

Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 57

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften

von

Jost Gail
Ernst Pullwitt
Klaus Sander
Mechthild Lorig
Oliver Bartels

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 57

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt AP 02 511
Untersuchung von Reifen mit Notlauf Eigenschaften

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 3-86509-448-1

Bergisch Gladbach, Mai 2006

Kurzfassung – Abstract

Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften

Run-Flat-Reifen (Reifen mit Notlaufeigenschaften) stellen eine sicherheitsrelevante Komponente am Fahrzeug dar. Im Gegensatz zu Standardreifen bieten sie die Eigenschaft, auch im drucklosen Zustand noch eine gewisse Wegstrecke mit dem Fahrzeug zurücklegen zu können.

In der vorliegenden Untersuchung wurden verschiedene Run-Flat-Reifen auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Zum einen wurde die Dauerhaltbarkeit der Reifen getestet. Die zugehörigen Messungen wurden im Innentrommelprüfstand der BAST durchgeführt. Zum anderen wurden die fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs, das mit Run-Flat-Reifen ausgerüstet war, auf der Versuchsfläche der BAST untersucht. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde weiterhin das im Zusammenhang mit Run-Flat-Reifen stehende Thema Reifendruckkontrolle behandelt.

Die Versuche zur Dauerhaltbarkeit der Reifen haben gezeigt, dass große Unterschiede bezüglich der erreichbaren Notlaufstrecke der Run-Flat-Reifen bestehen. Unter den Prüfbedingungen der BAST, die auch Phasen mit Verzögerungen, Beschleunigungen und Schräglauf enthielten, wurden teilweise die von den Herstellern vorgegebenen Strecken nicht erreicht, teilweise jedoch auch weit überschritten.

In Bezug auf den Einfluss von Run-Flat-Reifen auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs ist festzustellen, dass die Run-Flat-Reifen im druckbehafteten Zustand Standardreifen in nichts nachstehen. Im drucklosen Zustand bieten sie noch gutes Fahrverhalten, wenn mit Standardreifen an eine Weiterfahrt nicht mehr zu denken ist. In Bezug auf die Fahrdynamik lassen sich bei den Run-Flat-Reifen untereinander kaum Unterschiede ausmachen. Das gilt auch für den Vergleich von Reifen mit verstärkter Seitenwand und Reifen mit innerem Stützring.

Insgesamt stellen Run-Flat-Reifen einen deutlichen Sicherheitsgewinn gegenüber Standardreifen für den Fall eines Luftverlustes eines Reifens dar. Es hat sich herausgestellt, dass eine Druckkontrolle bei der Verwendung von Run-Flat-Reifen dringend zu empfehlen ist, da sonst ein Druckverlust eventu-

ell nicht bemerkt wird. Dafür kommen sowohl direkte als auch indirekte Reifendruckkontrollsysteme in Frage.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass eine Prüfprozedur für neue Typen von Run-Flat-Reifen erforderlich ist, um die erforderlichen Notlaufeigenschaften zu garantieren. Mit Hilfe von Seitenwandbeschriftungen am Reifen sollte der Nutzer auf Notlaufstrecke und -geschwindigkeit hingewiesen werden.

Inspection of tires with emergency running properties

Run-Flat tires (tires with emergency running properties) are a component on the vehicle relevant to safety. Contrary to standard tires they have the property of covering a certain distance in the vehicle in a depressurized state as well.

In the present research various run-flat tires were inspected for their performance. On the one hand the durability of the tires was tested. The related measurements were carried out in the interior drum testing facility of BAST. On the other hand the dynamic properties while driving a vehicle equipped with run-flat tires were inspected on the testing surface of BAST. The topic of tire pressure monitoring which is connected to run-flat tires was dealt with further within the framework of some literature research.

The tests on the durability of the tires showed that there are large differences with respect to the emergency running distance that can be achieved by run-flat tires. The distances given by manufacturers were partly not reached under the BAST testing conditions, which also included phases with deceleration, acceleration and sideslip, however, they were partly also exceeded by far.

As far as the influence of run-flat tires on the dynamic properties when driving the vehicle are concerned, it was found that run-flat tires are in no way inferior to standard tires in a state of pressure. In a depressurized state they still offer good driving behavior when you cannot think of driving further with standard tires any more. In terms of the dynamics when driving there are hardly any

differences in the run-flat tires themselves. This also applies to the comparison with tires with a strengthened side wall and tires with an internal thrust ring.

On the whole, run-flat tires represent a clear safety advantage as opposed to standard tires in the case of a loss of pressure in the tire. It was found that checking the pressure when using run-flat tires is absolutely to be recommended since a loss of pressure will possibly not be noticed otherwise. Both direct as well as indirect tire pressure monitoring systems are possible.

The results also show that a testing procedure for new types of run-flat tires is required to guarantee the required emergency running properties. The user should be notified of the emergency running distance and speed with the help of side wall marking on the tire.

Inhalt

1	Einleitung	7	4.3	Versuchsaufbau	44
1.1	Motivation	7	4.3.1	Der Innentrommelprüfstand (IPS) der BAST	44
1.2	Untersuchungsmethode	7	4.3.2	Die Prüfreifen	45
2	Reifen mit Notlaufeigenschaften ...	7	4.4	Versuchsdurchführung und -ergebnisse	46
2.1	Grundlagen	7	4.4.1	Reifen A	46
2.1.1	Begriffsbestimmungen	7	4.4.2	Reifen B	48
2.1.2	Historie	8	4.4.3	Reifen C	50
2.1.3	Aussagen der Statistik	9	4.4.4	Reifen D	52
2.1.4	Funktionsweise von Run-Flat-Reifen	10	4.4.5	Reifen E	53
2.1.5	Auswirkungen auf das Fahrwerk	12	4.4.6	Reifen F	54
2.1.6	Notlaufstrecke und -geschwindigkeit	13	4.5	Bewertung der Prüfungen	56
2.1.7	Gewichts- und Volumenersparnis	13	4.6	Schlussbetrachtung	58
2.1.8	Geräuscentwicklung von Run-Flat-Reifen	13	5	Reifendruckkontrollsysteme	58
2.1.9	Sicherheitsaspekte	14	5.1	Allgemeines	58
2.1.10	Normung und Gesetzgebung	14	5.2	Indirekte Systeme	59
3	Versuche zur Fahrdynamik	14	5.3	Direkte Systeme	60
3.1	Versuchsfahrzeug	14	5.4	Kombinierte Systeme	61
3.2	Verwendete Reifen	15	5.5	Automatische Reifendruck- regelung	61
3.3	Messtechnik	15	6	Gesamtbetrachtung	61
3.3.1	Hardware	15	6.1	Diskussion der Ergebnisse	61
3.3.2	Software	17	6.2	Empfehlungen	63
3.4	Fahrversuche	17	6.2.1	Für Nutzer von Run-Flat-Reifen	63
3.4.1	Stationäre Kreisfahrt	18	6.2.2	Für die Gesetzgebung	64
3.4.2	Stationäre Kreisfahrt mit zusätz- licher plötzlicher Entlüftung	25	7	Zusammenfassung	65
3.4.3	Bremsen geradeaus	35	8	Literatur	65
3.4.4	Bremsen in der Kurve	35			
3.4.5	Doppelter Spurwechsel (VDA-Gasse)	37			
3.5	Fahrerfahrung auf anderen Fahrzeugen	40			
3.6	Ergebnisse einer Untersuchung des ADAC	41			
4	Prüfung der Dauerhaltbarkeit von Run-Flat-Reifen	41			
4.1	Problemstellung	41			
4.2	Festlegen der Prüfbedingungen	42			

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Marktanteil von Reifen mit Notlaufeigenschaften (Run-Flat-Reifen) nimmt zu. Immer mehr Fahrzeuge werden in Zukunft schon vom Hersteller mit Reifen mit Notlaufeigenschaften ausgerüstet werden, um auf ein Ersatzrad verzichten zu können. Neben einem reduzierten Fahrzeuggewicht und dem eingesparten Ersatzrad besteht der Vorteil, dass das Fahrzeug auch nach Druckverlust eines Reifens weitergefahren werden kann und damit die Gefährdung des Fahrers beim Reifenwechsel im fließenden Verkehr entfällt. Insbesondere bei Dunkelheit und Regen oder Kälte auf viel befahrener oder unübersichtlicher Straße tritt neben dem Komfortgewinn, den Wechsel des Reifens bis zum Erreichen der nächsten Werkstatt aufzuschieben zu können, der Sicherheitsaspekt deutlich hervor.

