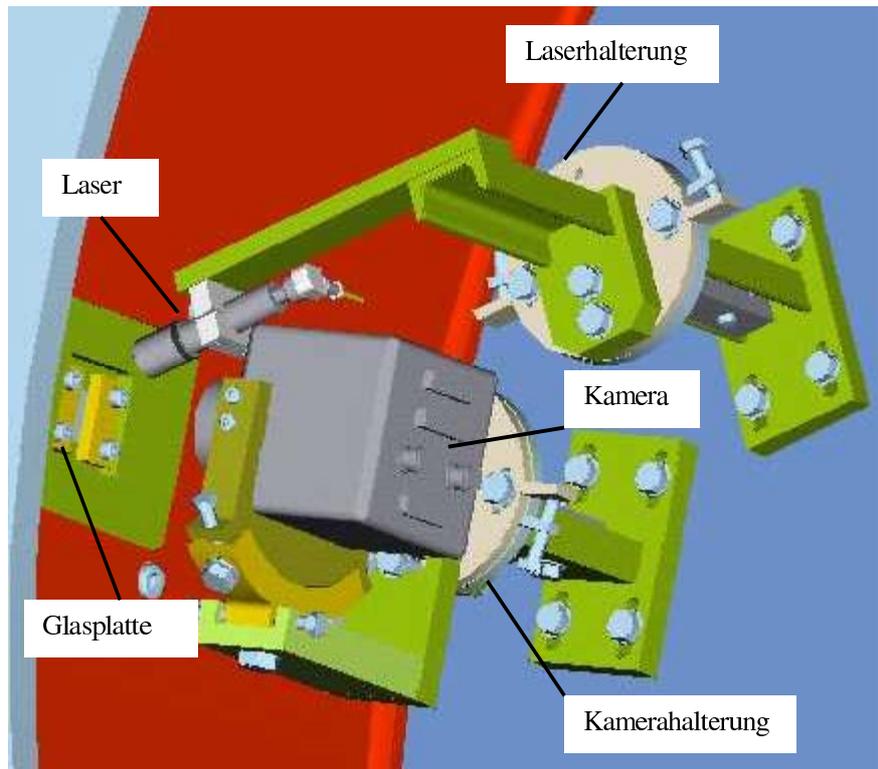


Abbildung 4.4: Anordnung der Kamera und des Lasers

Die mit der Zeilenkamera gewonnenen Bilder würden zuviel Speicherplatz benötigen, deshalb werden aus den Bildern die Positionen der Blockkanten ermittelt und so die Datenmenge erheblich reduziert.

Da die Datenmenge der Kameras, die bei den Bildaufnahmen entstehen, sehr hoch ist, muss diese Verarbeitung der Daten noch in der Trommel geschehen. Aus diesem Grund befindet sich ein PC in der Trommel. Dieser PC muss einer Rotationsbeschleunigung in der Trommel von bis zu 110g an der Trommeloberfläche standhalten können. Um die Beschleunigung zu reduzieren, ist der PC möglichst nah zum Trommelmittelpunkt positioniert. Damit der PC der verbleibenden Belastung standhalten kann, ist er in einem speziellen PC-Gehäuse untergebracht. Zusätzlich muss der PC mit den Impulsen von Trommel- und Radinkrementalgebern zur exakten Zuordnung der Messungen versorgt werden. Darüber hinaus ist eine Stromversorgung notwendig. Der Datentransfer zum Auswerterechner erfolgt durch ein Funkmodem (siehe Abbildung 4.5).

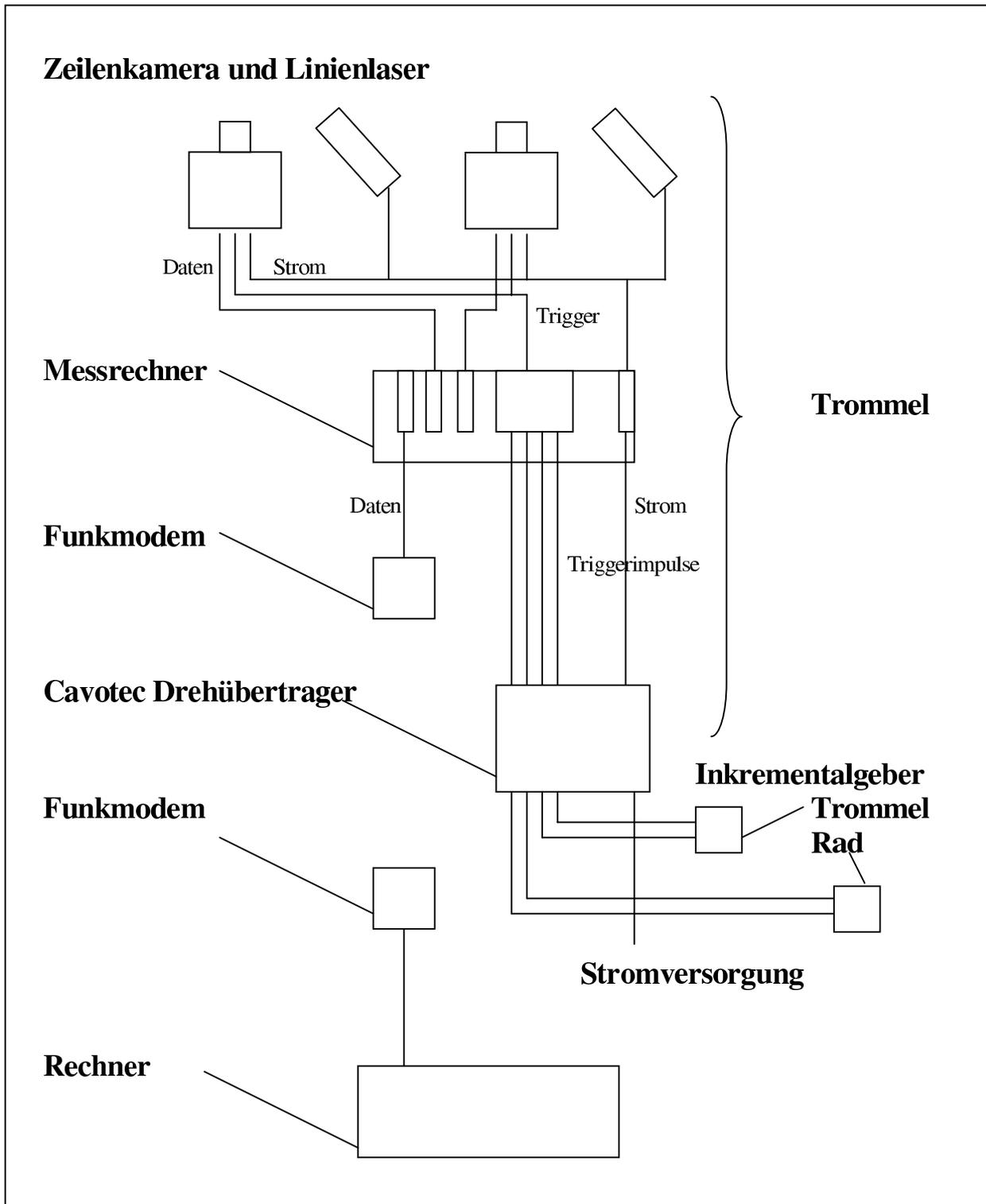


Abbildung 4.5: Skizze des Schaltplanes der Schlupfmessung

4.2.3 Kalibrierung der Schlupfmessung

Die Kalibrierung der Schlupfmessung erfolgt durch ein kalibriertes Lineal, welches am Glasfenster befestigt wird. Die Ausrichtung des Lineals muss so erfolgen, dass die Millimetereinkerbungen auf dem Lineal von dem Laserstrahl getroffen werden. Da die Millimetereinkerbungen tiefer liegen als die Oberfläche des Lineals, ergeben sich andere Grauwerte an den Einkerbungen. Somit kann die Messlänge der Kamerazeile bestimmt werden. Die Wegänderung auf der Kamerazeile von einer Aufnahme zur nächsten ergibt somit den Schlupfwert bei den Schlupfmessungen.

4.3 Messwerterfassung und Messwertzuordnung

Die Sensoren zur Erfassung der Kräfte und Bewegungen befinden sich alle auf einer Spur auf der Trommel, der sogenannten Messspur. Zur Vermessung einer Spur auf dem Reifenumfang (im Folgenden Reifenspur genannt), muss der Reifen mit dieser Reifenspur auf der Messspur abrollen. Bei der Messung eines gesamten Reifens wird zunächst die Reifenspur gemessen und dann, wenn die Reifenspur vermessen wurde, wird die Reifenspur Spur für Spur über die Messspur verschoben.

Zur Erfassung der Kräfte und Bewegungen muss der Messzeitpunkt bestimmt werden, bei dem sich der Reifen auf den Messsensoren befindet. Zusätzlich benötigt man die örtliche Zuordnung des zu vermessenden Reifens, damit die gemessene Stelle auf dem Reifen bestimmt werden kann. Außerdem benötigt man die Position der Reifenspur, die gerade vermessen wird.

Es handelt sich bei der Messwerterfassung um ein statistisches Messverfahren, welches auf der Annahme beruht, dass sich Trommelumfang und Reifenumfang unterscheiden und somit nach jeder Umdrehung ein anderer Teil des Reifens über den Sensoren befindet.

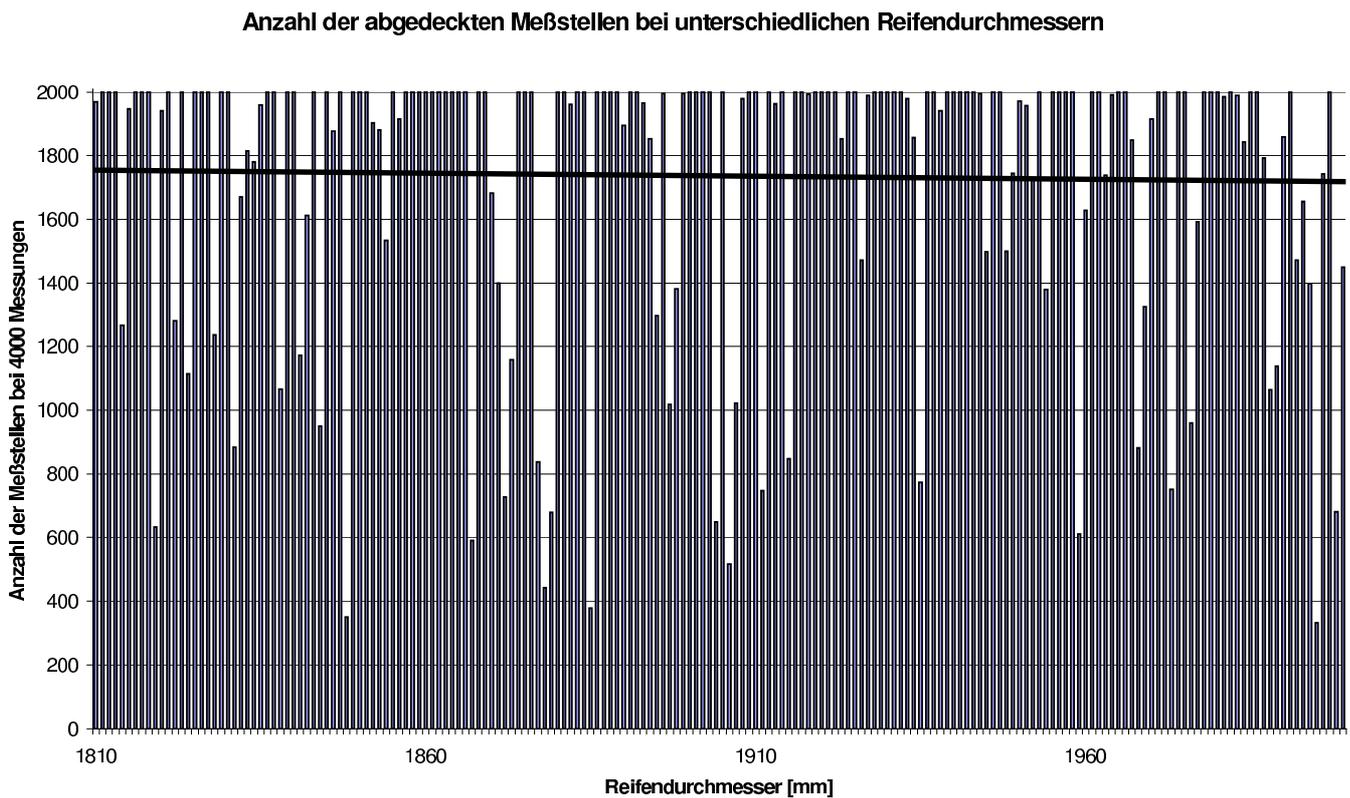


Abbildung 4.9: Messstellen bei 4000 Messungen in Abhängigkeit vom Reifendurchmesser

In einigen Fällen kann es jedoch zu sogenannten Resonanzeffekten kommen. Wenn der Trommelumfang und der Reifenumfang sich um ein Vielfaches unterscheiden, ist eine Erfassung der Kräfte und Bewegungen unmöglich. Durch leichte Änderung der Versuchsbedingungen - beispielsweise durch Lasterhöhung - kann der Reifenumfang so verändert werden, dass sich Trommelumfang und Reifenumfang voneinander unterscheiden.

In Abbildung 4.9 erkennt man, dass bei 4000 Messungen ein Durchschnittswert von ca. 85 % erreicht werden kann. Darüber hinaus erkennt man die Stellen, die durch Resonanzeffekte eine geringere Anzahl von unterschiedlichen Messstellen aufweisen.

4.3.1 Messwerterfassung der 3K-Kraftmessung

Für die Messwerterfassung wird ein Inkrementalgeber an der Trommel benötigt. Dieser Inkrementalgeber hat eine Teilung von 5000 Pulsen und einen Nullimpuls. Das entspricht einer Auflösung von ca. 1.25 mm auf der Trommel. Da sich 5 Sensoren auf dem Umfang verteilt befinden müssen die Positionen der Sensoren bestimmt werden, so dass die Messung bei jeder Sensorposition zu exakt dem gleichen Zeitpunkt erfolgen kann. Dadurch wird die Zuordnung des Sensors und eine gleiche zeitliche Auflösung ermöglicht.

Für die Erfassung der Reifenposition wird ein Inkrementalgeber mit 2000 Pulsen und einem Nullimpuls eingesetzt. Die 2000 Pulse entsprechen abhängig vom Reifendurchmesser einer Auflösung von ca. 1 mm auf dem Reifen. Die Reifenposition muss zu einem festgelegten Zeitpunkt während der Messwerterfassung der 3 K-Kraftmessung erfasst werden, damit später ein Zuordnen der Messungen zum Reifen möglich ist.

4.3.2 Messwerterfassung der Schlupfmessung

Die Messwerterfassung der Schlupfmessung erfolgt ähnlich wie bei der 3K-Messung. Durch den Trommelimpulsgeber wird der Messzeitpunkt für die Quer- und Längsschlupfmessung bestimmt und durch den Radimpulsgeber die Radposition, die gerade vermessen wird. Da die Schlupfmessstelle einen Bereich von 10 mm für den Längsschlupf und 5 mm für den Querschlupf vermisst, müssen hier nicht 2000 Messungen auf den Umfang ermittelt werden. Bei einer kombinierten Messung von 3 K und Schlupf werden dann folglich nur 800 Messungen durchgeführt.

5. Auswertung der 3 K-Messung

Bei den 3 K-Messungen fallen, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, 4000 Messungen pro Spur und abhängig von der Reifenbreite bis zu 350 Spuren an. Im ersten Schritt werden diese Daten nach Reifenpositionen sortiert. Die Stellen, an denen keine Messwerte vorliegen, werden durch benachbarte Stellen aufgefüllt und diese in einem File pro Spur abgelegt, so dass nur noch 2000 Messungen pro Spur oder ca. 1.5 MB Daten vorliegen.

5.1 Korrektur der Störeinflüsse

Die Messungen werden vornehmlich aufgrund der Empfindlichkeit der Sensoren durch das Reifengeräusch beeinflusst, was sich in den Messungen erkennen lässt. Da die Sensoren (wie schon im letzten Kapitel beschrieben) parallel geschaltet sind, strahlt das Geräusch auf alle Sensoren ein. Durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50-60 km/h, abhängig von dem jeweiligen Reifen, bleibt das Reifengeräusch bzw. die Amplitude des Reifengeräusches in dem Rahmen, in dem eine Auswertung der Messung möglich ist. Über diese Geschwindigkeit hinaus ist die Amplitude des Reifengeräusches so hoch, dass die Messungen nicht mehr auswertbar sind.

Durch die gleitende Mittelwertbildung werden Spitzen und der schon vorhandene Geräuscheinfluss aus den Messungen herausgefiltert.

5.2 Darstellungsformen der Messwerte

Die Darstellungsformen stellen ein komplexes Problem dar. Die Darstellung der 3 K-Messergebnisse ist die Betrachtung von insgesamt 6 Dimensionen, und zwar: F_u , F_q und F_n bei der 3K-Messung, x und y als räumliche Auflösung und t als zeitliche Auflösung. Die Darstellung der Schlupfmesswert ist die Betrachtung von insgesamt 5 Dimensionen, und zwar S_u und S_q , x und y als räumliche Auflösung und t als zeitliche Auflösung.

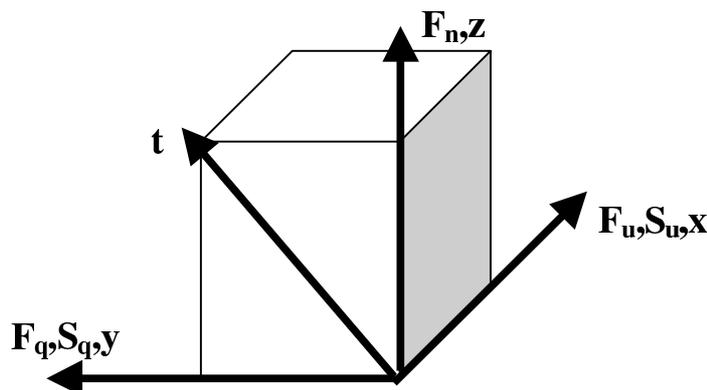


Abbildung 5.1: Koordinatendarstellung der Messungen

Um Darstellungsformen für die Messwerte entwickeln zu können, wurden zunächst schon entwickelte Darstellungsformen betrachtet. Dabei stehen die Darstellungsformen von Novopolsky (siehe auch Abbildung 5.2), im Vordergrund [Novo-67]. Novopolsky untersuchte die lokalen Spannungsverläufe in den Richtungen x , y und z in der Bodenaufstandsfläche. Da diese Messungen auf einem Flachbahnprüfstand durchgeführt wurden, untersuchte Novopolsky hier nur eine Spur in Umfangsrichtung und eine Spur in Querrichtung.

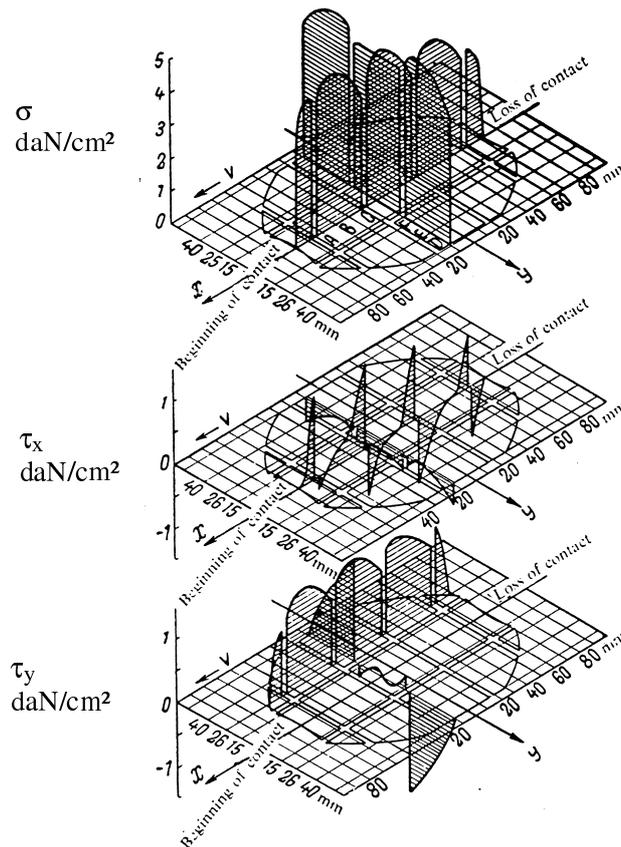


Abbildung 5.2: 3 K-Messung mit Auflösung der Profilblöcke [Novo-67]

Entsprechend den Auswertungen von Novopolsky ist eine Betrachtung der Kräfte in z -Richtung nicht notwendig, da im Allgemeinen die Druckverteilung der Profilblöcke betrachtet wird, d.h. die Weitergabe des Innendruckes des Reifen.