Die Systeme der Reifenhersteller beruhen entweder auf einer Verstärkung der Reifenflanke einschließlich einer höheren Hitzebeständigkeit des Materials oder der Reifen stützt sich auf einem innen liegenden Vollgummi- oder Metallring ab. Im Falle eines Druckverlustes wird der Fahrer im Allgemeinen über ein Luftdruckkontrollsystem gewarnt. Durch Um- oder Nachrüstung von Fahrzeugen mit Notlaufreifen ist diese Kombination mit einem Gerät zur Reifendrucküberwachung nicht immer gewährleistet. Ob der Fahrer auch ohne Reifendruckanzeige einen Druckverlust im Reifen bemerkt, wie lange man mit einem drucklosen Notlaufreifen mit welcher Geschwindigkeit tatsächlich fahren kann und wie sich die Fahrdynamik (z. B. in Kurven) und die Manövrierfähigkeit insbesondere bei plötzlichem Druckverlust ändern, ist jedoch noch nicht vergleichend untersucht worden und daher Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Weiterhin sollte geklärt werden, inwieweit es erforderlich ist, dass dem Fahrer beim Einsatz von Reifen mit Notlaufeigenschaften der Druckzustand seiner Reifen mit Hilfe eines Reifendruckkontrollsystems angezeigt wird. Die Ergebnisse der Untersuchung sollen Aussagen über die Sicherheitsbelange bei der Verwendung von Run-Flat-Reifen ermöglichen, die dem Gesetzgeber sowie dem Fahrer eines Fahrzeuges mit Run-Flat-Reifen von Nutzen sind, in dem Empfehlungen für Vorschriften und konkrete Verhaltensregeln beim Einsatz von Notlaufsystemen gegeben werden.

1.2 Untersuchungsmethode

Zur Klärung der oben genannten Fragen wurden zum einen Fahrversuche auf der Freifläche der Fahrzeug-Technischen Versuchs-Anlage (FTVA) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchgeführt, mit denen die Fahrdynamik eines mit Reifen mit Notlaufeigenschaften ausgerüsteten Fahrzeugs (Brems- und Kurvenverhalten) mit und ohne Fahrdynamikregelung untersucht werden konnte. Besonderheit der Untersuchung ist, dass alle Reifen an ein und demselben Versuchsfahrzeug gefahren wurden.

Zum anderen wurden mittels Versuchen im Innentrommelprüfstand (IPS) der BASt die Dauerhaltbarkeit der Reifen untersucht und die Aussagen der Reifenhersteller zur Notlaufstrecke überprüft.

Darüber hinaus fand im November 2002 ein Gespräch zwischen der BASt und der BMW AG zwecks Informationsgewinnung über die Technik von Run-Flat-Reifen statt. Damit verbunden war auch die Sammlung von Fahrerfahrung mit diesen Reifen (s. Kapitel 3.5). Das Gespräch wurde mit der Fa. BMW geführt, da diese derzeit die größte Flotte an Fahrzeugen mit Run-Flat-Reifen ausrüstet. Die wesentlichen aus diesem Informationsaustausch gewonnenen Erkenntnisse fließen in den vorliegenden Bericht ein.

Ebenso werden in der Fachliteratur zu findende Aussagen über Run-Flat-Reifen und Reifendruckkontrollsysteme in der Untersuchung mit berücksichtigt.

2 Reifen mit Notlaufeigenschaften

2.1 Grundlagen

2.1.1 Begriffsbestimmungen

Unter die Begriffe „Notlaufreifen“ bzw. „Reifen mit Notlaufeigenschaften“ und „Run-Flat-Reifen“ werden in diesem Bericht solche Reifen gefasst, mit denen es möglich ist, nach vollständigem Druckverlust noch eine gewisse Notlauf- oder Pannelaufstrecke zurückzulegen. Die Notlaufstrecke ist begrenzt und darf auch nur mit verminderter Geschwindigkeit zurückgelegt werden. Nach einer Fahrt im drucklosen Zustand ist der Reifen dann gegen ein intaktes Exemplar zu ersetzen.

Zu unterscheiden sind diese Reifen von so genannten „Noträdern“, die anstelle des normalen, vollwertigen Ersatzrades mitgeführt werden und eine schmale Rad-Reifen-Kombination darstellen. Sie sind für den sofortigen Reifenwechsel bei einer Panne mit montierten Standardreifen gedacht.

Um Verwechslungen zu vermeiden, wird für echte Notlaufreifen im Folgenden weitestgehend der Begriff „Run-Flat-Reifen“ verwendet.

Run-Flat-Reifen sind weiterhin zu unterscheiden von „pannenfreien Reifen“, die auch nach einem Schaden ohne Maßnahmen weitergefahren werden können. Letztere werden häufig bei Baufahrzeugen oder Flurförderzeugen eingesetzt und werden hier nicht betrachtet.

Eine weitere Variante für das Ersatzrad stellt das „Faltrad“ dar. Dieses wird, wie der Name andeutet, gefaltet mitgeführt und benötigt daher, wie das Notrad, geringeren Raum als ein gewöhnliches Ersatzrad. Das komplette Rad ist von der Breite und dem Durchmesser her kaum größer als eine Felge. Mittels eines Kompressors wird der Reifen im Pannenfall aufgepumpt und hat danach den gleichen Abrollumfang wie das normale Rad [1].

Zurzeit befinden sich von allen großen Reifenherstellern Run-Flat-Reifen auf dem Markt bzw. kurz vor der Markteinführung. Die Systeme besitzen jedoch die unterschiedlichsten Bezeichnungen, die im Folgenden für die größten Hersteller kurz dargestellt werden:

Als ein System, das eine Spezialfelge benötigt, ist das PAX-System von Michelin zu nennen, bei dem ein auf der Felge befestigter Stützring aus Vollgummi für die Notlaufeigenschaften sorgt. Ebenfalls auf einer besonderen Reifen-Felge-Verbindung mit Spezialfelgen basiert das ContiWheelSystem (CWS). Dabei wird der Reifen in eine außen liegende Kammer der Felge eingepasst und mit einem Gummifüllring fixiert und kann so auch bei Luftverlust nicht mehr von der Felge springen. Auf der Felge befindet sich wie beim PAX-System ein Stützelement aus Gummi mit textiler Verstärkung, das fest mit der Felge verbunden ist und im Pannenfall die Radlast aufnimmt [2]. Auf einem zweigeteilten Stützring, der auf der Felge durch gegenseitiges Verschrauben montiert wird, beruht das weniger verbreitete Notlaufsystem CRF (Composite Run Flat) der Firma Hutchinson.

Alle anderen gängigen Run-Flat-Reifen lassen sich auf Standardfelgen montieren. Das System CSR

(ContiSupportRing) der Firma Continental beruht auf einem Stützring aus Metall und ist für größere und schwerere Fahrzeugmodelle, wie z. B. Geländewagen oder den Maybach, vorgesehen [3]. Ebenfalls von Continental ist der Reifen SSR (Self Supporting Runflat Tire), bei dem es sich um einen selbsttragenden Reifen mit verstärkter Seitenwand handelt [4]. Bei Dunlop heißen Reifen mit demselben Prinzip DSST (Dunlop Self Supporting Technology), bei Bridgestone RFT (Run-Flat-Tire), bei Goodyear EMT (Extended Mobility Technology), bei Michelin ZP (Zero Pressure) und bei Kumho KARS (Kumho Advanced Run Flat System).

Darüber hinaus existieren Reifen mit der Bezeichnung „MO-Extended“. Diese Reifen ermöglichen es, das Fahrzeug im Falle einer Reifenpanne sicher zum Stillstand zu bringen und aus dem Gefahrenbereich zu entfernen. Zur anschließenden Weiterfahrt ist dann aber ein Ersatzrad erforderlich, sodass man nicht von einem echten Run-Flat-Reifen sprechen kann [5].

2.1.2 Historie

Systeme, mit denen es möglich ist, defekte Reifen wieder abzudichten, stellen eine erste Lösung dar, auf das Ersatzrad verzichten zu können, auf die auch einige Fahrzeughersteller zurückgreifen. Bei diesen Systemen ist es jedoch erforderlich, den Schaden an Ort und Stelle der Panne zu beheben. Einen deutlichen Schritt nach vorn im Hinblick auf Komfort- und Sicherheitsgewinn stellen jedoch die Run-Flat-Reifen dar, da mit diesen eine bestimmte Fahrstrecke mit reduzierter Geschwindigkeit weitergefahren werden kann.

Bereits im Jahr 1973 gab es mit dem Dunlop DE-NOVO ein Rad-Reifen-System mit Notlaufeigenschaften bei Luftverlust des Reifens, das vom so genannten TD/Denloc-Sicherheits- und Notlaufsystem 1983 abgelöst wurde, wobei der Reifen mit einer zusätzlichen Nase am Wulst in eine Rille an der Innenseite der Felgenschulter greift [6, 7]. Anstelle von „Run-Flat“ war zunächst „Safe Stop“ die passende Bezeichnung für die Systeme (maximal 30 km bei maximal 60 km/h). 1978 stellte Goodyear den ersten selbsttragenden Reifen vor. Im Jahr 1986 rüsteten die Firmen Bridgestone und Dunlop den Porsche 959 mit Reifen aus, die Notlaufeigenschaften aufwiesen [8, 9]. Ebenfalls in den 80er Jahren wurde von Continental ein Rad-Reifen-System namens CTS (Conti Tyre System) mit einem auf der Felgeninnenseite eingehängten Reifen ent-

wickelt. Dadurch umschließt der Reifen die Kante der Felge. Verliert der Reifen Luft, so werden die Seitenwände nach außen gedrückt und die Lauffläche kann sich auf einer ebenen Felgenoberfläche abstützen [10].

Geschätzt war die Eigenschaft, auch mit drucklosem Reifen weiterfahren zu können, vor allem für Fahrzeuge, die für den Personenschutz vorgesehen waren, sodass zunächst dort der Markt für Run-Flat-Reifen zu sehen war. Aber auch bei Fahrzeugen von körperbehinderten Personen kamen Run-Flat-Reifen zum Einsatz [11].

Seit 1987 gibt es im Rallyesport ein Notlaufsystem, eingeführt von Michelin, namens ATS (Appui Temporaire Souple = weiche temporäre Stütze), welches aus einem Schaumstoffring besteht, der auf die Felge montiert ist und Luftdruckverlust ausgleichen soll [12]. Der Schaumstoff dehnt sich bei Reifenschäden auf und füllt das Innere des Reifens aus. Das System fand jedoch bisher keinen Eingang in die Ausrüstung für den öffentlichen Straßenverkehr.

Im Modelljahr 1997 bekam die Corvette als Serienausstattung einen Goodyear EMT-Reifen [13], danach folgte der Chrysler Prowler [14]. Auf den deutschen Markt kamen in letzter Zeit der BMW Z8, der Z4, Mini sowie 5er- 6er und 7er-Reihe, bei denen große Teile der Produktion mit Run-Flat-Reifen ausgerüstet sind [6, 15-18]. Daneben sind Toyota mit dem Lexus, Renault mit dem Scénic und Rolls-Royce mit dem Phantom zu nennen, wobei auf den beiden letztgenannten Fahrzeugen Reifen des PAX-Systems von Michelin montiert werden. Aber auch für den Audi A6 und A8 können Run-Flat-Reifen geordert werden [19-21]. Seit kurzem werden auch für den Maybach und für die Mercedes-E-Klasse ab Werk Run-Flat-Reifen angeboten [3, 22]. Ende 2002 hatte Goodyear, dessen Run-Flat-Reifen mittlerweile als RunOnFlat bezeichnet wird, weltweit bereits über eine Million Run-Flat-Reifen verkauft [9, 23].

Immer mehr Fahrzeuge können also mit Run-Flat-Reifen bestückt bzw. schon ab Werk serienmäßig mit Run-Flat-Reifen ausgeliefert werden, sodass die o. g. Aufzählung nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, sondern kontinuierlich ergänzt werden müsste.

Darüber hinaus existiert bereits ein dazugehöriges Sortiment an Winterreifen, die ebenfalls Notlaufeigenschaften besitzen [24-27].

Umfragen unter Autofahrern haben ergeben, dass über die Hälfte aller Befragten Run-Flat-Reifen herkömmlichen Reifen vorziehen würden obwohl bislang nur wenige Fahrer praktische Erfahrungen mit diesen Reifen machen konnten [28]. Dies verdeutlicht das Potenzial, das im Markt für Run-Flat-Reifen steckt.

In den letzten Jahren haben viele der Hersteller Kooperationen vereinbart, sodass die Technologie einzelner Hersteller von den jeweiligen Partnern mit benutzt werden kann. Häufig wird es so möglich, dass den Reifenherstellern dadurch der Zugang zu verschiedenen Bau- und Wirkprinzipien von Run-Flat-Reifen ermöglicht wird [1, 29-31].

In Zukunft wird es eventuell auch Run-Flat-Reifen aus Polyurethan geben, Prototypen wurden vom Reifenhersteller Amerityre bereits 500 Meilen drucklos gefahren [32]. Weitere Ideen gehen in andere Richtungen. So wird z. B. überlegt, ob sich ein Reifen selbst aufpumpen kann, indem man die Verformung im Reifenlatsch wie bei einer Peristaltikpumpe nutzt, was jedoch höchstens schleichenden Luftverlust kompensieren könnte [33]. Die Firma CellsTyre hat einen Vielkammerreifen entwickelt, bei dem ein Standardreifen mit luftgefüllten elastischen Körpern bestückt wird [34]. Nach einer Beschädigung des Reifens halten die noch intakten Zellen den Luftdruck aufrecht. Inwieweit sich dieses System am Markt etabliert, bleibt abzuwarten.

Auch für Nutzfahrzeuge sind inzwischen Run-Flat-Reifen erhältlich. Mit dem Greatec Mega Drive (GMD) von Bridgestone ist ein Super-Single-Reifen in der Dimension 495/45 R22,5 als Notlaufreifen entwickelt worden [35]. Der Reifen, der bisher für den Mercedes Actros angeboten wird, soll eine Notlaufstrecke von 25 km bei 60 km/h ermöglichen und bei Verzicht auf das Ersatzrad für einen Gewinn an Nutzlast von 200 kg sorgen können [36].

Versuche mit Run-Flat-Reifen für Nutzfahrzeuge wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht durchgeführt.

2.1.3 Aussagen der Statistik

Für manche Länder mit schlechten Straßenverhältnissen und unbefestigten Straßenoberflächen ist es durchaus sinnvoll, dass eine Ersatzradpflicht besteht, solange die Reifen keine Notlaufeigenschaften aufweisen. Dagegen tritt in der Bundesrepublik Deutschland ein Reifendefekt mit Luftverlust im Durchschnitt nur alle sieben Jahre oder 100.000

km auf [37, 38]. Andere Statistiken sprechen von 150.000 km Fahrstrecke, bis eine Reifenpanne auftritt [39], sodass es eigentlich einen Anachronismus darstellt, für diesen seltenen Fall ein Ersatzrad mitzuführen, das ein gewisses Volumen beansprucht und das Fahrzeuggewicht erhöht.

Trotz des Umstandes, dass es sich beim Reifenschaden um ein seltenes Ereignis handelt, gab es im Jahr 2002 laut amtlicher Unfallstatistik [40] 610 schwer wiegende Unfälle mit Sachschaden, 1.370 Unfälle mit Personenschaden und 46 Getötete bei Unfällen, deren Ursache oder Mitursache auf Mängel an der Fahrzeugbereifung zurückzuführen ist. Darüber hinaus kann es eine gewisse Zahl an Unfällen geben, bei denen die Ursache „Reifenmangel“ nicht als eigentliche Unfallursache erkannt worden ist. Nicht erfasst in den Zahlen sind Unfälle, die deshalb passiert sind, weil Fahrzeuge mit Reifenpanne liegen geblieben sind oder weil Kollisionen mit Reifenteilen, die sich abgelöst haben und auf der Straße liegen, stattgefunden haben.

Statistiken des Allianz Zentrums für Technik weisen aus, dass 75 % der Unfälle, die auf geplatzte Reifen zurückzuführen sind, durch zu geringen Reifendruck verursacht wurden [41].

2.1.4 Funktionsweise von Run-Flat-Reifen

Die verschiedenen Bauweisen der gängigsten Run-Flat-Reifen, die den Reifen die besonderen Notlaufeigenschaften verleihen, werden im Folgenden genauer erläutert. Prinzipiell sind die Reifen so konstruiert, dass vermieden wird, dass sie bei Druckverlust komplett in sich zusammensinken und dann von der Felge springen oder durch die beim Walken entstehende Hitze oder das Felgenhorn zerstört werden.

Prinzip Stützring

Für die Erhaltung der Rollfähigkeit von Run-Flat-Reifen mittels Stützrings gibt es zurzeit zwei Konstruktionsvarianten. Zum einen wird die Abstützung des luftleeren Reifens über einen flexibel gelagerten Metallring gewährleistet, der zusammen mit einem gewöhnlichen Reifen auf einer Standardfelge montiert wird [42] (siehe Bild 2.1). Zur Dämpfung sitzt zwischen dem Metallring und der Felge ein fest mit dem Metallring verbundener Elastomerring. Im Falle eines Druckverlustes nimmt dieser Ring die Last auf, die Innenseite der Lauffläche liegt dann direkt auf der Oberseite des Stützringes.



Bild 2.1: ContiSupportRing: Zur Gewährleistung der Notlaufeigenschaften besitzt das Rad einen auf der Felge liegenden Metallring mit flexibler Auflage, der zusammen mit Standardreifen und -felgen montiert werden kann (Quelle: Continental)

Gleichzeitig sorgt der Ring dafür, dass der Reifen auf der Felge gehalten wird. Durch Vibrationen des Ringes und erhöhtes Abrollgeräusch soll der Fahrer auf mechanisch-akustischem Wege über den Pannenfall informiert werden.

Zum anderen kann der stützende Innenring auch aus Gummi oder Polyurethan bestehen. Der Elastomer-Ring sitzt dabei zwischen Felge und Reifen und stützt diesen bei Druckverlust ab. Dabei kann die Innenseite der Reifenlauffläche mit einem Gleitgel versehen sein, das der Reibungsreduzierung dient. Bei Michelin ist dieses System namens PAX (siehe Bilder 2.2 und 2.3) kombiniert mit einer besonderen Verankerung des Reifens auf einer speziell dafür konstruierten Felge, sodass Felge, Stützring und Reifen als Einheit zu sehen sind. Eine Montage der Run-Flat-Reifen auf Standardfelgen ist daher nicht möglich. Zur Verankerung des Reifens auf der Felge wird der Reifenwulst hinter dem Felgenhorn eingelegt, wobei der sichere Sitz dadurch garantiert ist, dass der Reifen mittels Hebelwirkung um den Kern im Reifenwulst umso stärker gegen die Felge gepresst wird, je größer die von außen angreifenden Kräfte sind [20]. Als Vorteile des PAX-Systems werden neben den Notlaufeigenschaften auch ein deutlich geringerer Rollwiderstand [43, 44], mehr Komfort und mehr zur Verfügung stehender Bauraum für die Bremse angeführt.