Die Messergebnisse der Kräfte in x und y Richtung sind jeweils auf eine Fläche bezogen (siehe auch Novopolsky). Aus diesem Grund macht auch hier nur Sinn, die örtlichen Spannungen zu betrachten.

Als Darstellungsweisen kommen verschiedene Formen in Frage:

- Kontaktflächendarstellung
- Zeitlicher Verlauf eines Querschnitts
- Mittlerer Druck/Spannung über dem Umfang

- Maximaler Druck/Spannung über dem Umfang
- Druck/Spannung im Mittelpunkt des Durchlaufs durch die Kontaktfläche über dem Umfang

Die Darstellungsformen, in der ein Wert pro Messung über dem Umfang betrachtet wird, können keinen Eindruck über die Blockmechanik vermitteln, jedoch Schwankungen und Unregelmäßigkeiten über den Umfang aufzeigen. Für den zeitlichen Verlauf über den Querschnitt gilt, dass dort nur eine Stelle pro Umfang betrachtet werden kann. Dies lässt auch keinen Eindruck über lokale Unterschiede zu. Eine solche Messung kann auch durch die Wahl der Stelle beeinflusst werden. Die Kontaktflächendarstellung ermöglicht hingegen, die lokalen Effekte der einzelnen Blöcke aufzulösen. Dadurch können grundsätzliche Erkenntnisse über die Blockmechanik gewonnen werden (siehe Abbildung 5.3, 5.4, 5.5).

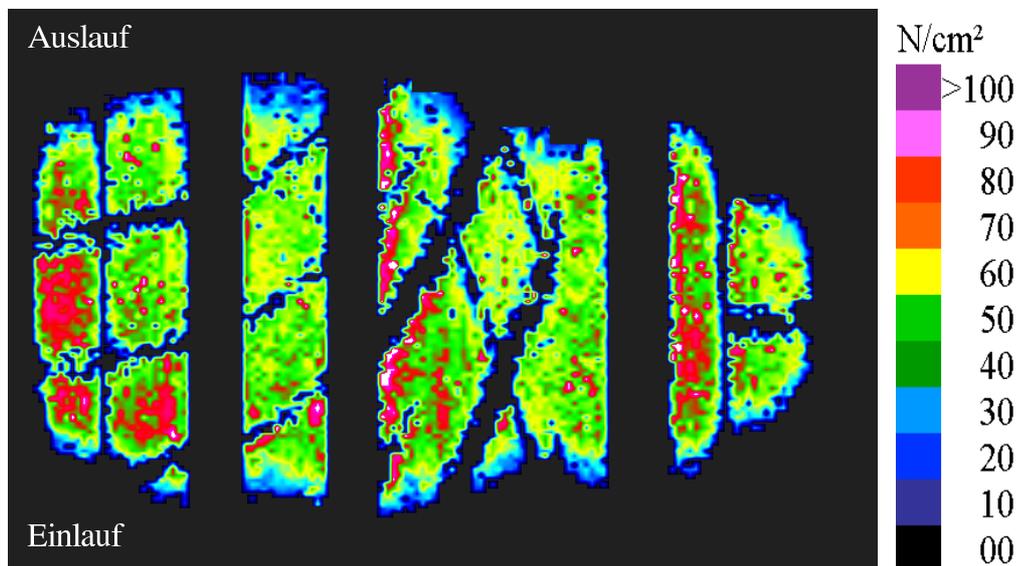


Abbildung 5.3: Normaldruckverlauf eines Reifenfootprints

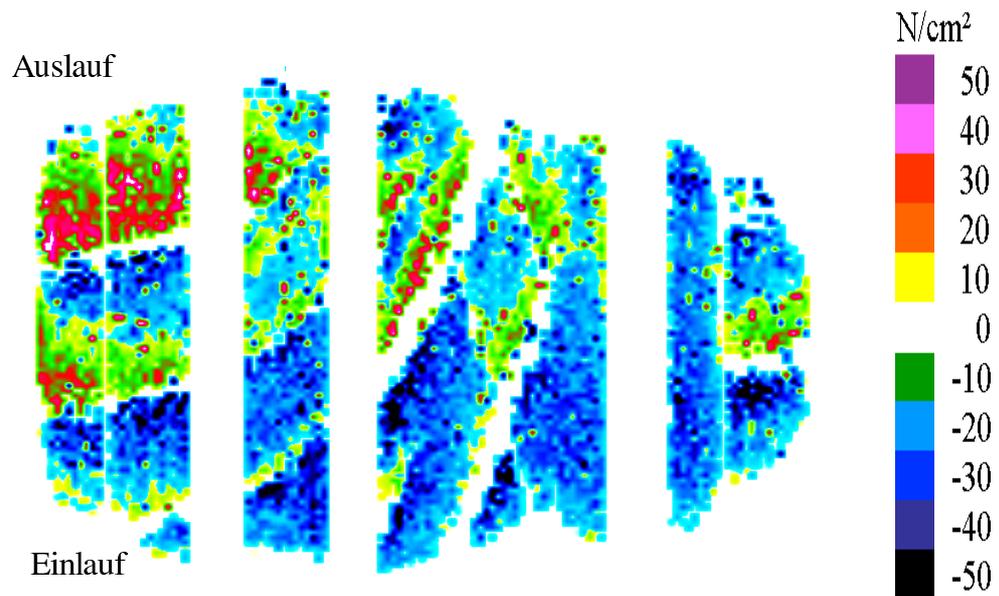


Abbildung 5.4: Längsspannungsverlauf eines Reifenfootprints

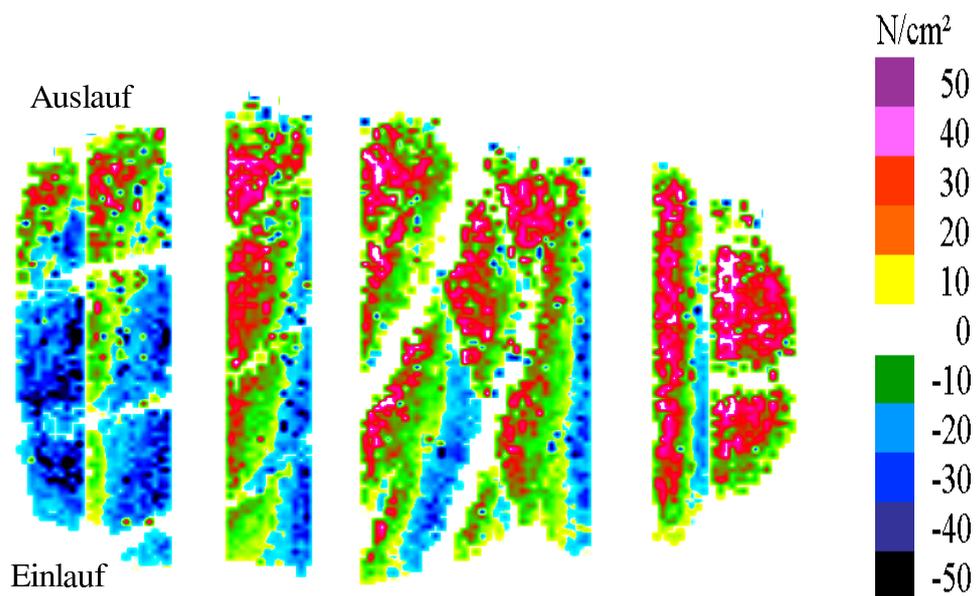


Abbildung 5.5: Querspannungsverlauf eines Reifenfootprints

5.3 Berechnung der örtlichen Reibwerte

Aus den 3 K-Messwerten können aber auch andere Messwerte gewonnen werden. Die Betrachtung des Reibwertes, der schon im Kapitel 2 beschrieben wurde, ermöglicht die Betrachtung des Verhältnisses aus örtlicher Tangentialkraft und örtlicher Normalkraft (siehe Abbildung 5.4).

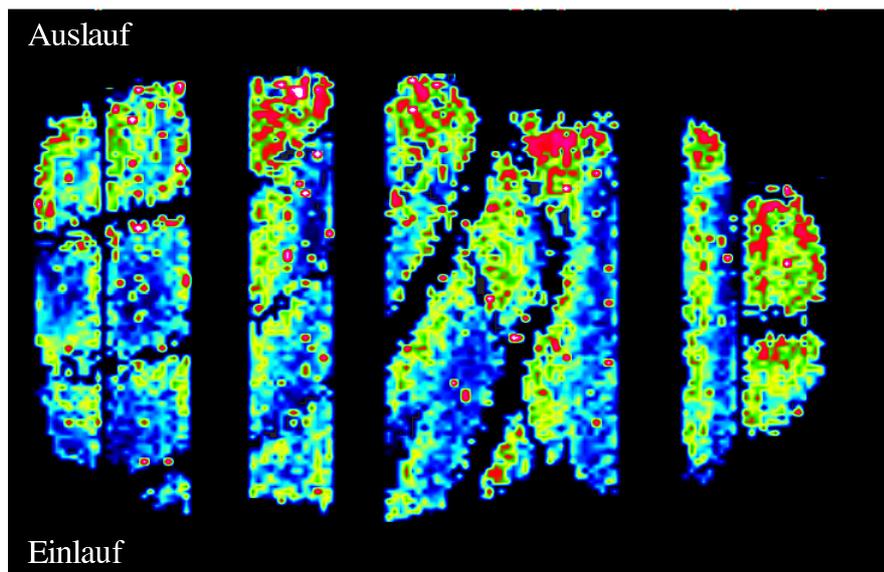


Abbildung 5.4: Reibwertverlauf eines Reifenfootprints (rot = hohe / blau = geringe Reibwerte)

5.4 Berechnung der Reibenergien aus den 3 K-Kraftverläufen

In Kapitel 2 wird u.a. der Zusammenhang zwischen dem örtlichen Reibwert und der Abriebsenergie beschrieben. Diese Betrachtung ist nicht ausreichend, da in ihr die Einflüsse der Temperatur, der Relativbewegung und des Druckes nicht berücksichtigt werden. Jedoch bietet diese Betrachtung eine einfache Möglichkeit, aus dem lokalen Reibwert die lokale Abriebsenergie zu ermitteln. Aus der Abbildung 2.12 von Seite 19 wurde näherungsweise folgende Formel approximiert:

$$W_{\text{abrieb}} = 2.6147 * e^{(1.958 * \mu)}$$

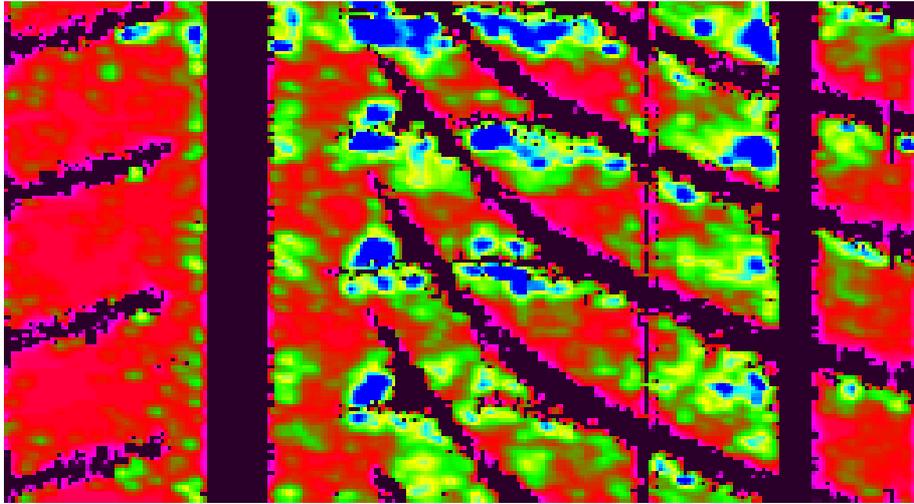


Abbildung 5.6: Abriebsenergie bei einem Reifen (blau = hohe / rot = geringe Energie)

In Abbildung 5.6 sieht man deutlich die Unterschiede in der Abriebsenergie, die bei der Berechnung der Abriebsenergie bei einem Profil auftreten können.

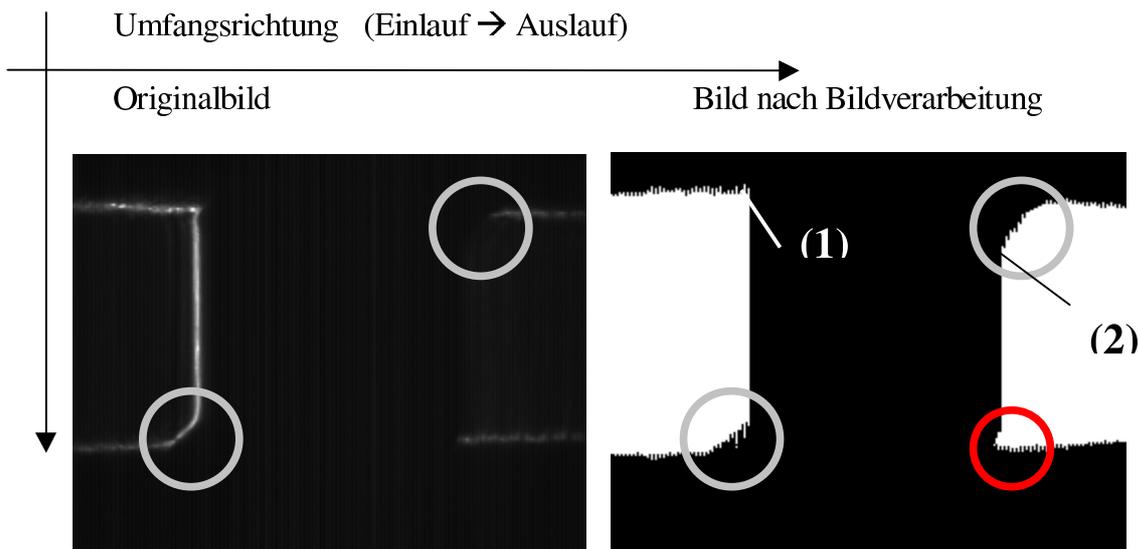
6. Auswertung der Schlupfmessung

Bei den Schlupfmessungen fallen 800 Bilder pro Spur und abhängig von der Reifenbreite bis zu 350 Spuren an. Die Bilder decken einen Bereich von ca. 15 mm bzw 7.5 mm ab, deshalb werden erheblich weniger Messungen als bei der 3 K-Messung benötigt. Dies entspricht einem Fünftel der Messungen der Kräfte der Bodenaufstandsfläche, so dass beide Messungen den gleichen Zeitrahmen benötigen.

Da diese Bilder eine sehr große Datenmenge darstellen, werden die Profilkanten aus diesen Bildern erkannt und entsprechend gesichert. Die Zuordnung zu den Reifenpositionen und der Spurposition erfolgt mit der Position durch den Radtrigger und über die Position der Kanten im Bild.

6.1 Betrachtung und Interpretation der Ergebnisse

Da es sich hier um ein völlig neues Messverfahren handelt, müssen die gewonnenen Daten zunächst betrachtet und die entsprechenden Verläufe verschiedenen geometrischen Ein- und Auslaufphänomenen zugeordnet werden.



Zeit t

Abbildung 6.1: Bilder vom Querschlupf: Graue Kreise Ein- und Auslauf Effekte; roter Kreis Snap Out Effekt

In der Abbildung 6.1 sind die gewonnenen Bilder der Schlupfmessung dargestellt. Man erkennt deutlich einen geometrisch oder zeitlichen Effekt durch das Ein- bzw. Auslaufen des Profilblockes in die oder aus der Bodenaufstandsfläche.

Der geometrische Effekt entsteht durch das Auftreffen zu unterschiedlichen Zeitpunkten von Profilblockvorderkante und -hinterkante in die Aufstandsfläche. Zum Zeitpunkt (1) tritt die Vorderkante in die Aufstandsfläche ein, wohingegen sich die Hinterkante erst zum Zeitpunkt (2) vollständig im Kontakt befindet. Der gleiche Effekt kann auch beim

Abheben beobachtet werden. Dies ist kein Schlupf, sondern ein Kontakt zu unterschiedlichen Zeitpunkten, d.h. diesen Effekt darf man nicht berücksichtigen. Zusätzlich muss man beachten, dass durch eine Bewegung in y-Richtung eine scheinbare Bewegung in x-Richtung, beispielsweise bei schrägen Blockkanten, entstehen kann.

Bei dem rotumrandeten Bereich handelt es sich um einen sogenannten Snap Out Effekt, denn hier bewegt sich die Profilblockkante kurz vor dem Verlassen der Bodenaufstandsfläche an einer Stelle, die sich nicht aufgrund der Geometrie bewegen würde.

Bei der Betrachtung der Zuordnung der Messwerte zu den Reifenpositionen stellte sich heraus, dass die Zuordnung nicht exakt genug ist. D. h., dass eine exakte Zuordnung der Reifenposition zu den gemessenen Kanten nicht möglich ist. In diesem Zusammenhang muss in Zukunft die Erfassung der Position der einzelnen Schlupfmessungen verbessert werden. Dies betrifft insbesondere die Schlupfmessungen in Querrichtung, da es dort besonders wichtig ist, an welcher Stelle (Ein-, Auslauf oder Blockmitte) die Messung erfolgte. Bei den Schlupfmessungen in Umfangsrichtung kann die Zuordnung durch die 3 K-Messungen erfolgen, indem man die Kantenpositionen auf die Kanten aus den 3 K-Messungen projiziert. Die Schlupfmessungen werden global betrachtet und bewertet. Ein zusätzlicher Nachteil dieses Messverfahrens ist, dass die Schlupfwerte bei umlaufenden Profilbändern nicht ermittelt werden können.

6.2 Darstellungsformen der Messwerte

Bei der Betrachtung der Messwerte ist die absolute Bewegung der Profilkanten weniger interessant. Die Relativbewegungen der Profilkanten jedoch zeigen an, in welchem Bereich die Bewegung der Profilklötze am größten ist und entsprechend Gleitreibung und Abrieb zu erwarten ist.

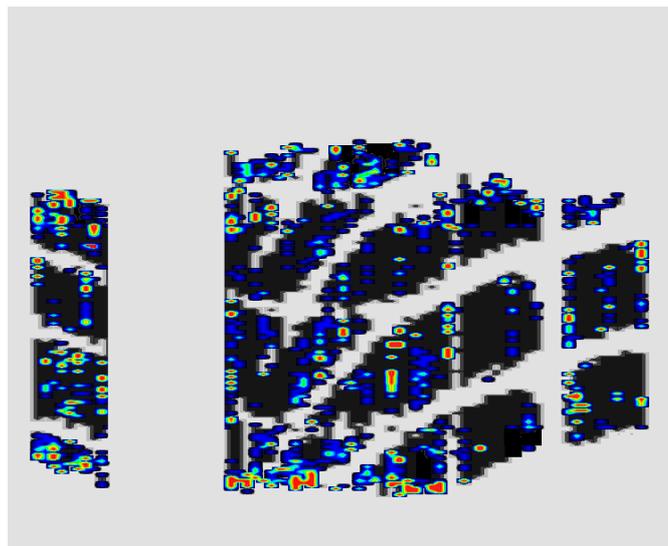


Abbildung 6.2: Relative Profilbewegung in Längsrichtung (schwarz-blau = geringer Schlupf, rot = hoher Schlupf)

6.3 Konturermittlung aus den Schlupfmessungen unabhängig von der Profilgeometrie

Die Länge der Messung zeigt die Länge der Bodenaufstandsfläche an. Fasst man nun die Längen in den gemessenen Spuren zusammen, kann man die Kontur der Bodenaufstandsfläche von Reifen ermitteln. In den folgenden Darstellungen 6.3, 6.4 und 6.5 sind drei unterschiedliche Reifen und deren Kontur dargestellt. Man erkennt deutlich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Reifen. Der Reifen 3 hat eine deutlich rundere Kontur als der Reifen 1 und Reifen 2.



Abbildung 6.3: Kontur der Bodenaufstandsfläche von Reifen 1



Abbildung 6.4: Kontur der Bodenaufstandsfläche von Reifen 2



Abbildung 6.5: Kontur der Bodenaufstandsfläche von Reifen 3

7. Validierung der Messung

Für die Validierung der Messergebnisse wurde ein Programm bestehend aus drei unterschiedlichen Reifen mit unterschiedlichen Konturen, unterschiedlichen Profilgeometrien und daraus resultierenden unterschiedlichen Abriebsergebnissen zusammengestellt.

Erstes Validierungskriterium ist der Vergleich der Messergebnisse vom Prüfstand mit Messungen auf einem Prüfstand mit ähnlichem Messprinzip und zwar auf dem Flachbahnprüfstand der Firma Smithers. Die Vergleichbarkeit mit den Daten der Firma Smithers ist dabei aufgrund des Geschwindigkeitseinflusses und den unterschiedlichen Krümmungen des Trommel- und des Flachbahnprüfstandes nur unter leichten Einschränkungen möglich. Zweites Validierungskriterium ist der Vergleich der Reibwerte/Reibenergien mit Abriebsergebnissen von der Abriebsmaschine.