Auch für Nutzfahrzeuge gibt es auf der Felge liegende Stützsysteme für den Pannenfall. Unter dem

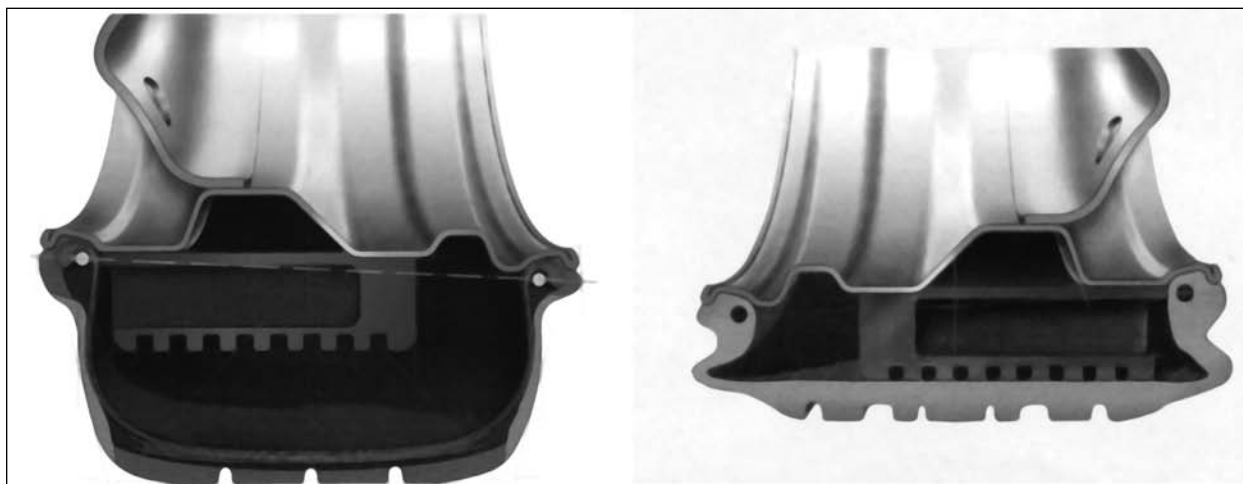


Bild 2.2: Michelin PAX-System: Zur Gewährleistung der Notlaufeigenschaften besitzt der Reifen einen auf der Felge liegenden Kunststoffring, der im Falle eines Druckverlustes den Reifen abstützt (Quelle: Michelin)



Bild 2.3: Aufgeschnittener Michelin PAX-Reifen (Quelle: Michelin)

Namen „Aircept“ (assistant inner ring interceptor) bietet Bridgestone ein System an, das aus einem zusätzlichen Schlauch im Inneren des Reifens besteht [45]. Die äußere Lage des Stützschlauches ist zur Verstärkung als umwobene Aramidstruktur ausgeführt. Gefüllt wird der innere Schlauch durch ein zusätzliches Ventil, sodass Schlauch und Reifen zunächst mit unterschiedlichem Druck versehen sind. Der Schlauch füllt den Reifen bei Normalbedingungen dabei nur zu etwa der Hälfte aus (siehe Bild 2.4). Bei plötzlichem Druckverlust im

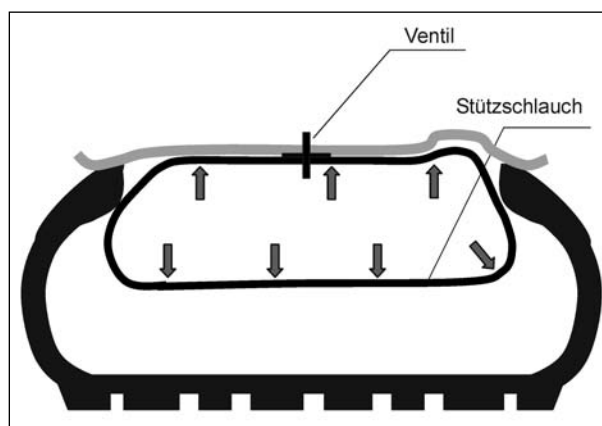


Bild 2.4: Stützsystem für Lkw-Reifen der Firma Bridgestone: Zur Sicherstellung der Notlaufeigenschaften besitzt der Reifen einen innen liegenden Stützschlauch, der sich bei Luftverlust ausdehnt, um den Reifen zu tragen

außen liegenden Reifens dehnt sich dieser Schlauch aus, um die Last, die auf dem Reifen liegt, aufzufangen.

Prinzip selbsttragender Reifen

Das Prinzip der selbsttragenden Run-Flat-Reifen besteht darin, dass die Reifen so steif ausgelegt werden, dass sie auch in luftleerem Zustand die auf das Rad wirkende Gewichtskraft des Fahrzeugs tragen können. Diese Eigenschaft wird durch eine Verstärkung der Seitenwand erreicht. Als verstärkendes Bauteil dient neben einer optimierten Karkasse und einem optimierten Reifenwulst vor allem eine sichelförmige Einlage auf der Innenseite der Seitenwand. Diese Einlage trägt im Falle eines Druckverlustes die Last und ermöglicht es, dass trotzdem Kraftübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn stattfinden kann, sodass ein Weiterfah-

ren möglich ist. Die verstärkte Seitenwand verhindert in diesem Fall, dass der Reifen zwischen Felge und Straße eingeklemmt wird, was zur Zerstörung des Reifens innerhalb kürzester Fahrstrecke führen würde. Außerdem werden für den Reifen hitzeresistente Materialien verwendet, die dem beim Walken des Reifens in drucklosem Zustand entstehenden Temperaturanstieg standhalten. Die Verstärkung im selbsttragenden Reifen hat bereits eine Entwicklung von einer Mehr-Lagen- zur Mono-Ply-Konstruktion hinter sich und die Reifen sind in Bezug auf die Komforteigenschaften optimiert worden [9]. Besonders geeignet ist das Prinzip der verstärkten Seitenwand für Reifen mit niedriger Seitenwandhöhe. Der Vorteil bei den selbsttragenden Reifen ist darin zu sehen, dass sie im Allgemeinen auf Standardfelgen montiert werden können. Empfohlen wird dabei lediglich die Verwendung von Felgen mit erhöhtem Hump (Extended Hump (EH2)).

Bild 2.5 zeigt eine Skizze eines Querschnitts durch einen drucklosen Standardreifen. Der Reifen fällt in sich zusammen und die Seitenwand wird durch die Felge gequetscht. In Bild 2.6 ist die gleiche Situation für einen Run-Flat-Reifen mit verstärkter Seitenwand dargestellt. Die sichelförmige Verstärkung sorgt dafür, dass der Reifen seine ursprüngliche Form weitestgehend behält.

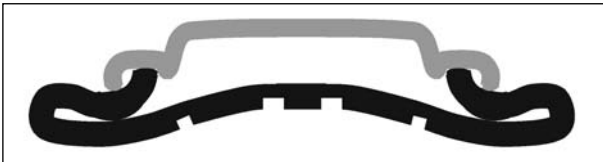


Bild 2.5: Querschnitt durch einen konventionellen Reifen im drucklosen Zustand. Der Reifen wird durch die Radlast zwischen Felge und Straße eingeklemmt

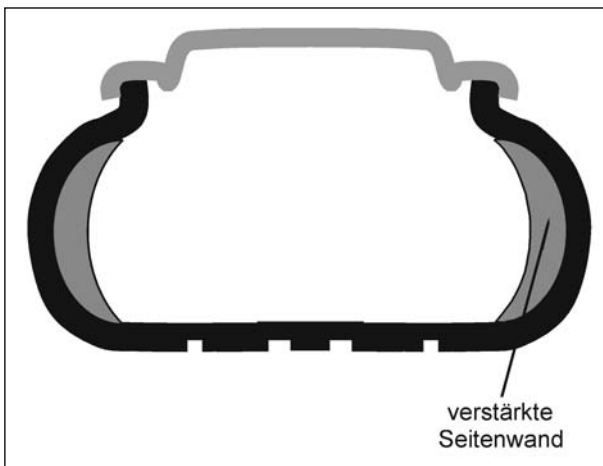


Bild 2.6: Querschnitt durch einen Run-Flat-Reifen mit verstärkter Seitenwand. Im Falle eines Druckverlustes fällt der Reifen nicht in sich zusammen

Bei allen vorgestellten Bauformen ist sichergestellt, dass der Reifen bei plötzlichem Druckverlust nicht von der Felge springt, was beim Normalreifen mit der Gefahr verbunden ist, dass das Fahrzeug ausbricht und seinen Sollkurs verlässt.

Für die Montage der Reifen eignen sich im Prinzip alle Maschinen. Nur für das PAX-System sind spezielle Montiermaschinen erforderlich. Aber auch bei den selbsttragenden Reifen wird die Montage durch Verwendung von Spezialwerkzeugen und -maschinen vereinfacht.

Bei installiertem Reifendruckkontrollsystem ist bei der Montage und besonders der Demontage der Reifen darauf zu achten, dass dieses nicht beschädigt wird.