Schließlich werden die Abriebsphänomene charakterisiert und die Ursachen für die Abriebsformen aufgezeigt.

Prüfbedingungen:

Bei den rollenden Messungen wurden als Prüfbedingungen die Hinterachsbedingungen des linken Hinterrades des VW Passat zugrunde gelegt. Diese Prüfbedingungen liegen auch den Maschinenabriebsmessungen, die im Kapitel 3.1 beschrieben wurden, zugrunde. Dies hat den Grund, dass hinten links die kritischste Position ist, auf der erfahrungsgemäß die unregelmäßigen Abriebsformen gefunden werden. Die linke Hinterradposition ist insbesondere auf der Prüfmaschine kritisch, weil sich hier die durch die Gürtelwinkel ergebende Strukturseitenkraft und die durch Schräglauf/Vorspur erzeugte Seitenkraft addieren, so dass die Tangentialkräfte des Reifens auf diesen Seiten höher sind, was auf einen erhöhten Abrieb schließen lässt.

Prüfbedingungen:

Last	302 dN
Luftdruck	2 bar
Schräglauf	0.2°
Sturz	-1.5°

7.1 Vergleich der 3 K-Messergebnisse von Trommel- und Flachbahnprüfstand

Vergleich der Druckverteilung

Zunächst werden die Druckverteilungen, die auf dem Flachbahnprüfstand der Firma Smithers ermittelt wurden, den Prüfergebnissen des Trommelprüfstandes gegenübergestellt.

Dabei bewirkt die Trommelkrümmung, dass die Bodenaufstandsfläche auf dem Trommelprüfstand gegenüber dem Flachbahnprüfstand eine etwas andere Geometrie bekommt. Auf dem Trommelprüfstand ist die Bodenaufstandsfläche kürzer, breiter und

die Fläche insgesamt kleiner. Diese geringere Fläche wiederum bedingt dann einen höheren Druck. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit des Reifens bei den Messungen auf dem Trommelprüfstand mit 50km/h gegenüber ca. 1km/h, ändert sich auch die Druckverteilung in der Kontaktfläche. Die Dynamik führt zu einer Druckerhöhung im Einlaufbereich. Dieses Phänomen wurde schon bei Messungen von Gerresheim beschrieben [Gerr-75].

Die höhere Auflösung der Messungen auf dem Trommelprüfstand ermöglicht hier zusätzlich die Betrachtung lokaler Effekte, die mit der Auflösung der Messungen von Smithers nicht möglich sind.

Beim Vergleich der Messungen von Reifen 1 in Abbildung 7.1 kann man deutlich die insgesamt höhere Druckverteilung insbesondere im Schulterbereich erkennen. Der durch die Dynamik bedingte Effekt der Druckspitzen im Einlaufbereich wird hier auch deutlich. Die Form der Kontur ist jedoch bei beiden Kontaktflächen ähnlich.

Entsprechend verhält sich dies auch für die Reifen 2 und 3 in Abbildung 7.2 und 7.3.

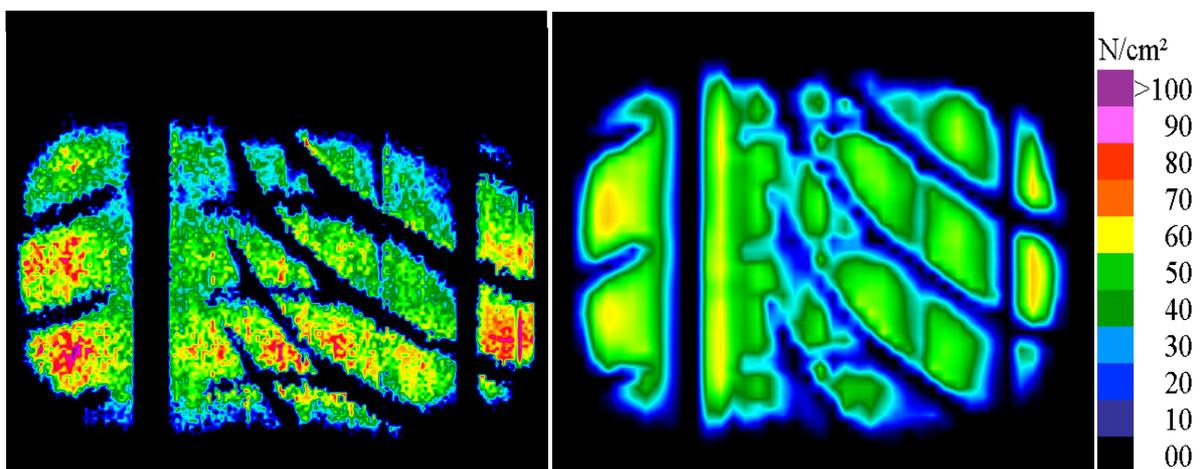


Abbildung 7.1 Vergleich der Druckverteilung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 1

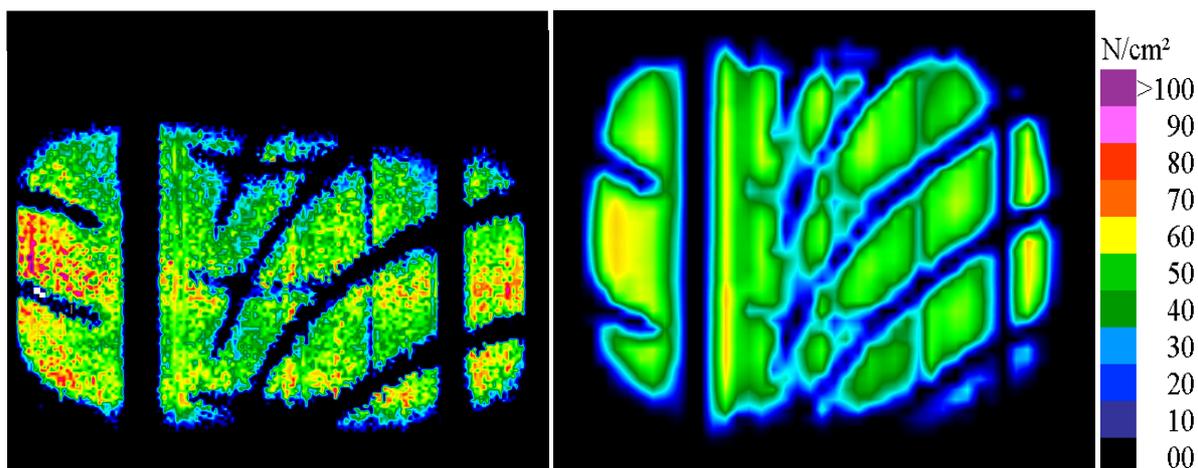


Abbildung 7.2 Vergleich der Druckverteilung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 2

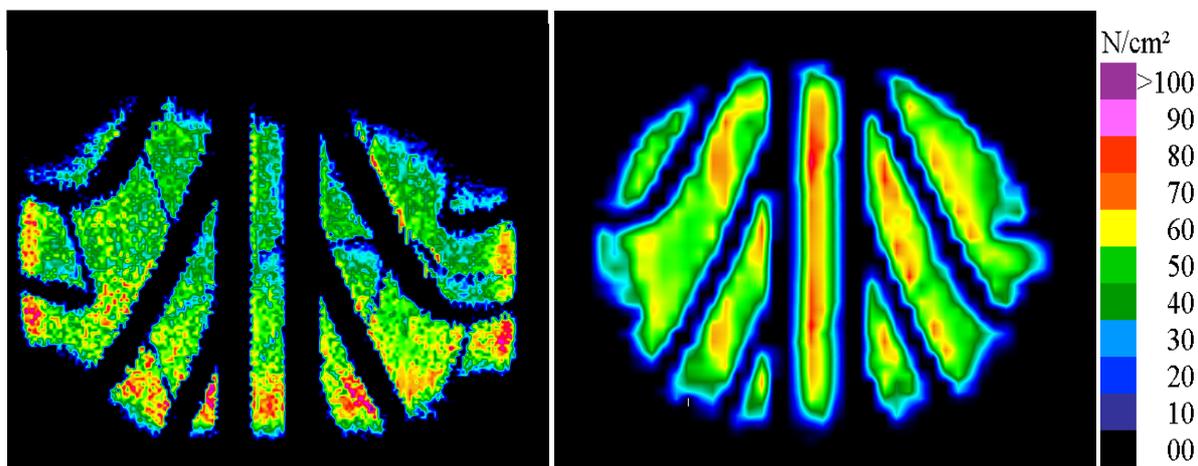


Abbildung 7.3 Vergleich der Druckverteilung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 3

Vergleich der Längsspannungsverteilung

Beim Vergleich der Längsspannungsverteilung zeigen sich die größten Unterschiede zwischen den Messungen auf dem Trommelprüfstand und dem Flachbahnprüfstand. Dies liegt an den unterschiedlichen Kontaktflächenlängen, die insbesondere bei der Längsspannungsverteilung eine große Rolle spielen und sich hier aufgrund der verschiedenen Krümmungen der Oberflächen stark bemerkbar machen. Insgesamt zeigen die Messungen jedoch eine ähnliche Spannungsverteilung bei beiden Messungen. Da die Blockgrenzen aufgrund der schlechten Auflösung bei den Messungen von Smithers nicht mehr ersichtlicher sind, wurde in den Abbildungen ein Bild der Druckverteilung hinzugefügt.

Der Vergleich der Spannungsverteilungen von Reifen 1 in Abbildung 7.4 zeigt die gleichen Spannungsverteilungen auf den Blöcken: Ein Abbremsen der Blöcke im

Einlaufbereich und daraus resultierend eine negative Spannung und ein Beschleunigen im Auslaufbereich und daraus resultierend eine positive Spannung. Ähnlich verhält sich dies auch bei Reifen 2 und 3 in Abbildung 7.5 und 7.6.

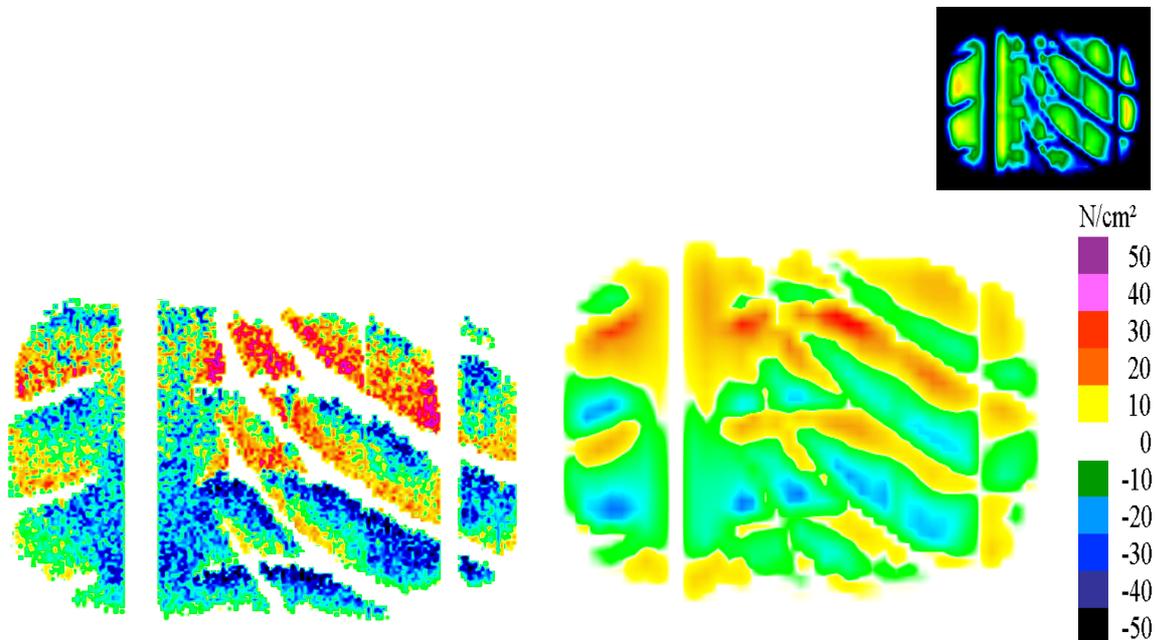


Abbildung 7.4 Vergleich der Spannungsverteilung in Längsrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 1

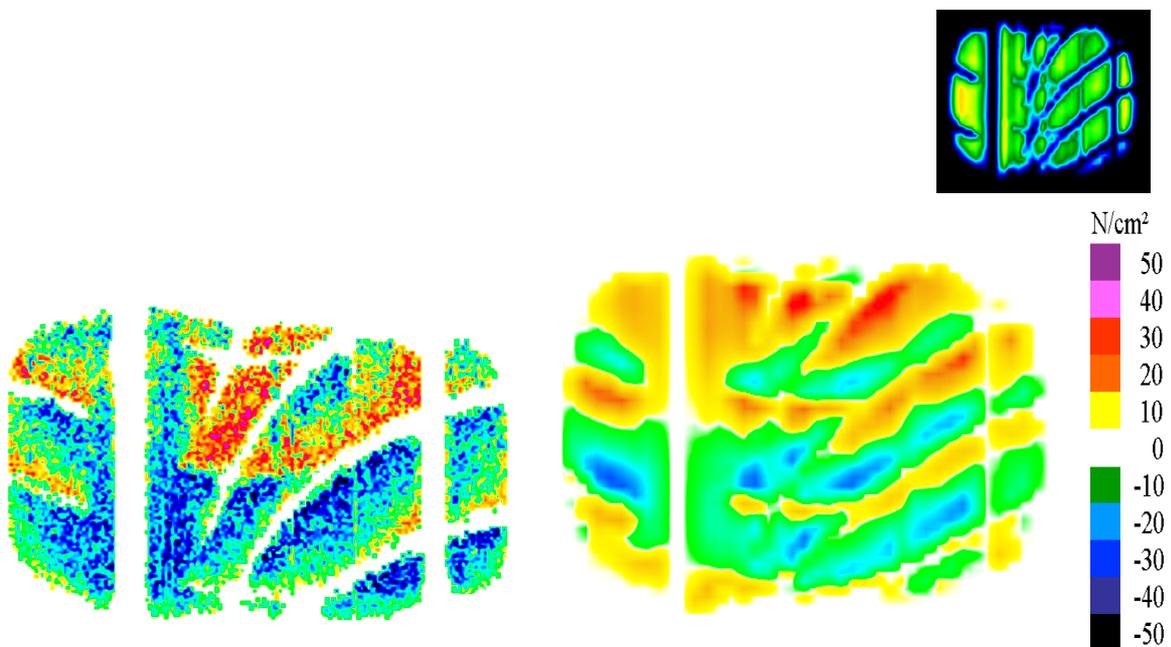


Abbildung 7.5 Vergleich der Spannungsverteilung in Längsrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 2

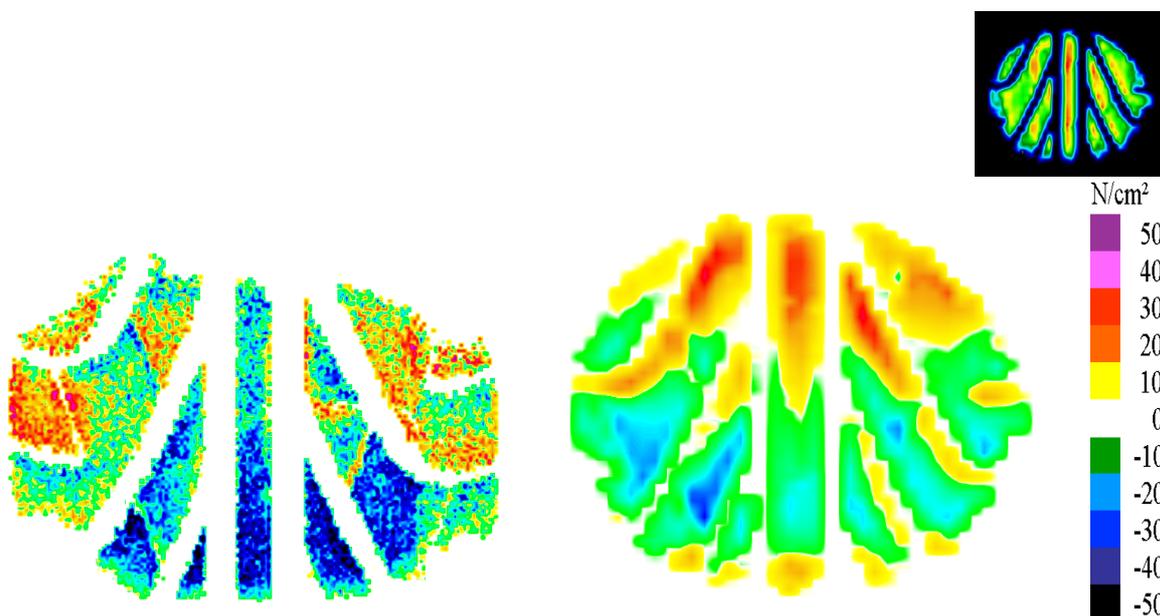


Abbildung 7.6 Vergleich der Spannungsverteilung in Längsrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 3

Vergleich der Querspannungsverteilung

Der Vergleich der Spannungsverteilung in Querrichtung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Messungen von Smithers mit den Messungen auf dem Trommelprüfstand. Insgesamt sieht man bei dem Trommelprüfstand die höhere Auflösung und dadurch auch höhere Spannungsspitzen als bei den Messungen von Smithers.

In Abbildung 7.7 ist wiederum Reifen 1 dargestellt. Deutlich ersichtlich wird hierbei der Einfluss der Strukturseitenkraft und des Schräglaufwinkels. Denn die durch die Strukturseitenkraft und die durch den Schräglaufwinkel erzeugten Seitenkräfte verursachen eine unsymmetrische Verteilung der Spannungen in Querrichtung. Die positiven Spannungen, hier rot/gelb, dominieren in der Kontaktfläche deutlich, wohingegen die negativen Spannungen eher selten sind. Beim Aufsummieren ergibt sich dadurch die Seitenkraft des Reifens.

Dieses findet sich auch bei Reifen 2 und 3 wieder (siehe Abbildungen 7.8 und 7.9).