2.1.5 Auswirkungen auf das Fahrwerk

Im Allgemeinen besitzen Run-Flat-Reifen auf Grund ihrer Verstärkungen eine größere Masse als Normalreifen, sodass sich die ungefederten Massen und Trägheitsmomente erhöhen. Tabelle 2.1 zeigt die Massen und Trägheitsmomente einiger Run-Flat-Reifen sowie Standardreifen. Weiterhin sind die Run-Flat-Reifen im Allgemeinen härter als Normalreifen, sodass es zu höheren Kräfteinleitungen in das Fahrwerk kommt und Komforteinbußen möglich sind. Zur Lösung des Problems des Komforts und der Beanspruchung des Fahrwerks kommen zwei Möglichkeiten in Frage: Entweder wird bei Fahrzeugen, die mit Run-Flat-Reifen ausgerüstet werden sollen, das Fahrwerk verstärkt ausgelegt und gegebenenfalls zusätzlich die Federsteifigkeit geändert oder, was die kostengünstigere Variante darstellt, die Eigenschaften des Run-Flat-Reifens werden in Richtung weniger Kräfteinleitung geändert. Letzteres kann jedoch zu Einbußen bei der Notlaufstrecke führen.

Dimension	Masse m [kg]	Trägheitsmoment θ [kg m ²]	Run-Flat-Reifen
195/50 ZR15	10,9	0,8	ja
205/65 R15	9,6	0,9	nein
205-650 R44A	15,1 (inkl. Stützring)	1,2	ja
225/45 R17	12,1	1,1	ja
235/45 ZR17	10,2	0,9	nein
245/45 R17	14,5	1,4	ja
245/40 R18	12,8	1,2	ja

Tab. 2.1: Übersicht über Massen und Trägheitsmomente verschiedener Reifen

2.1.6 Notlaufstrecke und -geschwindigkeit

Je nach Reifen variieren die in der Literatur und von den Reifen- bzw. Fahrzeugherstellern genannten Angaben zu Notlaufstrecke und zu der im drucklosen Zustand empfohlenen Maximalgeschwindigkeit. Diese Vielfalt ist nicht verwunderlich, da die Reifen für unterschiedliche Einsatzzwecke konstruiert sind und ihre Haltbarkeit im drucklosen Zustand von der auf das Rad lastenden Gewichtskraft, d. h. der Beladung, und der Fahrweise beeinflusst wird. Die Bandbreite der in der angegebenen Literatur genannten Werte zu Notlaufstrecke und -geschwindigkeit bewegt sich zwischen 50 km bei 80 km/h und 300 km bei 90 km/h [4, 9, 22, 42, 44, 46-57]. Für den Fall eines nur geringen Druckverlustes werden sogar Reichweiten über 1.000 km angegeben [58].

2.1.7 Gewichts- und Volumenersparnis

Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches wird heutzutage auf jede Möglichkeit geachtet, die Fahrzeugmasse zu verringern. Dazu werden auch teure Leichtmetalle wie Magnesium eingesetzt. In diesem Zusammenhang ist es nur folgerichtig, auch an das Ersatzrad zu denken. Das im Normalfall mitgeführte Ersatzrad beansprucht ein Volumen von ca. 80 l bis 120 l und kann über 20 kg wiegen. Auch ein Notrad als Ersatz benötigt immer noch ca. die Hälfte an Platzbedarf eines normalen Rades. Systeme, mit denen es möglich ist, defekte Reifen wieder abzudichten, stellen eine erste Lösung dar, auf das Ersatzrad verzichten zu können, auf die auch einige Fahrzeughersteller zurückgreifen. Mit diesen Systemen ist zwar eine deutliche Gewichts- und Volumenersparnis erreicht, es ist jedoch erforderlich, den Schaden an Ort und Stelle der Panne zu beheben.

Echte Run-Flat-Reifen können zwar durchaus 20 % schwerer als konventionelle Reifen gleicher Größe sein, sodass der Gewichtsvorteil in Bezug auf fünf Standardreifen nahezu kompensiert ist [24]. Auf Grund der fehlenden fünften Felge ergibt sich in der Summe immer noch eine merkliche Einsparung bei der Masse der Räder. In der Literatur wird für die Differenz zwischen fünf Standardrädern und 4 Run-Flat-Rädern ein Mittelwert von ca. 15 kg angegeben [46]. Durch das dann mögliche Weglassen des Wagenhebers und von Bordwerkzeug kann zusätzlich Gewicht eingespart werden. Mit jeder Reduktion der Fahrzeugmasse ist auch der Vorteil einer Verminderung des Kraftstoffver-

brauches verbunden. Für eine Gewichtseinsparung von 10 % kann für die Verbrauchsreduktion ein Wert von etwa 5 % angenommen werden [59]. Dieser bezieht sich auf den neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Bei einer Fahrzeugmasse von 1,5 t stellen 15 kg 1 % Ersparnis dar, was wiederum 0,5 % Kraftstoffminderverbrauch entspricht. Bei einem Verbrauch von 8 l/100 km wäre das eine Menge von 0,04 l/100 km. Der Vorteil der Kraftstoffverbrauchsreduktion bei dieser relativ geringen Massendifferenz tritt also hinter den Vorteil des gewonnenen Bauraumes zurück, den der Kunde als Stauraum oder der Hersteller zu Packageänderungen nutzen kann. Anders sieht es beim Gewichtsvorteil bei Nutzfahrzeugen mit Super-Single-Run-Flat-Reifen aus. Dieser kann um 200 kg betragen, wenn das Ersatzrad und dessen Halterung wegfallen können [60].

Da beim Pkw nur noch vier Räder benötigt werden, ergibt sich aber auch ein Minderbedarf an Reifen und Felgen, sodass bei der Produktion weniger Rohstoffe benötigt werden. Insgesamt kann die Verwendung von Run-Flat-Reifen durchaus einen kleinen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten.

2.1.8 Geräuschentwicklung von Run-Flat-Reifen

Bei der Entwicklung von Run-Flat-Reifen wurden und werden bei der Konstruktion neue Wege begangen, die sowohl die eingesetzten Materialien als auch den Reifenaufbau betreffen. Derartige grundlegende Veränderungen wirken sich natürlich auf die anderen Reifeneigenschaften, u. a. das Reifengeräusch, aus. H. BRUNNER und J. SCHUBERT von der TU Dresden haben das Reifen/Fahrbahn-Rollgeräusch von Run-Flat-Reifen mit denen von Standardreifen verglichen [61]. Die Run-Flat-Reifen waren vom selbsttragenden Typ mit verstärkter Seitenwand. In Bezug auf die Geräuschemission, die in Anlehnung an die Richtlinie 2001/43/EG gemessen wurde, zeigte sich, dass die Run-Flat-Reifen ein um 1,3 dB niedrigeres Rollgeräusch als die gleich dimensionierten und gleich profilierten Standardreifen aufwiesen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Geräuschunterschiede nicht nur von der veränderten Schalldämmung durch verdickte Seitenwände herrühren können, sondern dass das Schwingverhalten im Schulterbereich maßgeblich daran beteiligt ist, dass die Geräuschabstrahlung bei den Run-Flat-Reifen geringer ist.

2.1.9 Sicherheitsaspekte

Für die Run-Flat-Reifen existieren bei den Herstellern interne Sicherheitskriterien wie Schnelllauffähigkeit, Aquaplaningverhalten oder Abwurfsicherheit von der Felge. Insbesondere die Anforderungen hinsichtlich Abwurfsicherheit werden bei Run-Flat-Reifen deutlich höher angesetzt als bei Standardreifen. Versuche der Hersteller haben gezeigt, dass es bei schleichendem Druckverlust durchaus möglich ist, Run-Flat-Reifen 2.000 km zu fahren.

Alle Hersteller weisen wegen der guten Fahreigenschaften im drucklosen Fall darauf hin, dass ihre Run-Flat-Reifen nur auf Fahrzeugen mit Reifendruckkontrollsystem gefahren werden dürfen. In der Literatur wird von Tests an einem in der Lauffläche und der Seitenwand gelochten Run-Flat-Reifen auf einer Corvette berichtet, bei dem sich der Druckverlust bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h durch das Abrollgeräusch bemerkbar machte; bei zunehmender Geschwindigkeit jedoch war kein Geräusch mehr vorhanden und das Fahrverhalten deutet nicht mehr auf einen drucklosen Reifen hin [53].

Empfohlen wird von einigen Reifen- und Fahrzeugherstellern außerdem die Verwendung von Felgen mit erhöhtem Hump (EH2), da dieser zu verhindern hilft, dass der Reifen bei Fülldruckverlust in das Tiefbett abrutscht [62].

Grundsätzlich ist der Seitenkraftaufbau eines Reifens im luftleeren Zustand geringer als bei vorgesehene Betriebsdruck. Dadurch wird der Schräglaufwinkelbedarf größer und die maximal übertragbaren Kräfte geringer, was sich negativ auf das Fahrverhalten auswirkt. Dieses negative Verhalten ist beim Normalreifen wesentlich ausgeprägter als beim speziell für den Pannenfall ausgelegten Run-Flat-Reifen. Fahrdynamikregelsysteme verbessern die Fahrbarkeit bei drucklosem Reifen generell. Die Nutzung einer Fahrdynamikregelung wird daher bei der Verwendung von Run-Flat-Reifen nicht als zwingend angesehen, sie stellt aber, wie bei allen Fahrzeugen oder Reifen, eine sinnvolle Sicherheitsreserve dar. Je nach Auslegung des Fahrzeugs und der Regelstrategie greift eine Fahrdynamikregelung bei drucklosem Reifen früher ein als im Normalfall. Eventuell könnte bei durch ein Kontrollsystem detektiertem Druckverlust in Zukunft ein für diesen Fall entsprechend angepasstes Regelungssystem aktiviert und damit weitere Verbesserungen ermöglicht werden. Dies könnte gegebenenfalls mittels herabgesetzter Regelschwellen zur Eingrenzung

der Querdynamik und zum optimalen Erhalt der Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs geschehen. Ebenfalls wäre für den Pannenfall eine Drosselung der Fahrgeschwindigkeit auf den vorgegebenen Maximalwert für den Notlauf denkbar.

2.1.10 Normung und Gesetzgebung

Bisher existieren für Run-Flat-Reifen weder eine ECE-Regelung noch eine EG-Richtlinie. Die Run-Flat-Reifen müssen lediglich die Anforderungen erfüllen, die auch an Standardreifen gestellt werden. Es gibt jedoch Vorschläge, unter anderem von der „European Tyre and Rim Technical Organisation“ (ETRTO), Definitionen und Prüfvorschriften für Run-Flat-Reifen und Run-Flat-Systeme in die ECE-Regelung 30 aufzunehmen und ein entsprechendes, auf den Reifen aufzubringendes Symbol für die Notlaufeigenschaften festzulegen [63]. Diese beruhen auf einem bisher nicht veröffentlichten Entwurf einer ISO-Norm für Run-Flat-Reifen. Hier wird ein Testverfahren für die Prüfung der Notlaufeigenschaften vorgeschlagen, wobei der Run-Flat-Reifen im drucklosen Zustand mit 80 km/h betrieben werden soll. Hat sich der Abstand zwischen Reifenaufgabe und Felgenkante nach Absolvieren der Notlaufstrecke nicht wesentlich verringert und hat sich die Lauffläche nicht gelöst, so soll der Test als erfolgreich gewertet werden [64]. Diese Vorschläge befinden sich derzeit in der internationalen Diskussion.

3 Versuche zur Fahrdynamik

3.1 Versuchsfahrzeug

Eine Besonderheit der vorliegenden Untersuchung gegenüber anderen Tests ist die Verwendung ein und desselben Fahrzeugs, auf dem die Run-Flat-Reifen verschiedener Fabrikate montiert wurden. Als Versuchsfahrzeug wurde eine Limousine des Mercedes-Modells E 240 (Typ W 210), Baujahr 1999, verwendet, da für dieses Fahrzeug auch Felge-Reifen-Kombinationen mit innen liegendem Stützring als Run-Flat-Konzept zur Verfügung standen und genügend Raum im Radkasten für die verschiedenen anderen zum Einsatz vorgesehenen Run-Flat-Reifen vorhanden ist. Außerdem ist das Fahrzeug mit einer abschaltbaren Fahrdynamikregelung ausgerüstet, sodass auch deren Einfluss auf das Fahrverhalten unter Verwendung von Run-Flat-Reifen mit untersucht werden konnte.

3.2 Verwendete Reifen

Die Standardbereifung des Versuchsfahrzeugs hat die Dimension 205/65 R15. Um aber zu den Run-Flat-Reifen vergleichbare Normalreifen als Referenz zu nutzen, wurden für die Versuche gewöhnliche Reifen der Dimension 235/45 R17 montiert. Dieser Standardreifen wird im Folgenden mit S bezeichnet.

Bei den Run-Flat-Reifen war es das Ziel, Reifen der größten Hersteller zu testen. Run-Flat-Reifen wurden für die Versuche von folgenden fünf Herstellern zur Verfügung gestellt: Bridgestone, Continental, Dunlop, Michelin und Pirelli. Bei den Prüfstandsversuchen (Kapitel 4) wurden zusätzlich Reifen der Firma Goodyear mit untersucht, die für ein Dienstfahrzeug der BASt (Audi 90) in 2001 angeschafft worden waren, jedoch nicht am Versuchsfahrzeug montiert werden konnten. Die Dimensionen der Reifen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Die Ergebnisse werden im Bericht anonymisiert dargestellt, indem den Reifen aus Tabelle 3.1 in zu-

Reifendimension
195/50 ZR15 82W
205-650 R44A 94H
225/45 R17 91W
245/45 R17 95W
245/45 R17 95W
245/40 R18 93W

Tab. 3.1: Übersicht über die Dimensionen der verwendeten Reifen

fälliger Reihenfolge die Buchstaben A bis F zugeordnet werden.

Bis auf einen Reifen, dessen Funktion im drucklosen Zustand auf einem innen liegenden Stützring aus Vollgummi beruht, sind alle Versuchsreifen mit einer verstärkten Seitenwand ausgerüstet, sodass sie auf Standardfelgen gefahren werden können. Augenmerk bei den Versuchen wurde darauf gelegt, inwieweit sich das Fahrverhalten vom drucklosen gegenüber dem gefüllten Reifen und vom Run-Flat-Reifen gegenüber dem Standardreifen verändert. Auf Grund der teilweise unterschiedlichen Dimensionen der Run-Flat-Reifen sind Vergleiche zwischen den Reifen verschiedener Hersteller nicht ohne weiteres zu ziehen. Dies war auch nicht Ziel der Untersuchung.

3.3 Messtechnik

3.3.1 Hardware

In Tabelle 3.2 sind die im Versuchsfahrzeug eingesetzten Sensoren und die erfassten Messsignale mit ihren Messbereichen zusammengefasst. Die für die Versuche relevanten Größen werden im Wesentlichen mit einem korrelationsoptischen Geschwindigkeitssensor, einem Messlenkrad sowie einer GPS-gestützten Kreiselpattform erfasst. Die Kreiselpattform wurde möglichst in der Nähe des Fahrzeugschwerpunktes positioniert, der zuvor durch eine Schwerpunktsbestimmung nach ISO

Mess-Signal	Sensortyp, Hersteller	Messbereich
Längsgeschwindigkeit Quergeschwindigkeit	Vektorsensor V1, Datron ¹	0-216 km/h
Längsbeschleunigung Querbeschleunigung Vertikalbeschleunigung	Kreiselsystem ADMA, GeneSys-Elektronik GmbH ²	±2 g
Wankrate Nickrate Gierrate	Kreiselsystem ADMA, GeneSys-Elektronik GmbH	±100 °/s
Position	DGPS-System RT-2, NovaTel	
Lenkradwinkel	Messlenkrad CL2, CAETEL GmbH	±1.000 °
Bremspedal	Gabellichtschanke OPB911W, Optek ³	
Fahrbahnmarke	Reflexions-Lichttaster OCT500-F22NPN, Pepperl+Fuchs ⁴	0-500 mm

¹ am Heck des Versuchsfahrzeuges zur Stützung des Kreiselsystems angebracht
² mit ca. 1 m Abstand zum gemessenen Fahrzeugschwerpunkt in der Mittellängsachse angeordnet
³ sensiert das Bremspedalgestänge im Fußraum des Versuchsfahrzeuges
⁴ an vorderer Stoßstange des Versuchsfahrzeuges angebracht

Tab. 3.2: Messsignale und Sensoren des Versuchsfahrzeuges



Bild 3.1: Fahrzeuginstrumentierung, bestehend aus Kreisel-system (1), GPS-Empfänger mit Funkmodem (2) sowie Elektronikeinheiten für das Messlenkrad (3) und Geschwindigkeitssensor (4)

10392 [65] mittels Schrägstellen des mit einem 75-kg-Dummy besetzten Fahrzeugs ermittelt wurde.

Zur Datenerfassung und -speicherung wurde ein mobiles Datenerfassungssystem, bestehend aus einem Mobil-Notebook und einer zweikanaligen CAN-Bus-PCMCIA-Karte, eingesetzt. Mit einem gesonderten Analog/CAN-Wandler wurden die analogen Ausgangssignale des Messlenkrades und zusätzliche Analogwerte wie Bremspedalbetätigung, Detektion der Reflexionsmarke und Fernsteuersignal zur Steuerung der Schnellentlüftungseinheit erfasst. Die Hauptelemente der Fahrzeuginstrumentierung sind in Bild 3.1 gezeigt.

Die wichtigsten Messdaten wie Versuchsgeschwindigkeit, Längs- und Querschleunigung usw. wurden im Versuchsfahrzeug online als Zeitschrieb auf einem Touchscreen-Bildschirm angezeigt, der gleichzeitig die Bedienung der mit Diadem 8.1 erstellten Steuer- und Erfassungssoftware gestattete.

Für die Versuche zur Schnellentlüftung der Versuchsreifen wurde eine eigens konzipierte elektro-mechanische Ventileinheit eingesetzt, mit der ferngesteuert der schlagartige Luftverlust mit typischen



Bild 3.2: Ventileinheit zur Schnellentlüftung

Entlüftungszeiten unterhalb 1 s realisiert werden konnte. Die Versuchsfelge wurde hierzu mit einem Schlauchanschluss mit 19 mm Nennweite versehen, von dem ein Luftschlauch zu der Ventileinheit führte. Diese war mit einer Zentralscheibe, die von Spannhülsen auf den Radschrauben gehalten wurde, auf der Felge angeordnet (Bild 3.2).