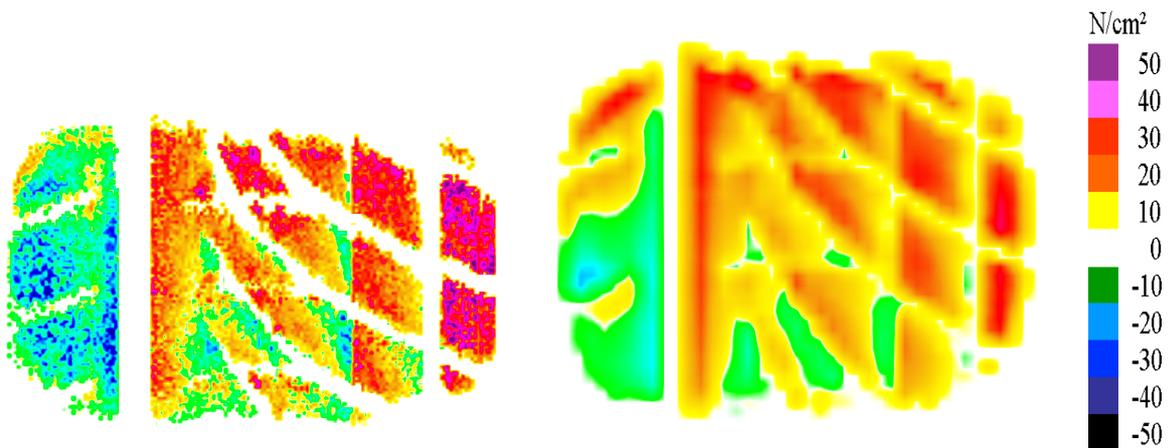


Abbildung 7.7 Vergleich der Spannungsverteilung in Querrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 1

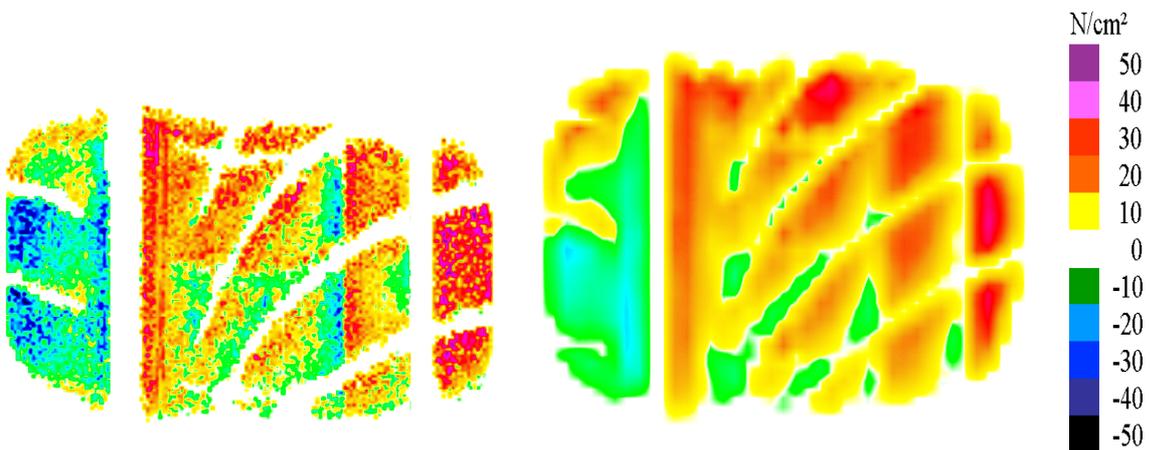


Abbildung 7.8 Vergleich der Spannungsverteilung in Querrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 2

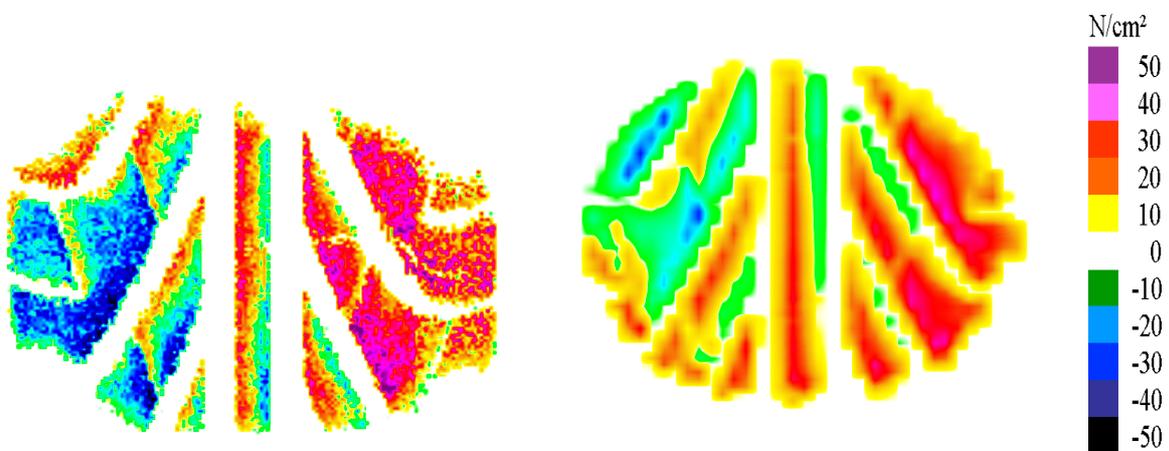


Abbildung 7.9 Vergleich der Spannungsverteilung in Querrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahnprüfstand) (rechts) Reifen Nr. 3

7.2 Vergleich der Schlupfmessung am Trommelprüfstand- und Flachbahnprüfstand

Beim Vergleich der Schlupfmessung können leider nur die Schlupfmessungen in Längsrichtung herangezogen werden, da aufgrund der fehlerhaften Reifenpositionserkennung keine blockbezogene Auswertung möglich war. Dargestellt sind hier nicht die aufsummierte Bewegung des Reifens beim Durchlauf durch die Bodenaufstandsfläche, sondern die Relativbewegungen. Dies hat den Grund, dass Abrieb nur durch lokale Relativbewegung entsteht. Bei der Betrachtung der Relativbewegung fällt auf, dass die Bewegung größtenteils im Einlauf und Auslauf der Bodenaufstandsfläche stattfindet.

Die Schlupfmessungen in Längsrichtung zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen von Smithers. Dies wird insbesondere bei einer Betrachtung von Bildabfolgen ersichtlich, welche in dieser Arbeit nicht gezeigt werden können, da man bei den Bildabfolgen den Einlauf und das Auslaufen der Profilblöcke eingehender betrachten kann.

In Abbildung 7.10 ist die Relativbewegung des Reifens 1 dargestellt. Die breite „Profilrille“ der Messung auf dem Trommelprüfstand resultiert, wie im Kapitel 6.1 beschrieben, aus dem Nachteil des verwendeten Schlupfmessverfahrens, bei dem die Bewegungen von umlaufenden Profilbändern nicht erfasst werden können. Die Bewegung im Mittenbereich ist bei beiden Prüfmethoden ähnlich und im Schulterbereich ist die Relativbewegung auf dem Trommelprüfstand insbesondere auf der Außenschulter größer als auf dem Flachbahnprüfstand. Ähnlich verhält sich dies für die Reifen 2 und 3 in Abbildung 7.11 und 7.12.

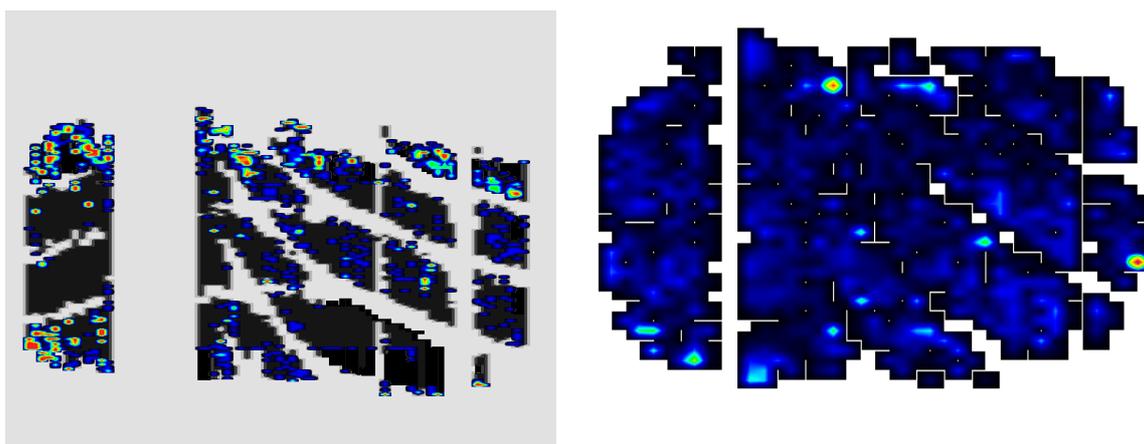


Abbildung 7.10: Vergleich der Relativbewegung in Längsrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahn) (rechts) Reifen Nr. 1 (schwarz-blau = geringer Schlupf, rot = hoher Schlupf)

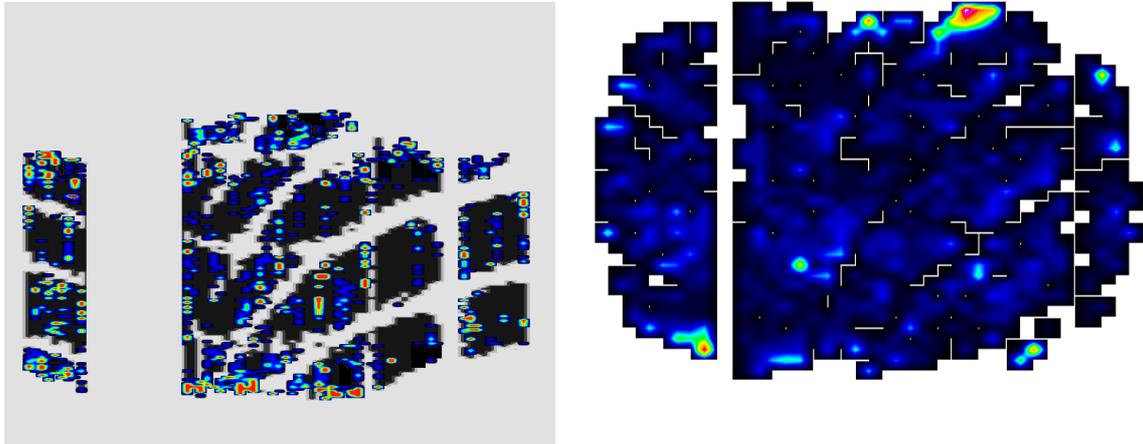


Abbildung 7.11: Vergleich der Relativbewegung in Längsrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahn) (rechts) Reifen Nr. 2 (schwarz-blau = geringer Schlupf, rot = hoher Schlupf)

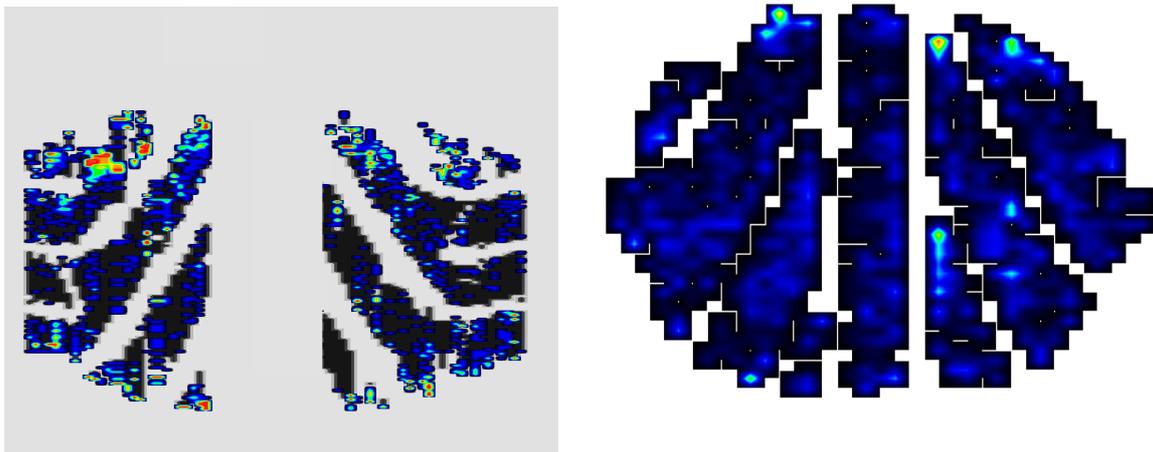


Abbildung 7.12: Vergleich der Relativbewegung in Längsrichtung Trommelprüfstand (links) / Smithers (Flachbahn) (rechts) Reifen Nr. 3 (schwarz-blau = geringer Schlupf, rot = hoher Schlupf)

7.3 Zusammenfassung der Vergleichsuntersuchungen zur Spannungs- und Schlupfverteilung

Die Ergebnisse des Vergleichs der Messungen auf dem Flachbahnprüfstand der Firma Smithers mit den Messungen auf dem Trommelprüfstand zeigen eine vergleichbare Normaldruck-, Längsspannungs-, Querspannungs- und Längsschlupfverteilungen.

Die Abweichungen aufgrund der geometrisch unterschiedlichen Oberflächen von Trommel und Ebene liegen im Rahmen der Erwartungen. Das Gleiche gilt für den Geschwindigkeitseinfluss. Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen den Messungen auf den beiden Prüfständen gut.

Die Messungen auf den Trommelprüfstand spiegeln aufgrund der realistischen Geschwindigkeit eher die Realität wieder. Der entscheidende Vorteil der Messung auf dem Trommelprüfstand ist die 50 mal höhere Auflösung, die es ermöglicht, lokale Effekte, die zum Beispiel unregelmäßigen Abrieb verursachen, zu finden.

7.4 Ermittlung der Abriebsenergie aus den 3 K-Messungen

Die Bestimmung der Abriebsenergie wurde in Kapitel 5.4 beschrieben. Die so ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 7.13 dargestellt. Diese Darstellungen zeigen die aufsummierte Abriebsenergie beim Durchlauf durch die Kontaktfläche und sollten somit Rückschlüsse oder Vorhersagen auf die Abriebsergebnisse beim Abriebstest ermöglichen. Die rote Farbe bedeutet hier wenig Abrieb und von gelb über grün nach blau nimmt die Abriebsenergie und somit der vorhergesagte Abrieb zu. D.h. beim Reifen 1 sind hohe Abriebsunregelmäßigkeiten zu erkennen, so dass hier ein schlechtes Abriebsergebnis erwartet wird und bei Reifen 2 und Reifen 3 sind geringere Abriebsunregelmäßigkeiten ersichtlich, so dass bessere Abriebsergebnisse zu erwarten sind.

Insgesamt sind bei allen drei Reifen Unterschiede auf dem Umfang zu erkennen. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass Abrieb von einer Störstelle am Reifen initiiert wird und sich dann über den Umfang fortpflanzt.

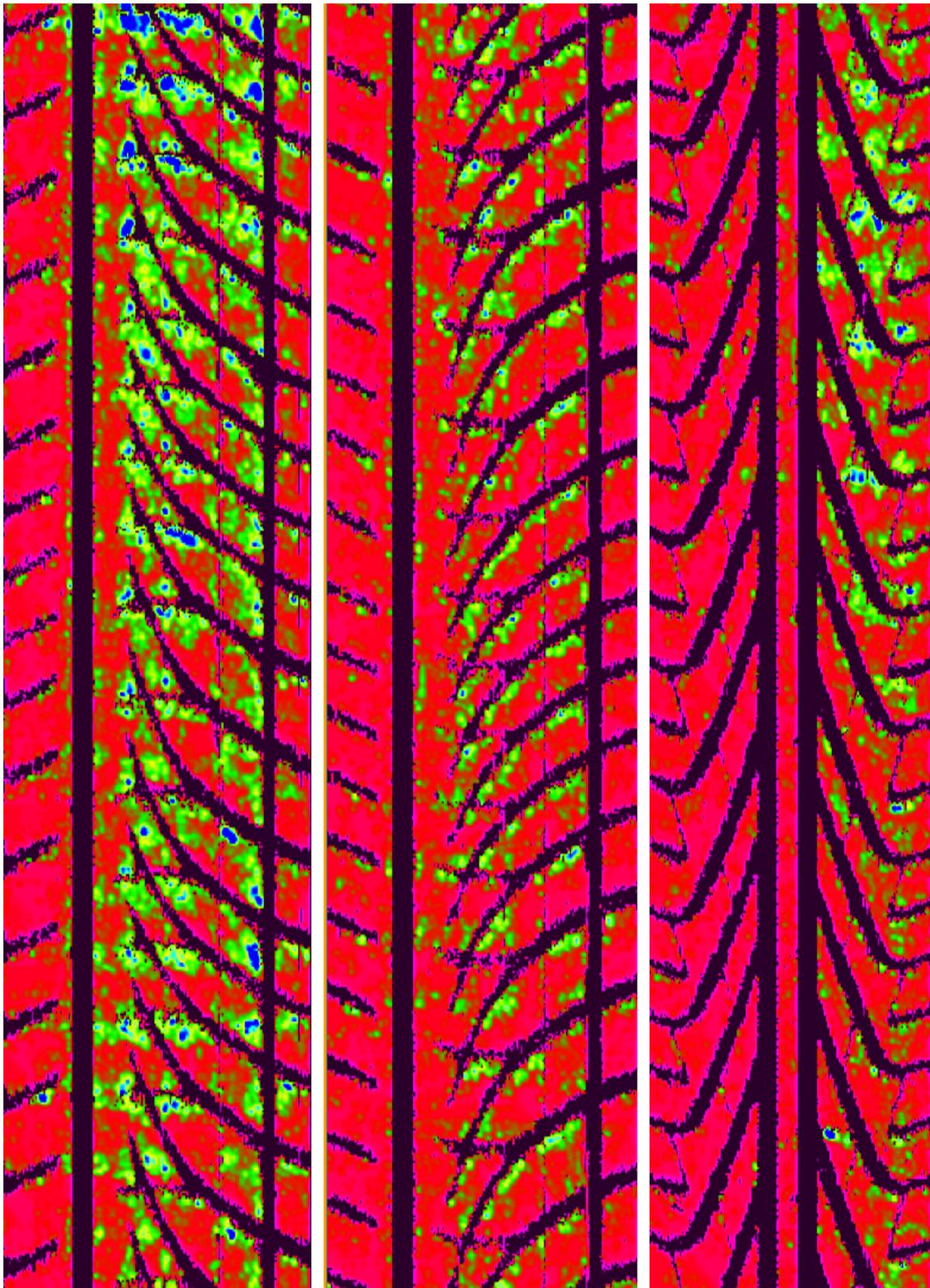


Abbildung 7.13 Vergleich der berechneten Abriebsenergien von Reifen 1, 2 und 3
(blau = hohe / rot = geringe Energie)

7.5 Vergleich der ermittelten Abriebsenergien mit Maschinenabriebsergebnissen

Die in Kapitel 7.4 ermittelten Abriebsvorhersagen werden im Folgenden mit den Maschinenabriebsergebnissen verglichen. Der Vergleich mit Straßenergebnissen erscheint hier weniger sinnvoll, da diese nicht unter konstanten Bedingungen gefahren werden können. Die Ergebnisse der Maschinenabriebsversuche sind unter den gleichen Bedingungen wie die der 3-Komponenten-Kraftmessung ermittelt worden.

In Abbildung 7.14 wird das Abriebsergebnis bei 3600 km, welches ca. 13000 km Straßenabrieb entspricht und bei 5400 km, welches ca. 20000 km Straßenabrieb entspricht, mit der Abriebsvorhersage verglichen. Die Skalierung ist genauso wie für die Abriebsvorhersage: Rot entspricht einer hohen Profilhöhe und somit einem geringen Abrieb und von gelb über grün zu blau verringert sich die Profilhöhe und erhöht sich somit die Abriebsrate.

Ein exakter Vergleich der Abriebsbilder ist nicht sinnvoll, da die Unterschiede bei jedem Reifen an einer anderen Stelle wiedergefunden werden und somit nur die qualitativen Bilder vergleichbar sind. Man erkennt, dass in den Bereichen, in denen später der Abrieb wiedergefunden wird, schon in den Abriebsenergiemessungen hohe Werte vorliegen und entsprechend in den Bereichen, in denen später kaum Abrieb gefunden wird, auch bei der Abriebsenergie geringe Werte gemessen werden. Darüber hinaus können Unterschiede über den Umfang detektiert werden; dies entspricht auch dem später gefundenen Abriebsbild, bei dem beispielsweise nur jeder zweite Block abreibt. Global gesehen stimmt das Abriebsbild gut mit der Abriebsvorhersage überein.

Die Abriebsvorhersage in Abbildung 7.15 korreliert auch mit den gefundenen Abriebsergebnissen. Im Vergleich zu Abbildung 7.14 ist hier der unregelmäßige Abrieb deutlich geringer. Dies wird auch bei der Abriebsvorhersage wiedergefunden. Das Gleiche gilt auch für Abbildung 7.16, in der die Abriebsvorhersage und der Abrieb von Reifen 3 betrachtet werden.

Insgesamt stimmt die Abriebsvorhersage und das Abriebsergebnis bei allen 3 Reifen gut überein.