Auf Grund der besonderen Konstruktion der Öffnungsmechanik war nur eine geringe Kraft für die Betätigung des Ventilverschlusses notwendig. Die erforderliche Haltekraft wurde von einem Gleichstrom-Hubmagneten, dessen Selbsthaltung durch einen Dauermagneten erfolgte, aufgebracht. Die Öffnung des Ventilverschlusses erfolgte mit einem kurzen Stromimpuls durch den Hubmagneten, mit dem das Magnetfeld des Dauermagneten neutralisiert wurde, sodass der Verschluss mittels Federkraft geöffnet wurde (Bild 3.3).

Auf Grund der geringen Betätigungskraft und -zeit war nur eine geringe elektrische Energie notwendig. Es konnte daher auf eine eigene Stromversorgung durch Batterien o. Ä., die die rotatorischen Massen erheblich erhöht hätten, verzichtet werden und die erforderliche Energie durch einen Elektrolytkondensator mit einer Kapazität von 40 mF, der zuvor auf 12 V Nennspannung geladen wurde, bereitgestellt werden. Eine Funkfernsteuerung, deren



Bild 3.3: Ansicht der Verschlusseinheit

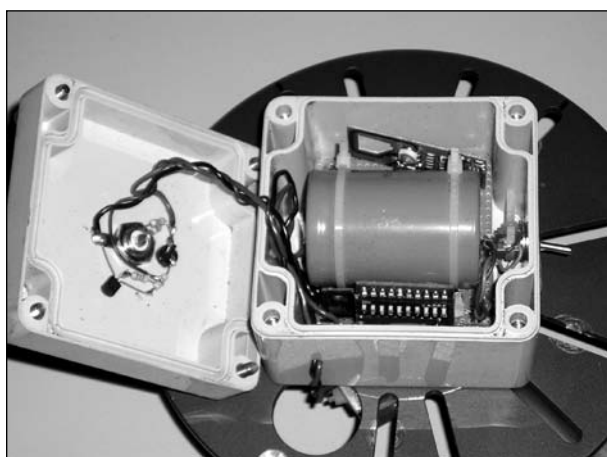


Bild 3.4: Innenansicht der Elektronikeinheit, bestehend aus Ladekondensator (Mitte), Fernsteuerempfänger (oben) und Signaldecoder (unten)

Empfänger zusammen mit dem Ladekondensator in einem wasserdichten Gehäuse auf der Zentralbefestigungsscheibe angeordnet war, erlaubte das gefahrlose Auslösen der Schnellentlüftung außerhalb des Versuchsfahrzeuges (Bild 3.4).

Da das Signal des Fernsteuerempfängers auf der Felge nicht zugänglich war, wurde zur Aufzeichnung des Zeitpunktes der Schnellentlüftung ein zweiter Empfänger eingesetzt, der auf dem Dach des Versuchsfahrzeuges angebracht war und von dem das empfangene Funksignal als Analogwert zum Analog/CAN-Wandler geführt wurde.

Die Kennzeichnung der einzelnen Messabschnitte der Versuche erfolgte durch Absperrpylone, die mit Reflexionselementen versehen waren. Diese wurden von dem an der vorderen Stoßstange des Versuchsfahrzeuges angebrachten Reflexions-Lichttaster erkannt und als Positionsmarken in einem gesonderten Messkanal abgelegt.

Eine Videoanlage, bestehend aus 2 Miniatur-Farbkameras und einem DV8-Recorder, mit dem die Fahrversuche aus dem Fahrzeug heraus dokumentiert werden konnten, vervollständigt die Instrumentierung des Versuchsfahrzeuges.

3.3.2 Software

Für die Datenerfassung wurde ein spezielles Steuer- und Erfassungsprogramm mit Diadem 8.1 erstellt, mit dem über den CAN-Bus sowohl die Erfassung der Datentelegramme als auch die aktive Steuerung des Kreiselsystems erfolgten. Für die weitere Auswertung der Versuchsdaten wurden spezifische Auswerteprogramme mit RTEWin 1.09 erstellt, die jeweils an das einzelne Versuchsdesign angepasst waren und eine automatisierte Auswertung der insgesamt über 2.500 Datensätze erlaubten. Die abschließende Aufbereitung und Darstellung der Messdaten wurden mit Diadem 8.1 unter teilweiser Verwendung von CurveExpert 1.38 vorgenommen.

3.4 Fahrversuche

Die Fahrversuche zur Ermittlung der Einflusses von Run-Flat-Reifen auf die fahrdynamischen Eigenschaften eines Pkw wurden auf der Fahrzeug-Technischen Versuchs-Anlage (FTVA) der BAST durchgeführt. Voraussetzung für die Versuche war eine trockene Fahrbahnoberfläche bei Außentemperaturen von mindestens 10 °C. Das Versuchsprogramm umfasste die folgenden Manöver: stationäre Kreisfahrt, Bremsen in der Kurve und geradeaus sowie doppelter Spurwechsel.

Für die Fahrten wurde das Fahrzeug jeweils mit kompletten Reifensätzen von Run-Flat-Reifen ausgestattet. Zunächst wurden Versuchsreihen mit Reifendrücken, die den Fahrzeugherstellerangaben entsprechen, gefahren. Dann wurden Fahrten mit drucklosen Reifen durchgeführt, wobei die Entlüftung vor der jeweiligen Testfahrt stattfand (es war jeweils nur ein Reifen gleichzeitig drucklos). Bei den stationären Kreisfahrten wurde zusätzlich auch der Fall untersucht, dass mit druckbehafteten Reifen gestartet wurde und der Reifen plötzlich während der Fahrt entlüftet wurde. Nur bei diesem Fahrmanöver konnte das Schnellentlüften reproduzierbar angewendet werden. Bis auf die Bremsungen wurden alle Versuche jeweils mit und ohne Fahrdynamikregelung gefahren.

Weiterhin wurden zum Vergleich Versuchsfahrten mit Standardreifen durchgeführt. Im druckbehafteten Zustand erfolgte das Messprogramm analog zu den Run-Flat-Reifen. Es ist jedoch mit Standardreifen nicht möglich, die Fahrversuche mit völlig drucklosem Reifen zu absolvieren, ohne Reifen und Felge nach kurzer Fahrstrecke irreversibel zu beschädigen. Aus diesem Grund wurden beim Standardreifen die Fahrversuche – bis auf die Schnellentlüftung, die bei Standardreifen entfiel – mit einem Druck von nur 0,7 bar (ca. 1/3 des Normaldruckes) erneut gefahren. In den folgenden Bildern sind diese Fahrten mit entlüfteten Standardreifen jeweils mit unter dem Begriff „drucklos“ dargestellt, obwohl ein Restdruck von 0,7 bar vorhanden war.

3.4.1 Stationäre Kreisfahrt

Stationäre Kreisfahrten dienen dazu, das Fahrverhalten bei Kurvenfahrt, das heißt in Abhängigkeit von Querkräften, zu untersuchen. Wesentliche Beurteilungsgrößen sind der Lenkradwinkelbedarf und der auftretende Schwimmwinkel bei verschiedenen Querbeschleunigungen.

Die Fahrversuche zur stationären Kreisfahrt wurden auf einer Kreisbahn mit 20 m Radius durchgeführt.

Dabei musste der Fahrer versuchen, den Kreis so exakt wie möglich zu durchfahren. Druckverlust wurde jeweils nur an einem der kurvenäußeren Räder hergestellt, da dort die stärkeren Radlasten und Kräfte auftreten und die Fahrzeugreaktion dadurch ausgeprägter ist.

Bild 3.5 zeigt für Reifen A den mittleren Lenkradwinkel bei stationärer Kreisfahrt für die sechs verschiedenen Versuchsdesigns (druckbehaftet, druckloses äußeres Vorderrad und druckloses äußeres Hinterrad jeweils mit und ohne Fahrdynamikregelung). Dieses Beispiel verdeutlicht die Abhängigkeit der Fahrzeugreaktion vom Versuchsdesign. Im druckbehafteten Fall zeigt das Fahrzeug leichtes Untersteuern. Der Lenkwinkel nimmt mit wachsender Querbeschleunigung etwas zu. Hier spielt die Fahrdynamikregelung keine Rolle. Bei entlüftetem Vorderrad ist die Untersteuertendenz wesentlich stärker; 7 m/s² Querbeschleunigung waren trotz Lenkwinkeln über 350° nicht mehr zu erreichen. Ein geringer Einfluss der Fahrdynamikregelung ist zu sehen: ESP fördert das untersteuernde Verhalten in geringem Maße. Für entlüftetes Hinterrad ergibt sich ein geringerer Lenkradwinkelbedarf, der mit zunehmender Querbeschleunigung abnimmt, was