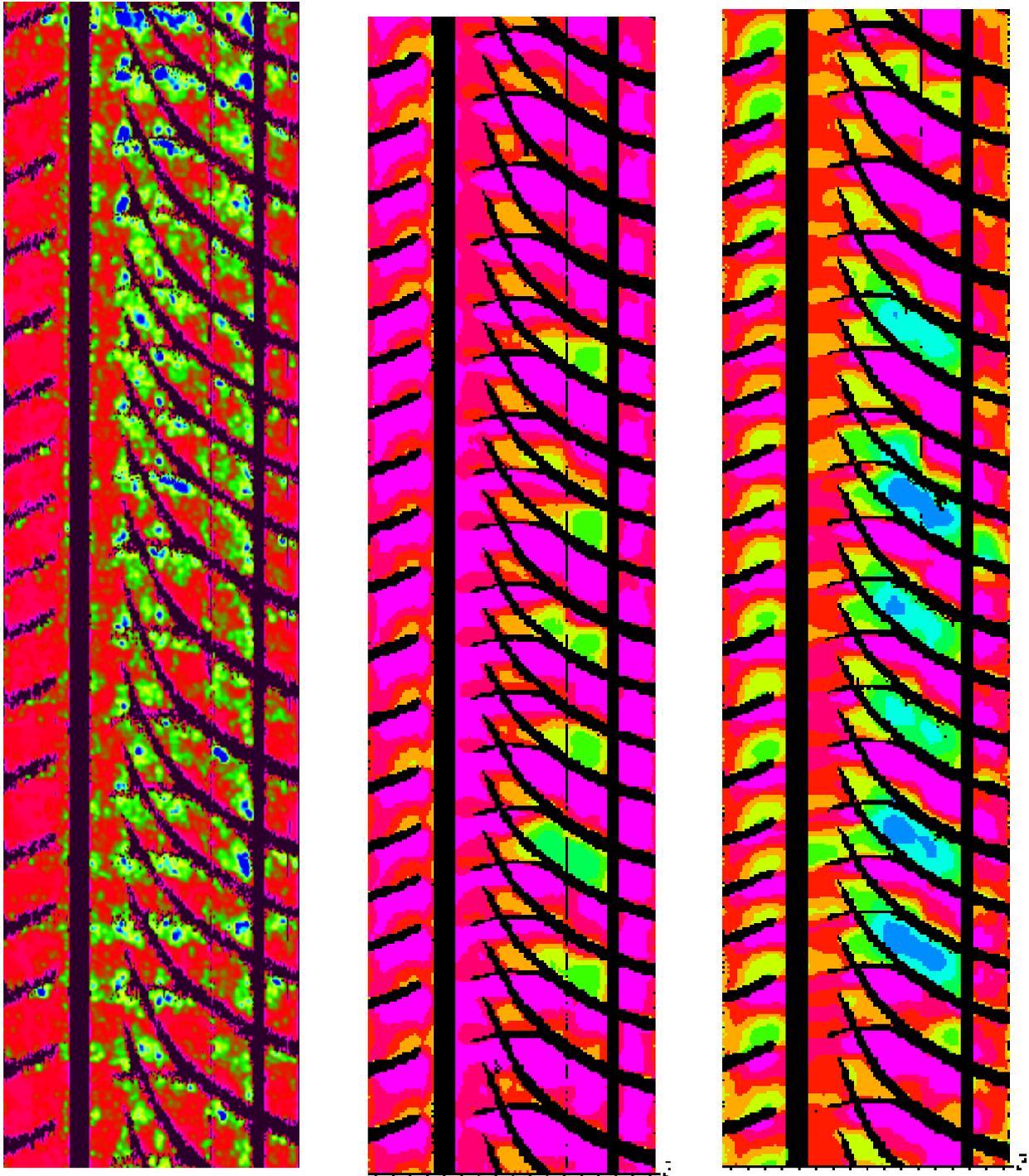


Abbildung 7.14: Abriebsvorhersage (blau = hohe / rot = geringe Energie) / Abrieb nach 3600 km (blau = hoher / rot = geringer Abrieb) / - nach 5400 km (blau = hoher / rot = geringer Abrieb) (Reifen 1)

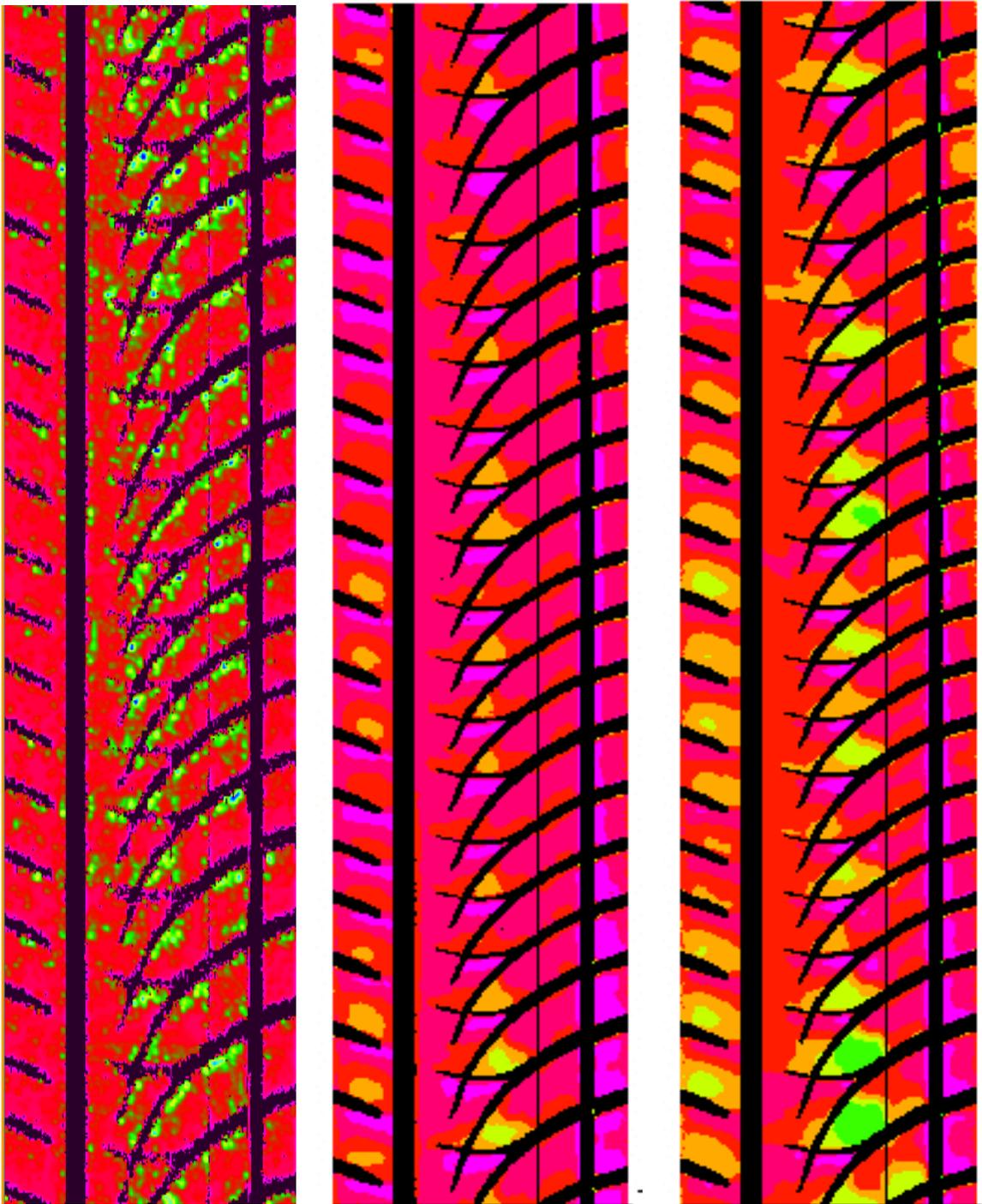


Abbildung 7.15: Abriebsvorhersage (blau = hohe / rot = geringe Energie) / Abrieb nach 3600 km (blau = hoher / rot = geringer Abrieb) / - nach 5400 km (blau = hoher / rot = geringer Abrieb) (Reifen 2)

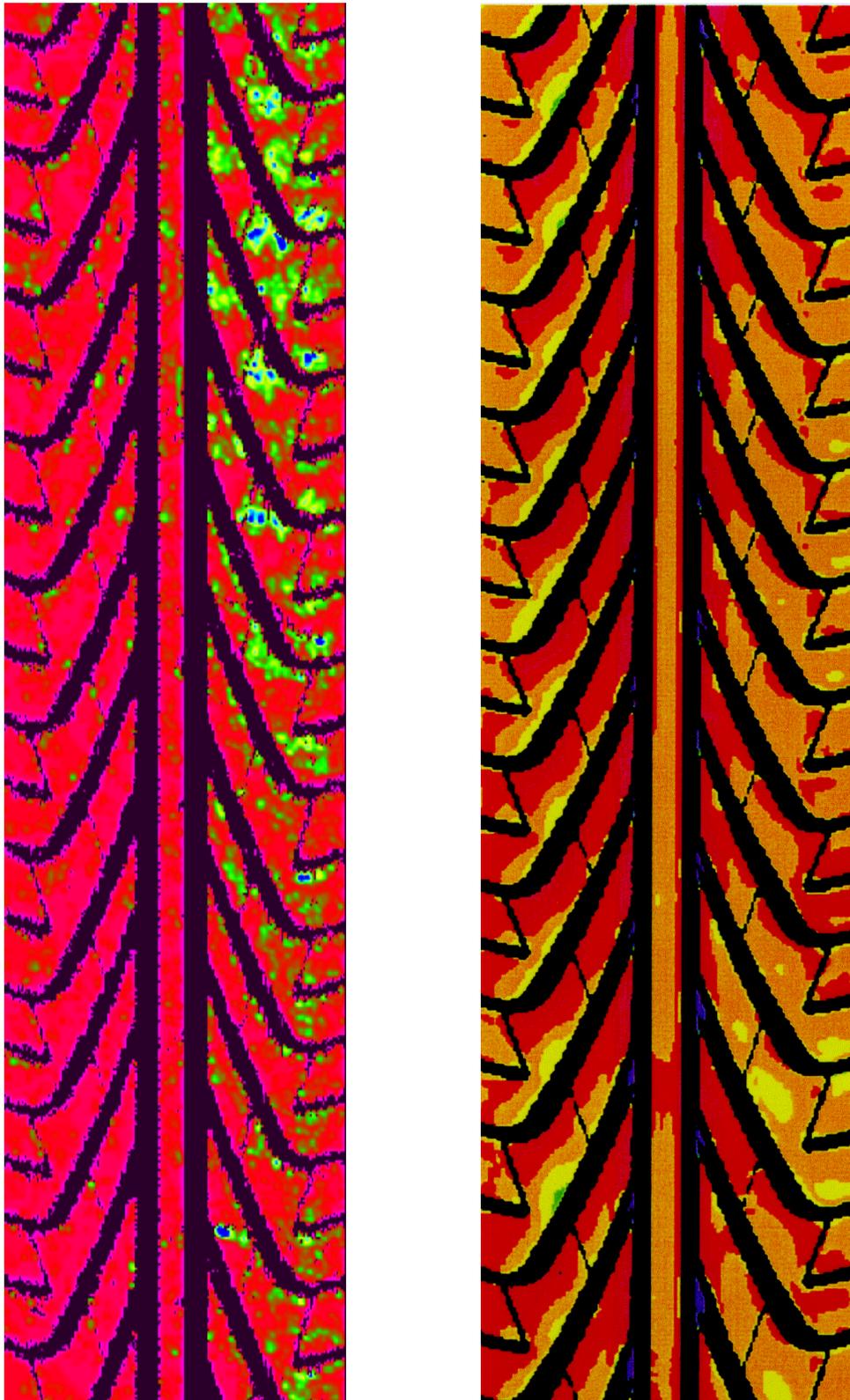


Abbildung 7.16: Abriebsvorhersage (blau = hohe / rot = geringe Energie) / Abrieb nach 3600 km (blau = hoher / rot = geringer Abrieb) (Reifen 3)

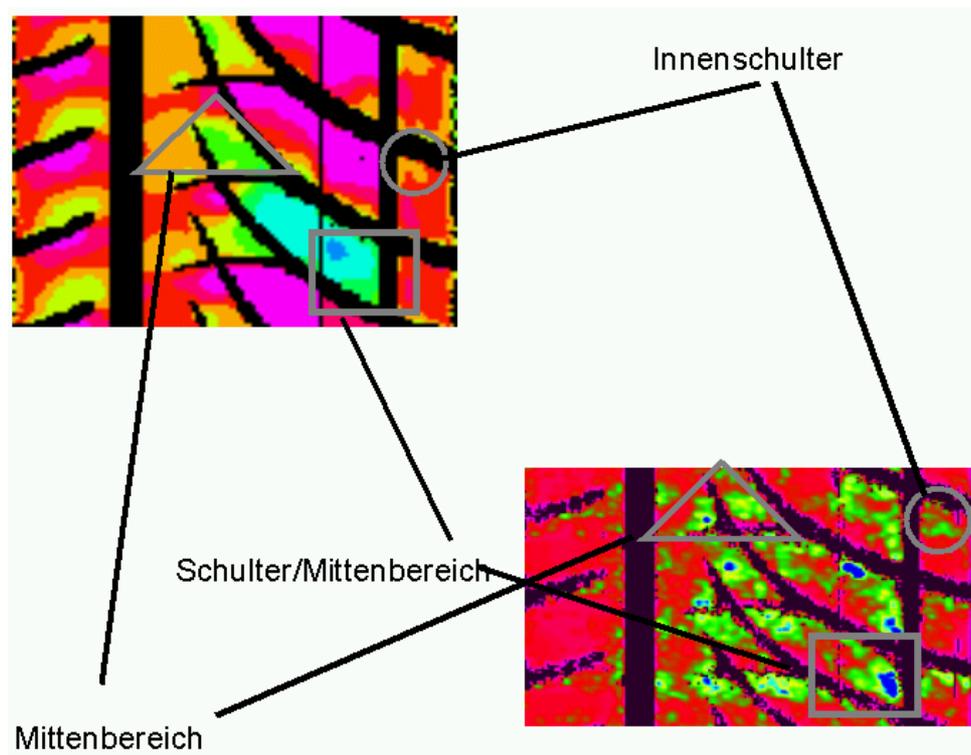


Abbildung 7.17: Detailbetrachtung der Abriebsergebnisse von Reifen 1

Bei der Betrachtung eines vergrößerten Ausschnitts der Darstellung des Maschinenabriebs und der Abriebsvorhersage findet man den unregelmäßigen Abrieb auch im Detail wieder.

In der Abbildung 7.17 wird der Abrieb und die Vorhersage von Reifen 1 miteinander verglichen. Im Innenschulterbereich bis zum Mittbereich kann man nicht nur den Ort, sondern auch die Intensität des Abriebs in der Vorhersage wiederfinden. Nur die Abriebsergebnisse auf der Außenschulter können nicht in der Vorhersage detektiert werden. Dies kann an der vereinfachten Umrechnung des Reibwerts in die Abriebsenergie liegen, da der Einfluss der Temperatur, der Gleitgeschwindigkeit und des Druckes nicht berücksichtigt werden.

Reifen 2 zeigt in Abbildung 7.18 auch Ort und Intensität des Abriebses in einer geringeren Größenordnung. Vorhersage und Abriebsergebnis stimmen auch bis auf den Schulterbereich gut überein. Das Gleiche gilt auch für Reifen 3 in Abbildung 7.19.

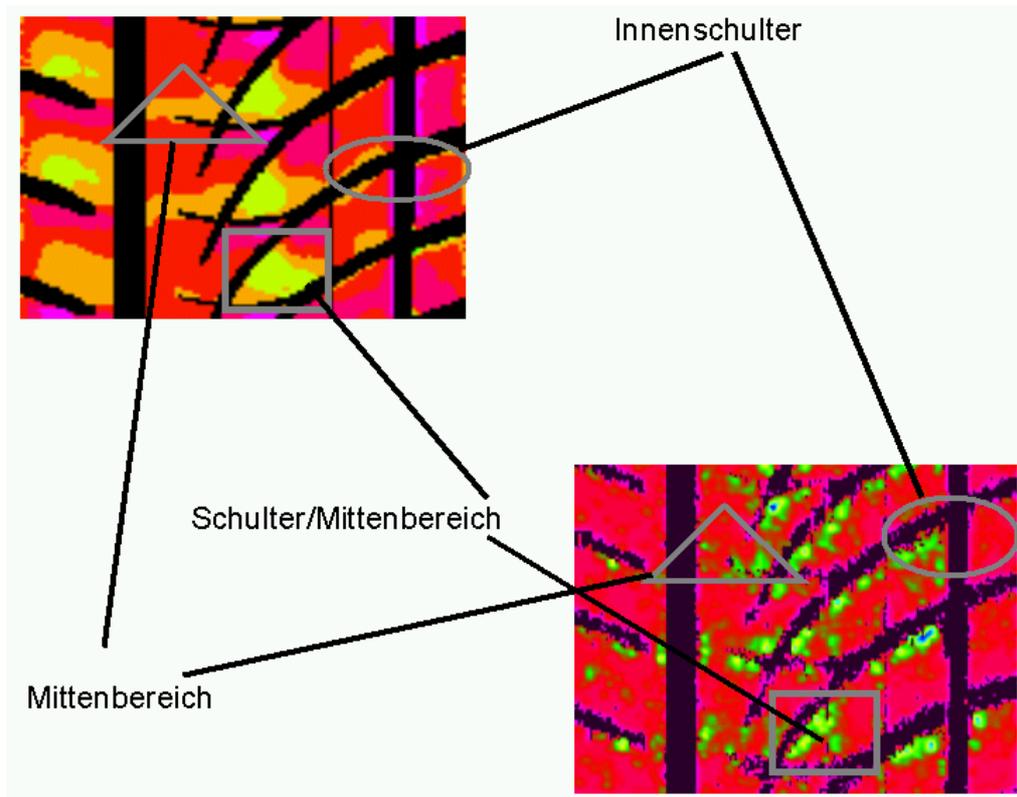


Abbildung 7.18: Detailbetrachtung der Abriebsergebnisse von Reifen 2

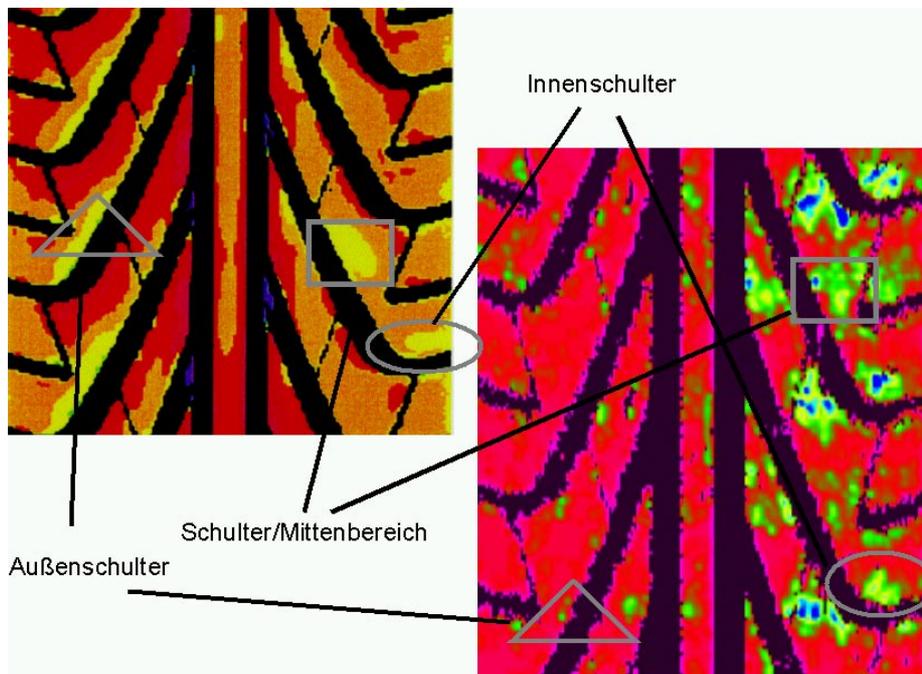


Abbildung 7.19: Detailbetrachtung der Abriebsergebnisse von Reifen 3

7.6 Untersuchung der Ursachen für den unregelmäßigen Abrieb

Ziel der Messung ist es jedoch nicht, die Abriebsergebnisse nachzustellen, sondern die Ursachen für den unregelmäßigen Abrieb zu identifizieren. Erste Untersuchungen zeigen bei der Betrachtung der Einlauf- und Auslaufkontur der Bodenaufstandsfläche, dass diese auf dem Abriebsbild wiedergefunden werden können. In den folgenden Darstellungen stellen die hellen Konturlinien die Auslaufkontur und die dunklen Konturlinien die Einlaufkontur dar. Die hellen und dunklen Kreise sind die Regionen, in denen die Konturlinie auf dem Abriebsbild wiedergefunden werden konnte (Abbildungen 7.20, 7.21, 7.22).

Diese Beobachtung, dass Einlauf und Auslaufkontur einen wesentlichen Einfluss auf das Abriebsverhalten haben, lässt sich auch mit den Bewegungsmessungen aus Kapitel 7.2 belegen, wo nur Relativbewegungen im Einlauf- und Auslaufbereich gefunden werden konnten.

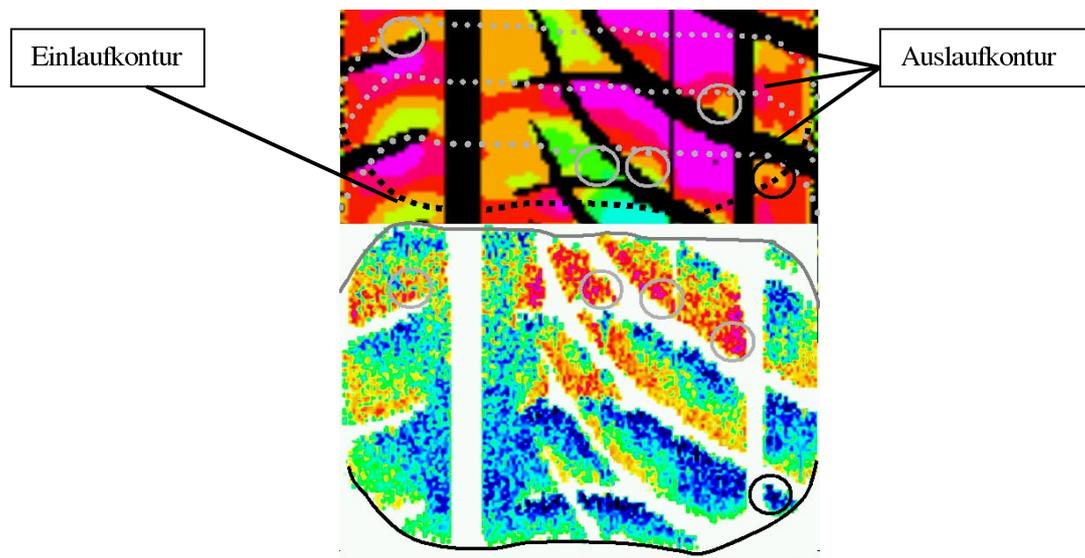


Abbildung 7.20: Projektion der Einlauf- und Auslaufkontur (hier von der Längsspannungsverteilung von Reifen 1) auf einen Ausschnitt der Abriebsergebnisse von Reifen 1 (dunkel Einlaufkontur / hell Auslaufkontur)

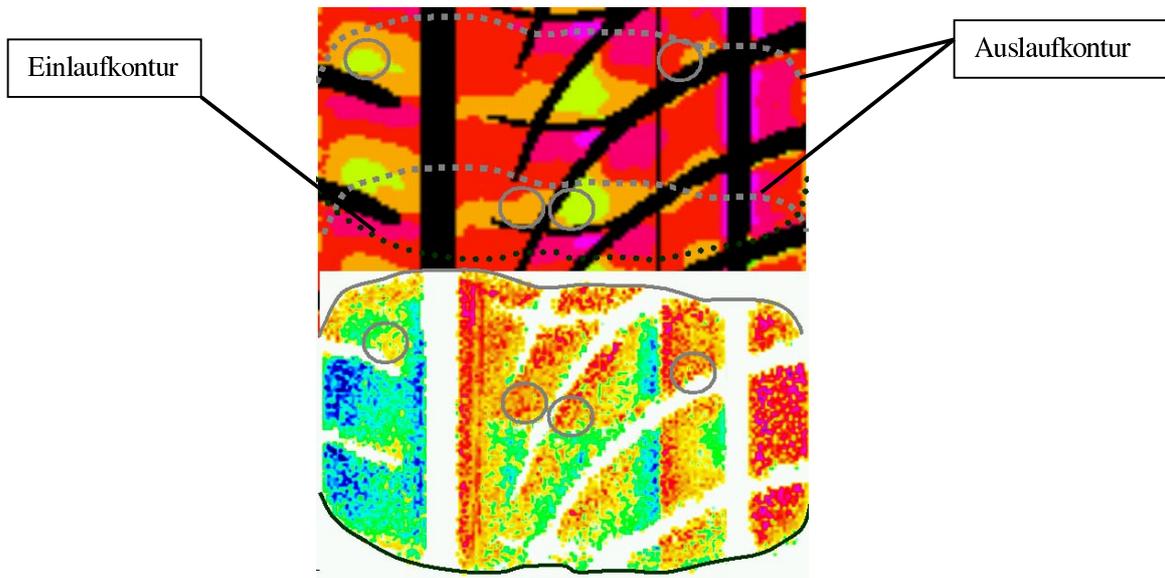


Abbildung 7.21: Projektion der Einlauf- und Auslaufkontur (hier von der Querspannungsverteilung von Reifen 2) auf einen Ausschnitt der Abriebsergebnisse von Reifen 2 (dunkel Einlaufkontur / hell Auslaufkontur)

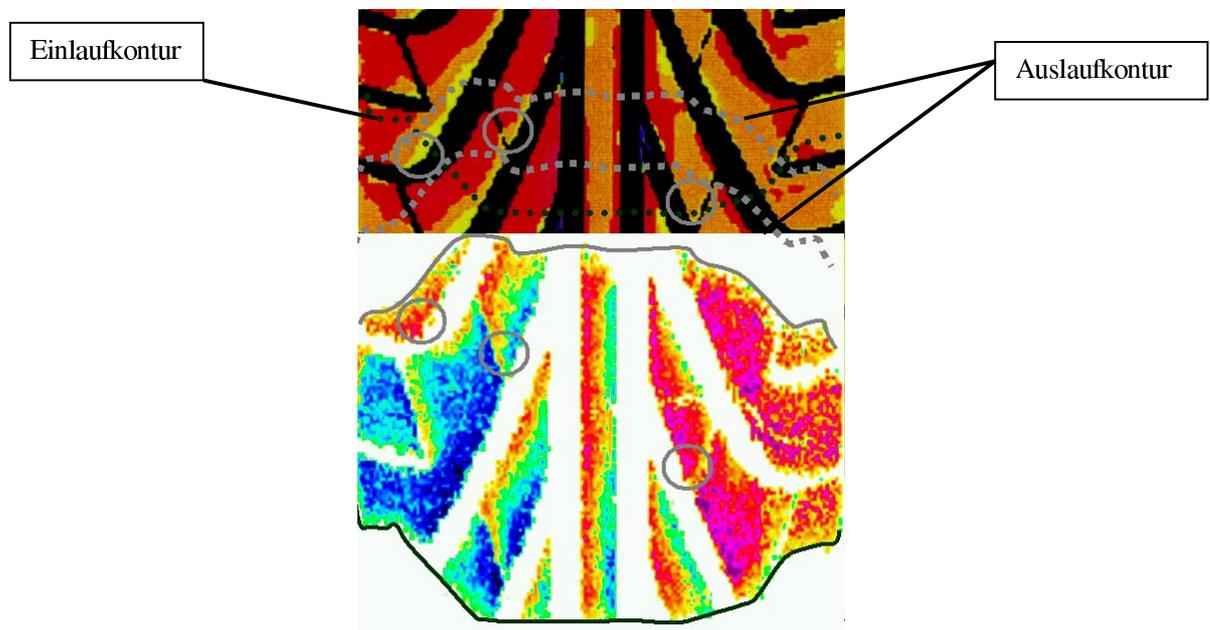


Abbildung 7.22: Projektion der Einlauf- und Auslaufkontur (hier von der Querspannungsverteilung von Reifen 3) auf einen Ausschnitt der Abriebsergebnisse von Reifen 3 (dunkel Einlaufkontur / hell Auslaufkontur)

7.7 Zusammenfassung der Validierung

Insgesamt kann man das Ergebnis der Validierung wie folgt zusammenfassen:

Die Kraftmessungen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Trommelprüfstandsergebnissen und den Messungen bei Smithers. Die Abweichungen, insbesondere bei der Bodendruckverteilung und der Längsspannungsverteilung, liegen im Rahmen der eingeschränkten Erwartungen, die aus den unterschiedlichen Krümmungen der Messoberflächen und den unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten resultieren.

Bei den Schlupfmessungen entspricht die Übereinstimmung -ähnlich wie bei den Längsspannungsmessungen- den Erwartungen.

Der Vergleich der Maschinenabriebsergebnisse mit den Abriebsenergien zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der verschiedenen Messungen. In diesen Fällen zeigte sich, dass die Ursache für die unterschiedlichen Abriebsbilder der Reifen 1, 2 und 3 in der Einlauf- und Auslaufkontur begründet liegen.

8. Untersuchung der Fahrwerkseinflussgrößen

Die Fahrwerkseinflussgrößen für die Hinterachse sind im Wesentlichen die Sturz- und Schräglaufwinkeleinstellung. Diese Einstellungen haben einen Einfluss auf das Fahrverhalten, aber auch auf den Reifenabrieb.

Um den Einfluss auf den unregelmäßigen Reifenabrieb näher zu untersuchen, wurde im Folgenden ein Kennfeld ermittelt aus dem zu ersehen ist, welche Abriebsformen zu erwarten sind. Darüber hinaus soll identifiziert werden, durch welche Mechanismen das jeweilige Abriebsbild verursacht wird. Im Unterschied zu den bereits durchgeführten Untersuchungen ist es hier möglich, die unterschiedlichen Parameter mit dem gleichen Reifen zu untersuchen. Dies ist bei einem Abriebstest nicht möglich. Somit spielen in dieser Betrachtung beispielsweise die Produktionsschwankungen keine Rolle.

8.1 Versuchsprogramm

Für die Ermittlung des Kennfeldes wurde ein Reifen der Dimension 225/40 R18 herangezogen. Diese Dimension wurde gewählt, da der Trend in der Fahrzeugindustrie dahin geht, immer breitere Reifen auf den Fahrzeugen zu verbauen. Dadurch kommen bis dahin ungewöhnliche Reifendimensionen als Serienbereifung auf neue Fahrzeuge. Aus diesem Grund existieren in diesem Bereich zur Zeit noch wenige Grundsatzuntersuchungen über den Einfluss von Schräglauf und Sturz auf das Reifenverhalten oder den Abrieb.

Die physikalischen Zusammenhänge sind hier auch anders als bei klassischen S und T Reifen, zum Beispiel in der Dimension 175/70 R13, die eine schmale lange Kontaktfläche aufweisen im Gegensatz zu den sogenannten Breitreifen, die eine breite und kurze Kontaktfläche haben.

Grundlage bildet in dieser Untersuchung die Standardbedingung des vorherigen Programmes (0.2° Schräglaufwinkel / -1.5° Sturz). Variiert werden der Schräglaufwinkel und der Sturz in einem noch realistischen Rahmen für eine Fahrzeugauslegung (0° , 0.2° , 0.4° Schräglaufwinkel und 0° , -1.5° , -3.0° Sturz).

Versuchsbedingungen:

Radlast:	302 daN
Luftdruck:	2.3 bar
Geschwindigkeit:	60 km/h
Schräglaufwinkel:	0° - 0.4°
Sturzwinkel:	0° - -3°

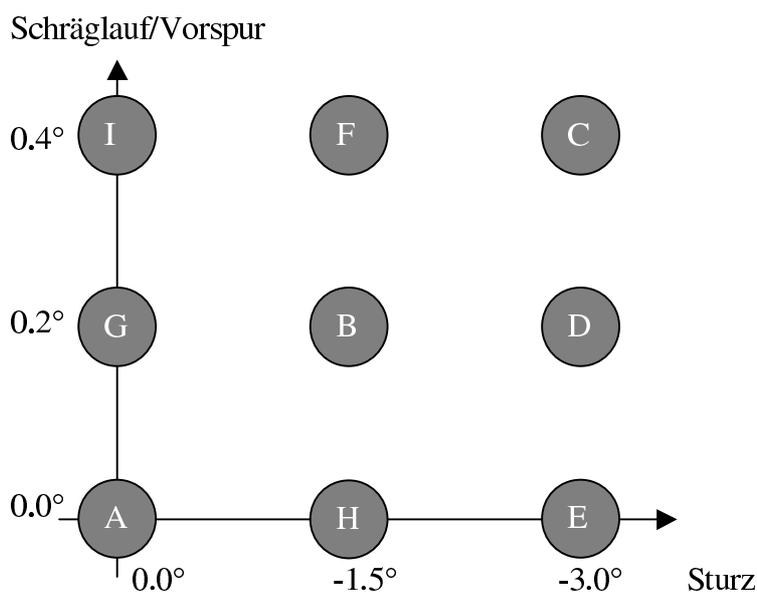


Abbildung 8.1: Betrachtetes Kennfeld

In Abbildung 8.1 ist die Variation des Sturzes und Schräglaufes in einem Kennfeld zu sehen (positiver Schräglauf entspricht einer positiven Vorspur beim Fahrzeug). Die im Folgenden betrachteten Bilder sind in diesem Format dargestellt, so dass die Position unten links immer die 0° Bedingungen und die Position oben rechts immer die 0,4° Schräglauf und -3,0° Sturz Bedingung zeigen.

8.2 Abriebsprognosen

Mit Hilfe des in Kapitel 7 validierten Abriebsmodells wurden hier nun die Abriebsprognosen aus den Kraftmessungen berechnet. Diese sind in Abbildung 8.2 dargestellt, wobei in der Darstellung die unterschiedlichen Sturz- und Schräglaufbedingungen für die Abriebsbilder -entsprechend der Darstellung in Abbildung 8.1- angeordnet sind. Die gezeigten Ausschnitte der Abriebsbilder, sind jeweils an der gleichen Stelle des Reifens gemessen worden.

Hierbei zeigt sich nun, dass die Erhöhung des Sturzwinkels bei konstant gehaltenem Schräglaufwinkel von 0° nur zu einem Anstieg des Schulterabriebs führt und zwar erhöht sich von 0° nach -3° der Schulterabrieb auf der Innenseite. Auf den restlichen Blöcken kann kein Unterschied im Abrieb entdeckt werden. Dabei erhöht sich die Abriebsenergie des gesamten Blockes. Somit ist auch im Schulterbereich kein Anstieg der Unregelmäßigkeiten zu erwarten. Ein Effekt könnte sein, dass ein Anstieg des Sturzes zu einem insgesamt erhöhten Schulterabrieb führen kann.

Die Erhöhung des Schräglaufwinkels bei 0° Sturz hingegen führt zu einem Anstieg der Unterschiede von Innenschulter zur Außenschulter. Dies lässt mit steigendem Schräglaufwinkel auf ein unregelmäßigeres Abriebsbild schließen.

Bei einem konstanten Sturz von -1,5° wirkt sich ein Schräglaufwinkel von 0,2° im Bezug auf die Unregelmäßigkeiten noch nicht so stark aus. Erst bei einem Schräglaufwinkel von

0.4° erhöhen sich die Unterschiede der Abriebsenergien auf den einzelnen Blöcken, was auf eine Erhöhung des unregelmäßigen Abriebs schließen lässt (siehe mittlerer Bereich). Variiert man den Schräglaufwinkel bei einem Sturz von -3°, erhöht sich mit dem Anstieg des Schräglaufwinkels der Schulterabrieb. Die Unregelmäßigkeiten steigen jedoch bei einem Sturz von -3° und einem Schräglaufwinkel von 0.2° an, um sich dann bei 0.4° Schräglaufwinkel wiederum zu reduzieren (siehe mittlerer Bereich).

Insgesamt zeigt sich, dass es ein optimales Sturz/Schräglaufverhältnis von -1.5°/0.2° gibt und auch bei einem Sturz/Schräglaufverhältnis von -3°/0.4° weniger Unregelmäßigkeiten zu erwarten sind als bei den benachbarten Sturz/Schräglaufverhältnissen. Dies kann einerseits bedeuten, dass die Reifen -da Sturz und Schräglauf immer auf der Hinterachse von Fahrzeugen zur Spurstabilität benötigt werden- im Laufe der Zeit in diese Richtung optimiert worden sind oder dieses Verhältnis einen optimalen Punkt in dem Kennfeld darstellt, bei dem der Schräglaufeffekt durch den Sturzeffekt kompensiert wird.

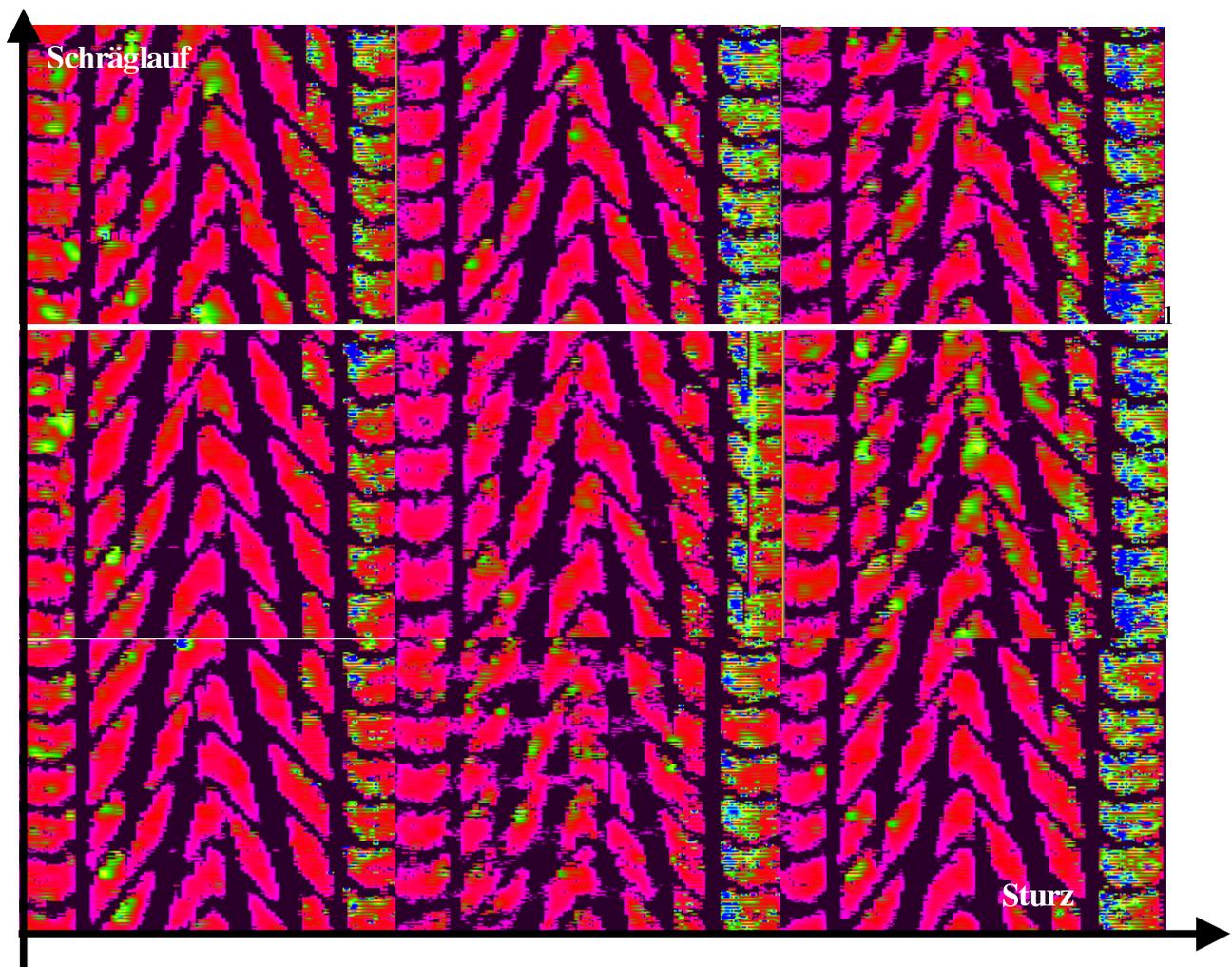


Abbildung 8.2: Kennfeld: Abriebsprognosen/ Abriebsenergie unter verschiedenen Schräglauf (von unten nach oben steigend) / Sturzwinkeln (von links nach rechts steigend) (rechts ist die Innenseite und links ist die Außenseite des Reifens)

8.3 Ursachen für die unterschiedlichen Abriebsbilder

Sinn und Zweck ist nicht die Vorhersage der Abriebsbilder, sondern die Untersuchung der Ursachen für das unterschiedliche Verhalten des Reifens bei unterschiedlichen Fahrzeugbedingungen.

Für die Betrachtung der Ursachen der gefundenen Abriebsphänomene werden die unterschiedlichen Footprints, die Druckverteilungen, die Tangentialspannungsverteilungen und die Reibwertverteilungen herangezogen.

Footprintform

Die Footprintform lässt sich am Besten an den Druckverteilungsbildern in der Abbildung 8.3 erkennen. Mit zunehmendem Sturz verlängert sich die Bodenaufstandsfläche auf der Innenseite (rechts) und verkleinert sich die Bodenaufstandslänge auf der Außenseite (links). Ein gegenteiliger Effekt ist mit zunehmendem Schräglaufwinkel zu beobachten; dort nimmt die Länge der Innenseite ab und es verlängert sich die Außenseite. Bei einer Änderung mit gleichem Betrag ist der Schräglaufwinkleinfluss bedeutend größer als der Sturzeinfluss. In dem Sturz /Schräglaufverhältnis -1.5° Sturz und 0.2° Schräglauf ist keine wesentliche Änderung gegenüber der 0° Bedingung zu beobachten.

Die Verlängerung des Footprint auf der Innenseite durch den Sturz kann ein Indiz für eine erhöhte Abriebsrate auf der Innenseite sein, da unterschiedliche Längen in der Bodenaufstandsfläche zu einer unterschiedlichen Verspannung des Reifens führen, die eine erhöhte Abriebsrate auf der Innenseite zur Folge haben kann. Das Entsprechende in der anderen Richtung gilt auch für die Verlängerung des Footprints auf der Außenseite durch den Schräglauf. Dieser Effekt deutet sich hier an und ist bei größeren Schräglaufwinkeln deutlicher zu erkennen. Da sich hingegen bei dem Sturz/Schräglaufverhältnis $-1.5^\circ/0.2^\circ$ nur eine unwesentliche Änderung gegenüber der 0° Bedingung ergibt, kann dies auch ein Hinweis auf das gleiche Abriebsverhalten bei beiden Bedingungen sein.

Druckverteilung

Die Normaldruckverteilung des Reifens bei unterschiedlichen Bedingungen ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Sie zeigt, dass der Druck im Einlauf (in der Abbildung unten) größer ist als im Auslauf, was bei gleichen Quer- und Längskräften vermuten lässt, dass der Einlaufbereich insgesamt eher unkritischer als der Auslaufbereich ist.

Mit steigendem Sturz bei konstantem Schräglaufwinkel ist ein Anstieg des Innenschulterdruckes zu beobachten. Insgesamt erhöht sich durch den Anstieg des Schräglaufes bei konstantem Sturz die Fläche auf der Außenseite und dabei geht die Höhe der Flächenpressung zurück. Die Druckverteilung bei dem Sturz/Schräglaufverhältnis $-1.5^\circ/0.2^\circ$ zeigt wiederum nur eine unwesentliche Änderung gegenüber der 0° Bedingung.

Eine Verringerung der Flächenpressung bei konstantem Quer- und Längskräften würde zu einem erhöhten Reibwert und damit zu mehr Abrieb führen. Da sich bei den Standardbedingungen wiederum keine wesentliche Änderung zur 0° Bedingung zeigt, ist dies ein Indiz für das gute Abriebsverhalten.

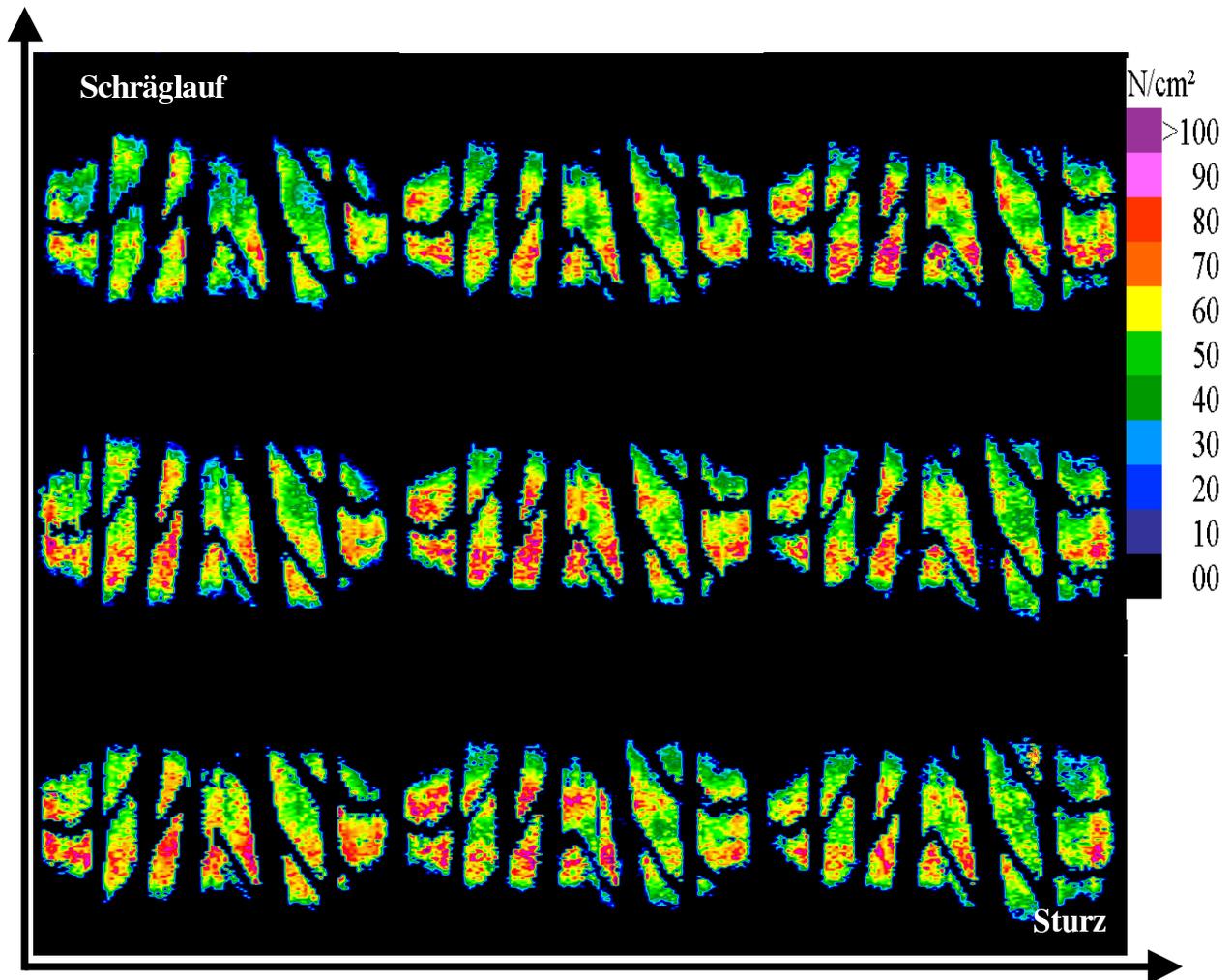


Abbildung 8.3: Kennfeld: Bodendruckverteilung

Längsspannungsverteilung

Die Unterschiede der Längsspannungsverteilung sind in Abbildung 8.4 zu sehen. Sie entstehen hauptsächlich aus der Veränderung der Geometrie der Bodenaufstandsfläche durch den Schräglauf und/oder den Sturz. So ist -entsprechend wie bei der Bodenaufstandsflächenform durch den Anstieg des Sturzes bei konstantem Schräglauf- eine Erhöhung der Vorspannung auf der Innenseite zu beobachten. Dieses Verhalten liegt in den unterschiedlichen Abrolllängen, die zu einer Verspannung des Footprints auf der Innenseite und damit zu einer Erhöhung der Unterschiede in der Längsspannungsverteilung führen, begründet. Entsprechend ist das Ganze auch auf der Außenseite zu beobachten, an der die Geometrieänderung durch die Erhöhung des Schräglaufwinkels zu einer Erhöhung der Unterschiede in der Längsspannungsverteilung führt.

Nur bei der Standardbedingung (-1.5° Sturz und 0.2° Schräglauf) ist durch die geringe Änderung der Form auch nur eine leicht veränderte Längsspannungsverteilung zu beobachten. Dies sind wiederum Hinweise auf die Unterschiede bei den Abriebsbildern.

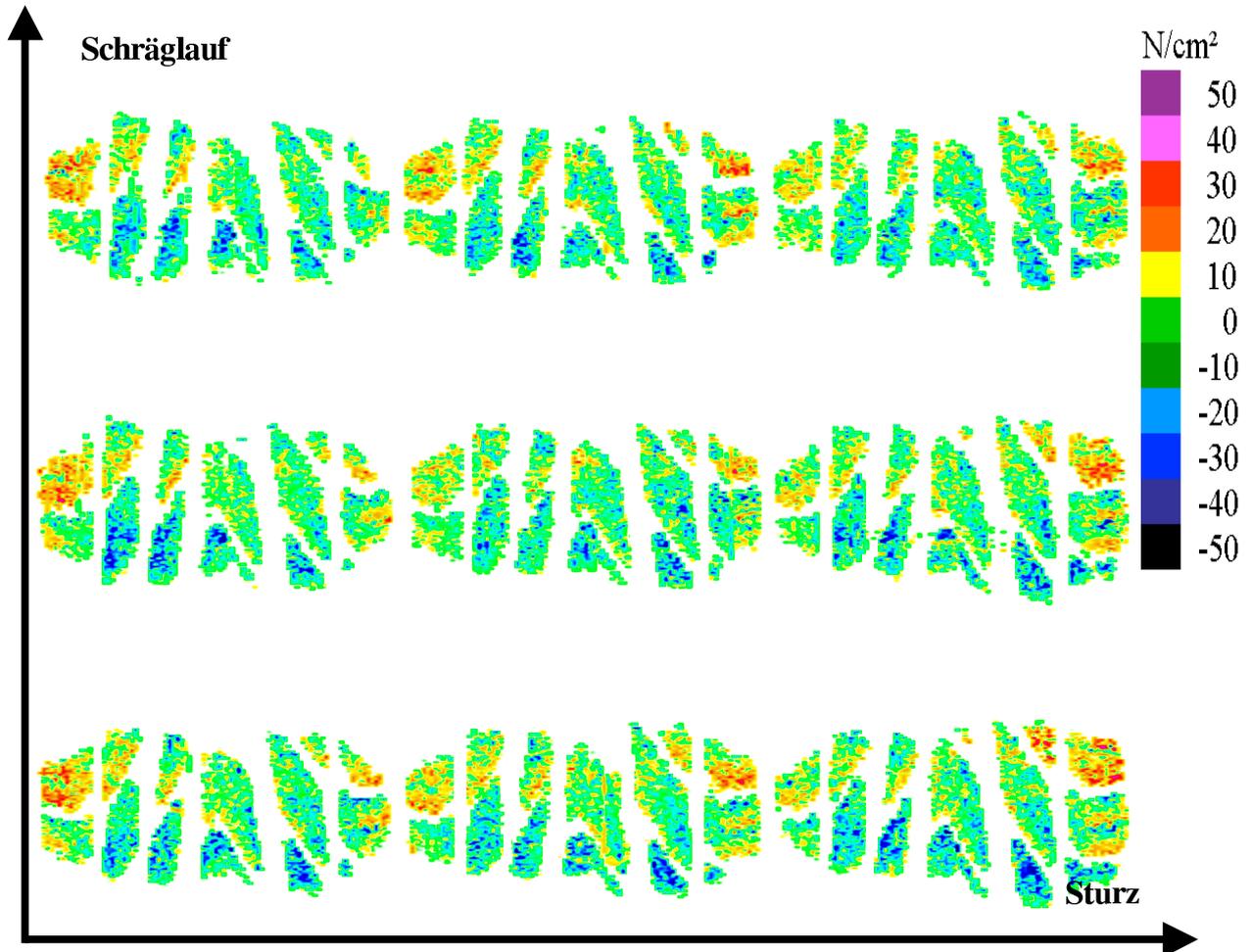


Abbildung 8.4: Kennfeld: Längsspannungsverteilung

Querspannungsverteilung

Ein höherer Schräglaufwinkel führt zu einer Erhöhung der Seitenkraft oder Querkraft. Diese muss auch in der Bodenaufstandsfläche wieder gefunden werden. Das heißt je höher der Schräglaufwinkel, desto höher die Querspannungen in der Bodenaufstandsfläche. Diese Erhöhung lässt sich insbesondere in Abbildung 8.5 an den Blockaußenkanten beobachten. Dabei erhöht sich die Querspannung zum Reifenauslauf hin. Durch diese unregelmäßige Verteilung entsteht ein lokales Überschreiten der Reibwerte im Auslauf; das führt abhängig von der Blockgeometrie zu teilweisen lokal begrenzten Abrieb des Blockes, und wird allgemein als unregelmäßiger Abrieb bezeichnet.

Dieses Verhalten ist insbesondere bei konstantem Sturz von 0° und ansteigendem Schräglaufwinkel zu beobachten. Aber auch bei den anderen Sturzwerten sieht man deutlich, dass mit steigendem Schräglaufwinkel die Querspannungen ansteigen. Da die Unregelmäßigkeiten im Abriebsbild nur bei Bedingungen mit Schräglaufwinkeln zu beobachten sind, liegt die Vermutung nahe, dass der Schräglaufwinkel im Zusammenspiel mit der Kontur und der Blockgeometrie die hauptsächliche Ursache für das unregelmäßige Abriebsbild darstellt.

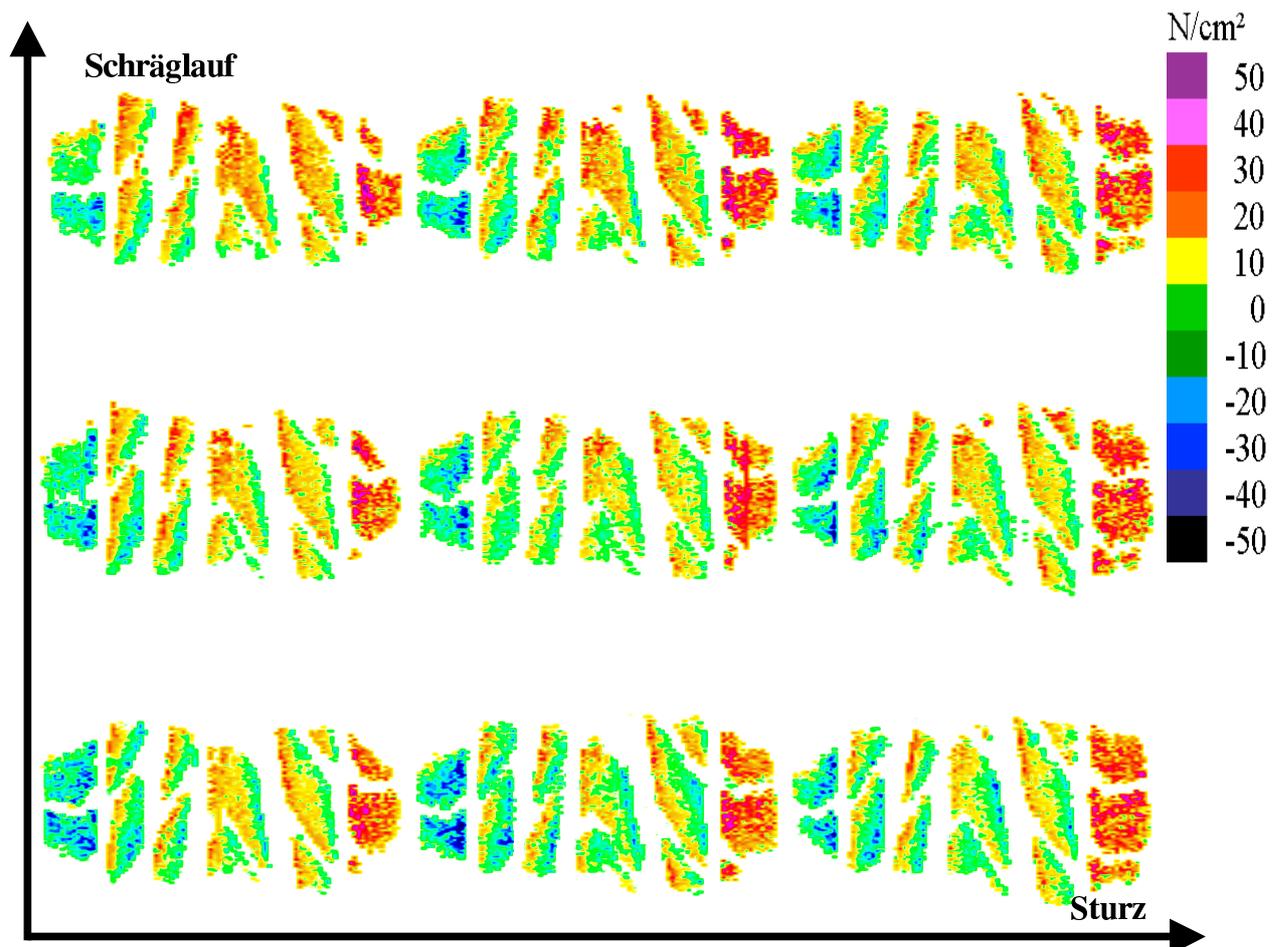


Abbildung 8.5: Kennfeld: Querspannungsverteilung

Reibwert

In Abbildung 8.6 ist die Reibwertverteilung dargestellt. Diese Darstellung ist die Zusammenfassung aus den drei vorherigen Darstellungen (Abbildung 8.3, 8.4 und 8.5). Die Reibwertspitzen sind vornehmlich im Auslaufbereich zu beobachten. Die Reibwertspitzen auf dem Innenschulterbereich zeigen einen eher gleichmäßigen Verlauf, dies lässt zwar auf einen erhöhten, aber nicht unbedingt auf einen unregelmäßigen Abrieb schließen. Reibwerterhöhungen zeigen sich insbesondere an Profilblöcken, bei denen der größte Teil schon ausgelaufen ist, jedoch zeigen sich auch Spitzen an den Blockkanten,

insbesondere bei Bedingungen mit hohen Schräglaufwinkeln, aus denen hohe Querkräfte resultieren. Um alle Effekte genauer zeigen zu können, müsste man mehrere Bilder im Durchlauf hintereinander betrachten, was im Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich ist. Dadurch würde die Aussagekraft der Reibwertbilder erhöht, da sich die Reibwerte insbesondere in der Ein- und Auslaufzone profilblockbezogen ändern, d.h. dass die Reibwerte insbesondere dann besonders hoch sind, wenn sich nur geringe Anteile des jeweiligen Profilblocks im Kontakt befinden.

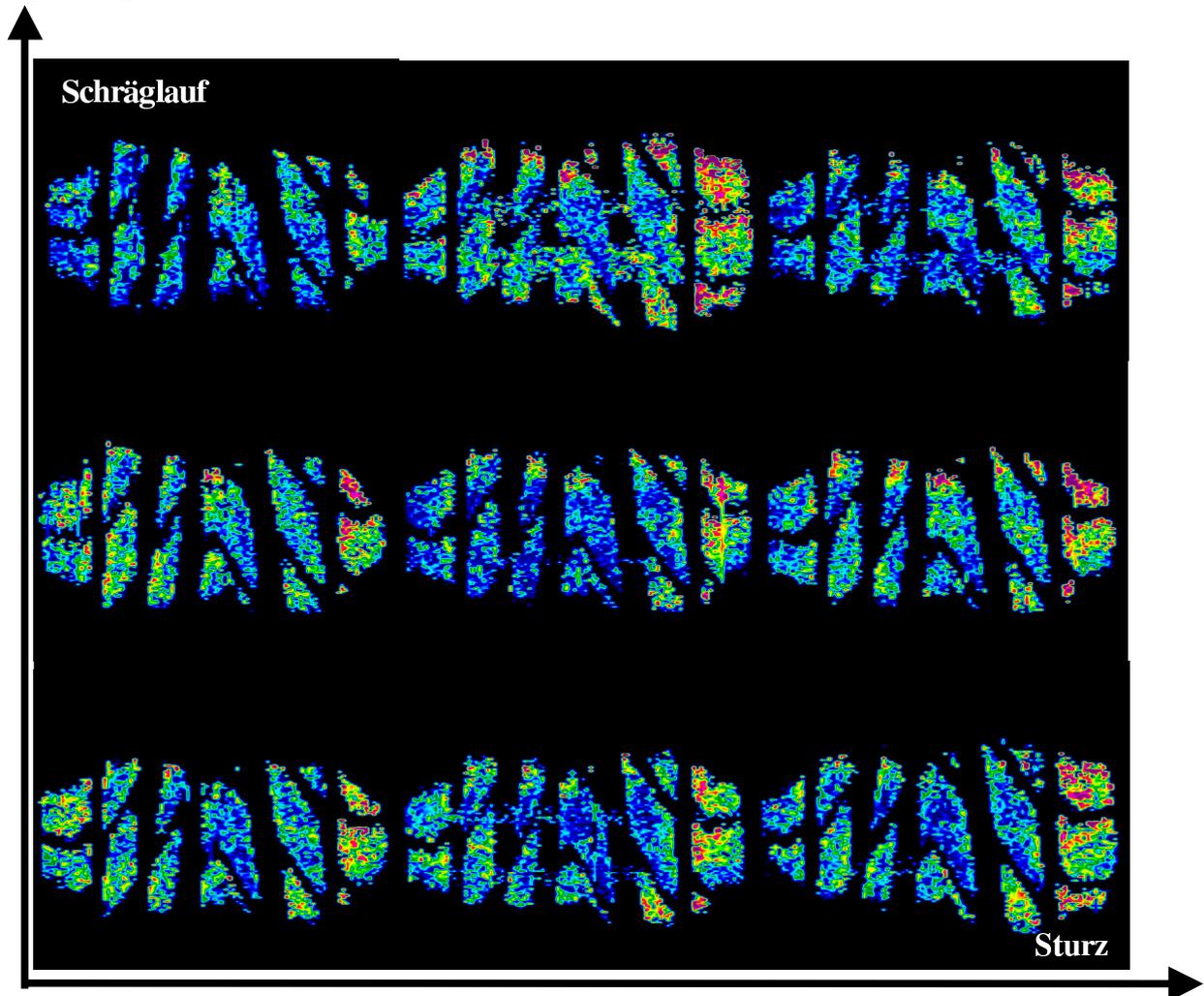


Abbildung 8.6: Kennfeld: Reibwertverteilung (rot = hohe / blau = geringe Reibwerte)

Zusammenfassung

Die Ursachen für die unterschiedlichen unregelmäßigen Abriebsbilder liegen vornehmlich in den Effekten, die durch Sturz und Schräglauf bedingt sind. Der Sturz bedingt dabei eine Vergrößerung der Kontaktfläche der Innenschulter und der Schräglauf eine Vergrößerung der Kontaktfläche der Außenschulter.

Der Sturz alleine betrachtet führt zu einer vergrößerten Fläche im Bereich der Innenschulter, dadurch vergrößert sich die Fläche insgesamt. Dies führt zu einer

Verringerung der Druckspitzen. Bei gleichbleibenden Spannungen führt dies zu einem höheren örtlichen Reibwert und somit zu einem höheren Abrieb. Darüber hinaus erhöht sich durch die Vergrößerung der Fläche im Innenschulterbereich die Längsspannungen in diesem Bereich, was ebenfalls zu einem erhöhten Abrieb führt. Die Querspannungsverteilung ändert sich durch die Variation des Sturzes nicht. Diese Effekte sind nicht so groß, dass sich das unregelmäßige Abriebsbild vergrößert, jedoch ändert sich der Gesamtabrieb im Innenschulterbereich, was auch den Beobachtungen aus dem Abriebsbild entspricht.

Der Schräglauf für sich betrachtet führt zu einer vergrößerten Fläche im Bereich der Außenschulter. Dadurch vergrößert sich wiederum die Fläche insgesamt was eine Verringerung der Druckspitzen wie beim Sturz zur Folge hat. Bei gleichbleibenden Spannungen führt dies zu einem ebenfalls höheren Abrieb. Zusätzlich treten durch die Vergrößerung im Außenschulterbereich auch höhere Längsspannungen in diesem Bereich auf, wodurch zusätzlicher Abrieb entsteht. Hauptanteil an der Entstehung des erhöhten unregelmäßigen Abriebs haben die Querspannungen, die durch den Schräglauf des Reifens hervorgerufen werden. Diese Querspannungen überlagern sich zu den schon vorhandenen Querspannungen, die aus der Strukturseitenkraft resultieren, und führen insbesondere an den Blockkanten im Mittenbereich zur Überschreitung des kritischen Reibwertes. Daraus erfolgt wiederum ein erhöhter Abrieb an den Blockkanten, der unregelmäßige Abrieb. D. h., den Effekten, die bei der Variation des Schräglaufwinkels und konstantem Sturz von 0° beim Abriebsbild ersichtlich werden, können auch Ursachen zugeordnet werden. Insgesamt ist der Schräglaufeinfluss auf das unregelmäßige Abriebsbild bedeutend größer als der Sturzeinfluss, da zur Änderung der Fläche, die bei Sturz und Schräglauf entsteht, zusätzlich eine Zunahme der Querkraft in der Bodenaufstandsfläche entsteht, die bei den Sturzvarianten wesentlich geringer ist.

Die Überlagerung von Schräglauf und Sturz führt bei optimaler Abstimmung, beispielsweise bei 1.5° Sturz und 0.2° Schräglauf, zu einer geringfügigen Veränderung der Bodenaufstandsfläche gegenüber der 0° Bedingung. Damit wird auch die Bodendruckverteilung auf einem hohen Niveau gehalten und es treten keine zusätzlichen Längsspannungen auf. Dies hat zur Folge, dass es zu fast keiner Steigerung der Unregelmäßigkeiten im Abriebsbild kommt.

Bei den anderen Bedingungen ist entweder der Sturz- oder Schräglaufeinfluss der beherrschende Faktor. Daraus resultiert ein entsprechendes Abriebsbild.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dem Sturz-, Schräglaufwinkel, Last, Luftdruck, Geschwindigkeit und Antriebs- beziehungsweise Bremsmoment des Reifens variiert werden können. Der Prüfstand verfügt über eine Messtechnik, mit der Kräfte in allen 3 Raumrichtungen mit einer Auflösung von $< 1 \text{ mm}^2$ und Bewegungen in der gleichen Auflösung in der Bodenaufstandsfläche bei realen Geschwindigkeiten erfasst werden können. Mit den erfassten Daten kann die Spannungs- und Bewegungsverteilung in der Kontaktfläche eines Reifens während einer kompletten Radumdrehung ermittelt werden.

Durch die Erfassung der Bewegungen und der Kräfte in der Bodenaufstandsfläche mit sehr hohen Auflösungen können bei Reifen völlig neue physikalische Zusammenhänge untersucht werden. Die Ermittlung von der Kraft- und Bewegungsverteilung des gesamten Reifens mit einer Auflösung kleiner 1 mm^2 ermöglicht die Detailbetrachtung auf Profilblöcken und damit die Identifizierung von kleinsten Störstellen am Reifen.

Probleme bereitet zur Zeit das Reifengeräusch, da die Messsensorik so empfindlich ist, dass das Reifengeräusch durch die Kraftsensoren erfasst wird. Dadurch überlagert das Reifengeräusch die 3 Komponenten-Kraftmessung. Um die Messungen dennoch durchführen zu können, wurde die Prüfgeschwindigkeit auf 50 bis 60 km/h reduziert, da in diesem Bereich das Reifengeräusch noch keine störende Rolle spielt.

Bei den Schlupfmessungen beschränkt die Lichtintensität der Linienlaser die Prüfgeschwindigkeit auf 30 km/h. Hier bietet die Messanordnung zur Zeit noch keine ausreichende Genauigkeit in der Reifenpositionsermittlung, die eine Zuordnung der Messwerte zu den einzelnen Elementen der Kontaktfläche ermöglichen soll. Aus diesem Grund konnte noch keine Auswertung der Querbewegungen erfolgen.

Zur Validierung des Prüfstandes wurden die Messwerte des in dieser Arbeit erstellten Prüfstandes mit Messwerten des Flachbahnprüfstandes der Firma Smithers verglichen. Die Kraft- und Bewegungsmessungen zeigen hierbei eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen auf dem Trommelprüfstand und den Messungen auf dem Flachbahnprüfstand.

Zusätzlich wurden die Untersuchungen mit dem Schwerpunkt auf der Ermittlung von unregelmäßigen Abriebsphänomenen durchgeführt. Aus diesem Grund wurden die gleichen Prüfstandsbedingungen beim Maschinenabriebstest und den Messungen auf dem Trommelprüfstand gewählt. Bei der Validierung der Abriebsergebnisse zeigt sich, dass das Maschinenabriebsergebnis und die Vorhersage der Abriebsergebnisse mit Hilfe der Daten der 3 Komponenten Kraftmessung eine gute Übereinstimmung haben. Nur die Abriebsphänomene auf der Außenschulter können mit diesem Verfahren nicht vorausgesagt werden. Zieht man jedoch noch die Bewegungsmessungen in Längsrichtung hinzu, lassen sich auch Angaben über den Abrieb auf der Außenschulter machen.

Bei der Ursachenbetrachtung erkennt man, dass die dynamische Kontur einen großen Einfluss auf unregelmäßigen Abrieb bei Reifen hat. Blöcke, die beim Einlauf oder Auslauf beispielsweise spitz ein- oder auslaufen, sind im höchsten Maße, abriebsgefährdet. Hier finden sich auch die höchsten Abriebsenergien.

Bei der Betrachtung der Abriebshöhenverläufe auf den Reifen lassen sich die Ein- und Auslaufkontur wiederfinden.

Eine erste Untersuchung zu unterschiedlichen Fahrwerkseinstellungen zeigt den Einfluss von Sturz und Schräglauf auf das Abriebsverhalten von Reifen. Bei diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass verschiedene Sturz- und Schräglaufvarianten einen unterschiedlichen Abrieb hervorrufen. Der Grund hierfür liegt in der andersartigen Druck- und Querkraftverteilung bei den jeweiligen Zuständen, die sich dann in verschiedenen örtlichen Reibwerten dokumentieren.

9.2 Ausblick

In nächster Zeit sollte die Messsensorik beziehungsweise der Messaufbau weiter optimiert werden, so dass auch Messungen über 60 / 30 km/h möglich sind. Bei den 3 Komponenten Kraftmessungen kann durch geräuschkämmende Maßnahmen das Reifengeräusch reduziert werden, so dass die Messungen auch bei 120 km/h erfolgen können, wodurch auch die Messzeit erheblich reduziert wird. Bei den Bewegungsmessungen wird im ersten Schritt die Zuordnung zu der Reifenposition realisiert und dann mit stärkeren Lasern eine Geschwindigkeitserhöhung angestrebt.

In Zukunft sollte diese Prüfeinrichtung noch durch eine Thermographiezeilenkamera ergänzt werden, welche eine Betrachtung der Temperaturverläufe in der Bodenaufstandsfläche ermöglicht. Dadurch würde es dann möglich sein, die gesamten Abhängigkeiten des Reibwertes von Gummi (Temperatur, Gleitschlupfgeschwindigkeit und Druck) mit diesem Prüfstand zu ermitteln und eine noch exaktere Vorhersage des ungleichmäßigen Abriebs zu erzielen. Darüber hinaus kann erwartet werden, dass noch nicht identifizierte Gründe für unregelmäßigen Abrieb aufgedeckt werden.

Die Analyse des unregelmäßigen Abriebs ist nur eine mögliche Untersuchungsform auf diesem Prüfstand. Da Messungen auch unter Antriebs- und Bremsmoment durchgeführt werden können, besteht desweiteren auch die Möglichkeit, Abriebsphänomene auf der Antriebsachse zu untersuchen.

10. Verwendete Formelzeichen

E_r	Reibenergie
E	Elastizitätsmodul
F	Reibkraft
F_{ad}	Reibkraft aus Adhäsionsreibung
F_{hy}	Reibkraft aus Hysteresereibung
F_{ko}	Reibkraft aus Kohäsionsreibung
F_{vi}	Reibkraft aus viskoser Reibung
F_n	Vertikalkraft / Normalkraft
F_q	Seitenkraft / Querkraft
F_u	Umfangskraft / Längskraft
F_v	Vertikalkraft / Normalkraft
F_z	Vertikalkraft / Normalkraft
n	Exponentieller Faktor zur Berücksichtigung der Oberflächentopologie
P	Druck
S_q	Querschlupf
S_u	Umfangsschlupf
t	Zeit
W_{abrieb}	Abriebsenergie über approximierte Formel
X,x	Koordinate in Umfangsrichtung des Reifens
Y,y	Koordinate in Querrichtung des Reifens
Z,z	Koordinate in Belastungsrichtung des Reifens
μ	Reibwert
μ_0	Reibwert beim Ausgangsdruck P_0

11. Literaturverzeichnis

- [Anon-96] Anon: Tire footprint behaviour during dynamometer testing. Aerospace Engineering (Warrendale, Pennsylvania) Volume 16 Number 4 April 1996, S. 11 ff.
- [Arca-85] Arcan M., Brull M. A., Kvatinsky C.: Application of the contact pressure display(CPC) method to tire mechanics, Society of Automotive Engineers Technical Paper No. 851627, 1985
- [Bach-96] Bachmann T.: Literaturrecherche zum Reinwert zwischen Reifen und Fahrbahn, Fortschr.-Ber., VDI Reihe 12 Nr. 286
- [Beer- 96] de Beer M.: Measurement of tyre/pavement interface stresses under moving wheel loads, Heavy Vehicle Systems, Special Issue, Volume 3, Number 1-4, 1996, S. 97 ff.
- [Berg-77] Bergman W.: Critical review of the state-of-the-art in the tire force and moment measurements, Society of Automotive Engineers Technical Paper No. 770331, 1977
- [Bode-62] Bode G.: Kräfte und Bewegungen unter rollenden Lastwagenreifen, ATZ 64, Nummer 10, 1962, S. 300 ff.
- [Clar-82] Clark, S. K.: Mechanics of Pneumatic Tire. U.S. Department of Transportation, Washington D.C., U.S. Government printing Office, 1982
- [Eloy-89] Eloy X.: Analysis of the causes of irregular wear of tyres, Investigation Methods, SAE-Paper, Number 890088, 1989, S. 97 ff.
- [Fink-82] Fink J.: Beitrag zur Untersuchung des Kraftschlusses von Gummi auf vereisten Oberflächen. Dissertation 1982, TU München
- [Gerr-75] Gerresheim, M.: Experimenteller und theoretischer Beitrag zu Fragen des Reifenverhaltens. Dissertation 1975, TU München
- [Geyer-72] Geyer W.: Der Einfluß geometrischer Reibflächen-Rauhigkeitsformen auf das trockene und nasse Reibverhalten von Gummi, Automobilindustrie, I: 2/72, S. 41 ff., II: 4/72, S.39ff., 1972
- [Ginn-93] Ginn J. L., Marlowe R. L.: Road contact forces of truck tires as measured in the laboratory, Society of Automotive Engineers Technical Paper No. 670493, 1993

- [Gros-74] Grosch K. A.: The speed and temperature dependance of rubber friction and its bearing on the skid resistance of tyres. Symposium on the Physiks of Tyre Traction at General Motors Research Laboratories, October 1973, Hays D. F., Browne A. L., Plenum Press, New York, 1974
- [Gros-79] Grosch K.A.: Some factors influencing the traction of radial ply tires, 1979
- [Iwas-97] Iwase, Masanori: Measurement of tire shape using image processing, Tire Technology International, 1997, S. 40 ff.
- [Kim-00] Kim S., Kondo K., Akasaka T.: Contact Pressure Distribution of Radial Tire in Motion With Camber, Tire Science and Technology, V 28 Number 1 2000, S. 2 ff.
- [Köhn-97] Köhne S. H.: Optik zur Messung von Profilbewegungen, DE 197 30 787 C1, 1997
- [Köhn-97] Köhne S. H., Reisdorf W., Sommer J., Krutt J.: Prüfstand zur Vermessung von Profilkräften, Profilbewegungen und Reibenergien am Reifen, DE 197 04 605 C1, 1997
- [Köhn-00] Köhne S. H., Sommer J.: Messung der mechanischen und physikalischen Zusammenhänge in der Bodenaufstandsfläche von Reifen, ATZ 4/2000, S. 258 ff.
- [Kraf-54] Kraft P.: Force distribution in the contact surface between tire and runway, NACA TM 1365, Aug. 1954, S. 34 ff.
- [Kumm-66] Kummer H. W., Meyer W. E.: Skid or Slip Resistance? Journal of Materials, Vol. 1, No. 3, September 1966, S. 667 ff.
- [Kumm-67] Kummer H. W., Meyer W. E.: Verbesserter Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn – Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie, ATZ 8/1967 S. 245 ff.
- [Lind-97] Lindsley N., Medzorian J., Padovan J.: Experimental results and analysis of airkraft tire test drum, Tire Science and Technology, Volume 25 Number 1, Jan.-Mar. 1997, S. 43 ff.
- [Lipp-74] Lippmann S. A., Oblizajek K. L.: The Distribution of Stress Between the Tread and the Road for Freely Rolling Tires, Society of Automotive Engineers, 740072, 1974
- [Ludw-98] Ludwig, Dorothea: Untersuchung zur Profilelementverformung von PKW-Reifen auf realer Fahrbahn bei Geradeausfahrt unter besonderer Berücksichtigung von Verschleiß und Reibwert. Dissertation TH Darmstadt, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 12, Nr. 363 VDI Verlag Düsseldorf, 1998

- [Mark-54] Markwick A. H. D., Starks H. J. H.: Stresses between tire and road, Institute Civil Engineers 16, 1954
- [Mart-36] Martin H.: Druckverteilung in der Berührfläche zwischen Reifen und Fahrbahn, Kraftfahrtechnische Forschungsarbeiten, Band 2, Berlin 1936
- [Mart-39] Martin F.: Theoretische Untersuchungen zur Frage des Spannungszustandes im Luftreifen bei Abplattung, Jahrbuch der Luftfahrtforschung 1939
- [Meye-64] Meyer W. E., Kummer H. W.: Die Kraftübertragung zwischen Reifen und fahrbahn. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 66/9, S. 245 ff., 1964
- [Moor-75] Moore D. F.: The friction of pneumatic tires, Elsevier Scientific Company, Amsterdam 1975
- [Moor-80] Moore D. F.: Friction and wear in rubbers and tyres, Wear Volume 61 Number 2, 1980 S. 273 ff.
- [Novo-57] Novopolsky V. J., Sacharow: Verteilung des spezifischen Reifendrucks auf die Fahrbahn bei hohen Geschwindigkeiten, Arbeiten des Forschungsinstitutes für die Reifenindustrie (NIISCHP) Band 3, 1957, S. 139 ff.
- [Novo-67] Novopolsky V. J., Nepomnyaschy E. F.: The Interaction of a Motor Vehicle Tyre Tread with the Road Surface, Abrasion of Rubber, 1967, S. 347 ff.
- [Pott-99] Pottinger M. G. and McIntyre J. E.: Effect of Suspension Alignment and Modest Cornering on the Footprint Behaviour of Performance Tires and Heavy Duty Radial Tires, Tire Science and technology, TSTCA, Vol. 27, No. 3, July-September 1999, S. 128 ff.
- [Pott-99] Pottinger M. G. and McIntyre J. E.: Wear it's at The route to virtual tire wear prediction passes through the footprint, Testing Technology International, August 1999, S. 185 ff.
- [Pare-97] Parekh D.A. and Veres R. E.: Evolution of Tire Wear Testing Technology, Tire Technology International 1997, S. 23 ff.
- [Rado-94] Rado Z. A.: A study of surface texture and its relationship to friction. Dissertation Penn State University, 1994.
- [Reis-97] Reisdorf W., Köhne S. H., Sommer J., Krutt J.: Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung und / oder Demonstration des Abrollverfahrens eines Kraftfahrzeugreifens, DE 197 04 606 C1, 1997

- [Ridh-94] Ridha, R. A., Theves, M.: Advanced in Tyre Mechanics. Rapra Review Reports 77, Volume 7, Number 5, 1994
- [Saka-95] Sakai E. H.: Measurement and visualisation of the contact pressure distribution of rubber disks and tires, Tire Science & Technology, Volume 23, Number 4, October-December 1995, S. 238 ff.
- [Saka-96] Sakai H.: Friction and Wear of Tyre Tread Rubber, Tire Science and Technology, 24, Number 3, July September. 1996, S. 252 ff.
- [Scha-61] Schallamach A.: Die Mechanik der Reifenabnutzung, ATZ 63 Heft 2, 1961, S. 56 ff.
- [Schu-35] Schuster R., Weichsler P.: Der Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn, ATZ 38, Nummer 20, 1935, S. 499 ff.
- [Seit-67] Seitz N.: Die Druck- und Schubverteilung in der Aufstandsfläche eines schnell rollenden Reifens, ATZ 8/1967, S. 251 ff.
- [Seit-69] Seitz N.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der in der Aufstandsfläche frei rollender Reifen wirkenden Kräfte und Bewegungen, Dissertation TH München, 1969
- [Seit-71] Seitz N., Hussmann A. W.: Forces and Displacement in Contact Area of Free Rolling Tires, Society of Automotive Engineers, 710626, 1971
- [Seve-88] Severin, D.: Das Kraftschluß – Schlupf – Verhalten von Kunststoffrädern bei schwingender Belastung, Forschungsbericht 2. Halbjahr 1986 – 1. Halbjahr 1988, Sonderforschungsbereich 181 Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeugräder, Technische Universität Berlin
- [Seve-91] Severin, D.: Beanspruchung und Schlupf zwischen inhomogenen Rädern mit viskoelastischen Belag und elastischer Halbraum- Fahrbahn. Forschungsbericht 2. Halbjahr 1988 – 1. Halbjahr 1991, Sonderforschungsbereich 181 Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeugräder, Technische Universität Berlin
- [Shio-95] Shiobara, H., Akasaka, T., Kagami, S., Tsutsumi, S.: One-dimensional contact pressure distribution of radial tires in motion. Tire Science & Technology, Volume 23, Number 2, April-June 1995, S. 116 ff.
- [Shio-96] Shiobara, H., Akasaka, T., Kagami, S.: Two-dimensional contact pressure distribution of radial tire in motion. Tire Science & Technology, Volume 24, Number 4, October-December 1996, S. 294 ff.

- [Smit-97] Smithers FSAM, Footprint Stresses and: motions, Internal report, 1997
- [Tiel-94] Tielking J. T., Abraham M. A.: Measurement of truck tire footprint pressures, Transportation Research Record 1435, Sep. 1994, S. 92 ff.
- [Tret-69] Tretyakov O. B., Novopolskii V. I.: Distribution of contact stresses over the projections of tread patterns, Soviet Rubber Technology, Volume 28, 1969, S. 40 ff.
- [Walt-93] Walter H.: Uneven wear of vehicle tyres. Tire Science & Technology, Volume 21, Number 4, October-December 1993, S. 202 ff.
- [Webe-82] Weber, R.: Transmission behaviour between Slippage and Tyre Controlling Forces. 19. FISTA-Congress, Melbourne, Proceedings Volume 1, 1982
- [Yama-89] Yamazaki S., Fuijkawa T., Hasegawa A., Ogasawara S.: Indoor test procedures for evaluation of tyre treadwear and influence of suspension Alignment. Tire Science & Technology, Volume 17, Number 4, October-December 1989, S. 226 ff.
- [Yama-91] Yamazaki S., Fujikawa T., Hasegawa A., Ogasawara S.: Indoor test procedure for evaluation of tire treadwear and influence of suspension alignment. Tire Science & Technology, Volume 17, Number 4, October-December 1989, S. 236 ff.

Lebenslauf

- 18.12.1969 geboren in Aachen
- 1976 – 1980 Gemeinschaftsgrundschule in Richterich
- 1980 – 1989 Anne-Frank Gymnasium in Aachen
- 1989 – 1990 Wehrdienst
- 1990 – 1994 Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen
- 1994 – 1998 Angestellter der Uniroyal GmbH in Aachen
Reifenversuch
- 1998 – 2001 Angestellter der Continental AG in Hannover
Leiter Test Methodenentwicklung
- Seit 1.7.2001 Angestellter der Continental AG in Hannover
Leiter „Test Method and Technology Improvement“