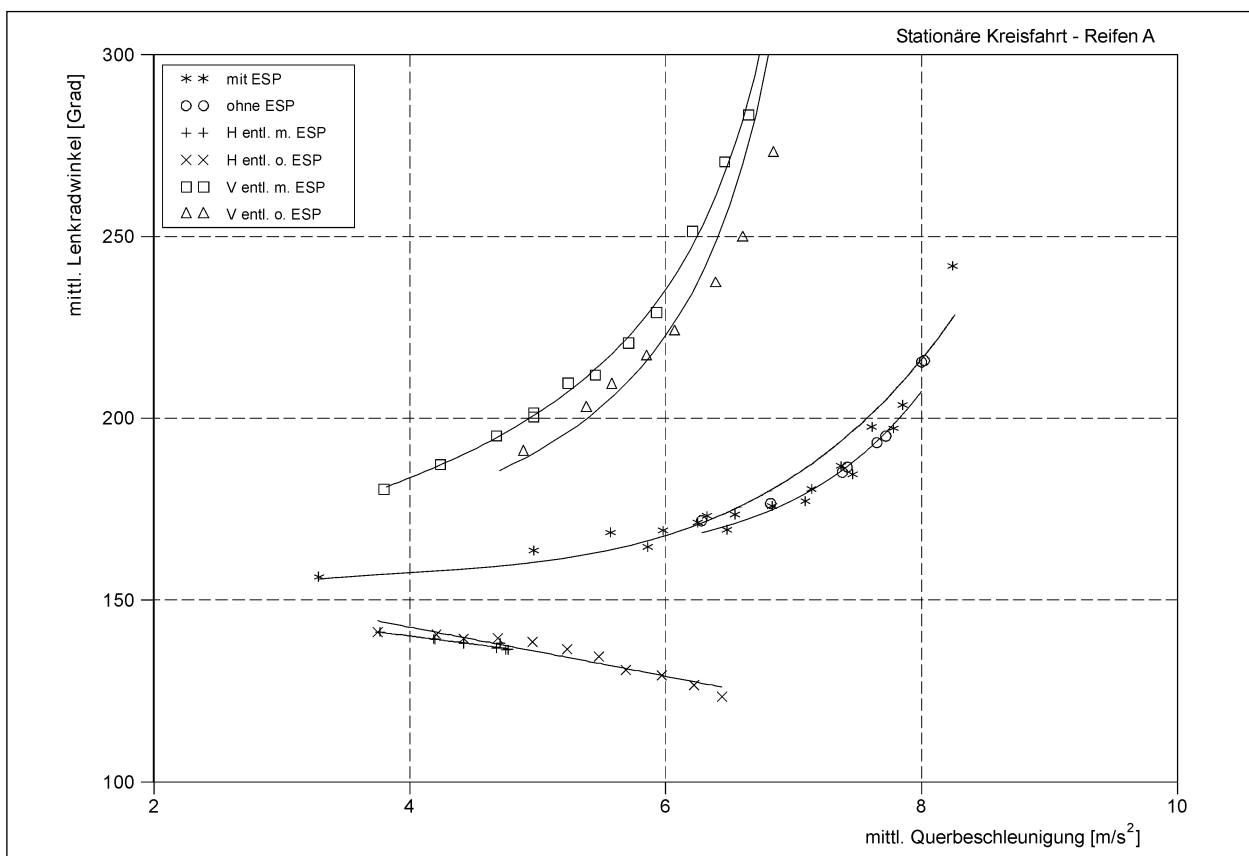


Bild 3.5: Lenkradwinkelbedarf in Abhängigkeit vom Versuchsdesign bei stationärer Kreisfahrt mit Reifen A

charakteristisch für Übersteuern ist. Der Reifen bzw. das Fahrzeug ließ ohne ESP noch Querbearbeitungen über 6 m/s^2 zu. Mit ESP wurde das Fahrzeug auf Grund des starken Übersteuerns so eingebremst, dass die Querbearbeitung unter 5 m/s^2 blieb bzw. bei höheren Geschwindigkeiten keine stationären Kreisfahrten mehr möglich waren.

Hier und bei allen weiteren Versuchen enden die Kurven jeweils bei der größtmöglichen Geschwindigkeit bzw. Querbearbeitung, bei der das Manöver noch erfolgreich zu absolvieren war, sodass die letzten Messpunkte jeweils den Übergang zu kritischem und instabilem Fahrverhalten anzeigen. Zu niedrigen Geschwindigkeiten hin wurden nicht für alle Reifen gleichermaßen Messungen aufgezeichnet, sodass in den Diagrammen dort teilweise keine Messpunkte erscheinen. In diesen Bereichen war das Fahrverhalten aber jeweils absolut unkritisch.

Eine Übersicht über die Ergebnisse aller Reifen in Bezug auf den mittleren Lenkradwinkelbedarf geben die Bilder 3.6–3.8. Für die Fahrten mit gefüllten Reifen ergeben sich fast keine Unterschiede zwischen allen Versuchsreifen. Der Standardreifen liegt im Mittelfeld der gemessenen Reifentypen. Der Lenkradwinkel erreicht auch bei 8 m/s^2 kaum 200° , sodass die Versuche sicher zu fahren waren. Auch die Fahrdynamikregelung hat nur einen geringen Einfluss.

Anders sieht es dagegen bei entlüftetem Vorderrad aus. Hier sind die Lenkradwinkel bedeutend größer. Auch zwischen den Reifen sind Unterschiede auszumachen: Zum einen setzt das Untersteuern unterschiedlich früh ein, zum anderen sind teilweise (Reifen A) enorme Lenkwinkel möglich bzw. nötig (bis 350°), um das Fahrzeug auf dem Sollkurs zu halten. Die Grenze der mit den Reifen möglichen Seitenkräfte bestimmt letztlich auch die maximal erreichte Querbearbeitung, die je nach Reifen variiert. Auf diese wird unten noch näher eingegangen. Bei entlüftetem Vorderrad ist der Einfluss der Fahrdynamikregelung bei allen Reifen gering. Trotz ESP kommt es zum Untersteuern des Fahrzeugs, sodass man die Kreisbahn nach außen verlässt.

Bei entlüftetem Hinterrad ist die Bedeutung einer Fahrdynamikregelung größer. ESP begrenzt hier die maximale Geschwindigkeit und damit auch Querbearbeitung merklich, mit der man die Sollkreisbahn durchfahren kann. Das heißt, dass die Fahrdynamikregelung den Druckverlust „erkennt“. Die Auswirkungen der Fahrdynamikrege-

lung bei entlüftetem Hinterrad auf die Messgrößen sind in Bild 3.9 dargestellt. Für eine Fahrt mit ca. 40 km/h sind die Zeitverläufe von Gierrate, Querbearbeitung, Lenkradwinkel, Schwimmwinkel und Nickwinkel aufgetragen. Auf Grund des drucklosen Hinterrades neigt das Fahrzeug zum Übersteuern, das ESP registriert diese Fahrzeugreaktion und bremst das Fahrzeug, bis sich die Situation normalisiert. Das Fahrzeug kann wieder schneller fahren, bis das ESP erneut eingreift. Im Falle des drucklosen Rades ist der Regeleingriff des ESP heftig, aber niederfrequent, sodass sich eine Nickbewegung des Fahrzeuges aufschaukelt. Als Konsequenz daraus ist eine stationäre Fahrt bei hoher Querbearbeitung nicht mehr möglich, sodass Versuche, in denen dieser Effekt auftrat, nicht in die Vergleichsdarstellungen zur stationären Kreisfahrt mit aufgenommen werden konnten. Aus diesem Grund fehlen in den Diagrammen dann die entsprechenden Werte für hohe Querbearbeitungen.

Selbst bei abgeschaltetem ESP bleibt eine Restfunktion der Fahrdynamikregelung erhalten, welche die maximal mögliche Geschwindigkeit bei der stationären Kreisfahrt begrenzt. Diese ist jedoch im Allgemeinen höher als bei eingeschaltetem ESP.

Der Lenkradwinkelbedarf bei entlüftetem Hinterrad ist erheblich kleiner als bei entlüftetem Vorderrad und nimmt mit wachsender Geschwindigkeit ab, das Fahrzeug übersteuert. Unterschiede zwischen den Reifen in Bezug auf die Übersteuerneigung sind erkennbar. Nur der Standardreifen zeigt weiter Untersteuern, was auf den Restdruck von $0,7 \text{ bar}$ zurückzuführen ist. Ein echter Vergleich zu einem drucklosen Standardreifen war nicht möglich.

Die maximal erreichten Querbearbeitungen bei stationärer Kreisfahrt sind in den Bildern 3.10 und 3.11 dargestellt. Bild 3.10 zeigt die Werte für Fahrten ohne ESP für alle Reifen. Dabei wird unterschieden zwischen druckbehaftetem Fall sowie drucklosem Vorder- und Hinterrad. Unterschiede zwischen den Reifen treten deutlich hervor. Im Allgemeinen sind die erreichten Querbearbeitungen am größten, wenn alle Reifen mit Normaldruck versehen sind. Bei entlüftetem Vorderrad sind die Querbearbeitungen am geringsten. Eine Ausnahme stellt Reifen A sowie der Standardreifen dar.

Bild 3.11 verdeutlicht die Auswirkungen der Fahrdynamikregelung. Für druckloses Hinterrad zeigt diese Abbildung, dass die maximale Querbearbeitung ohne ESP wesentlich größer ist, sich

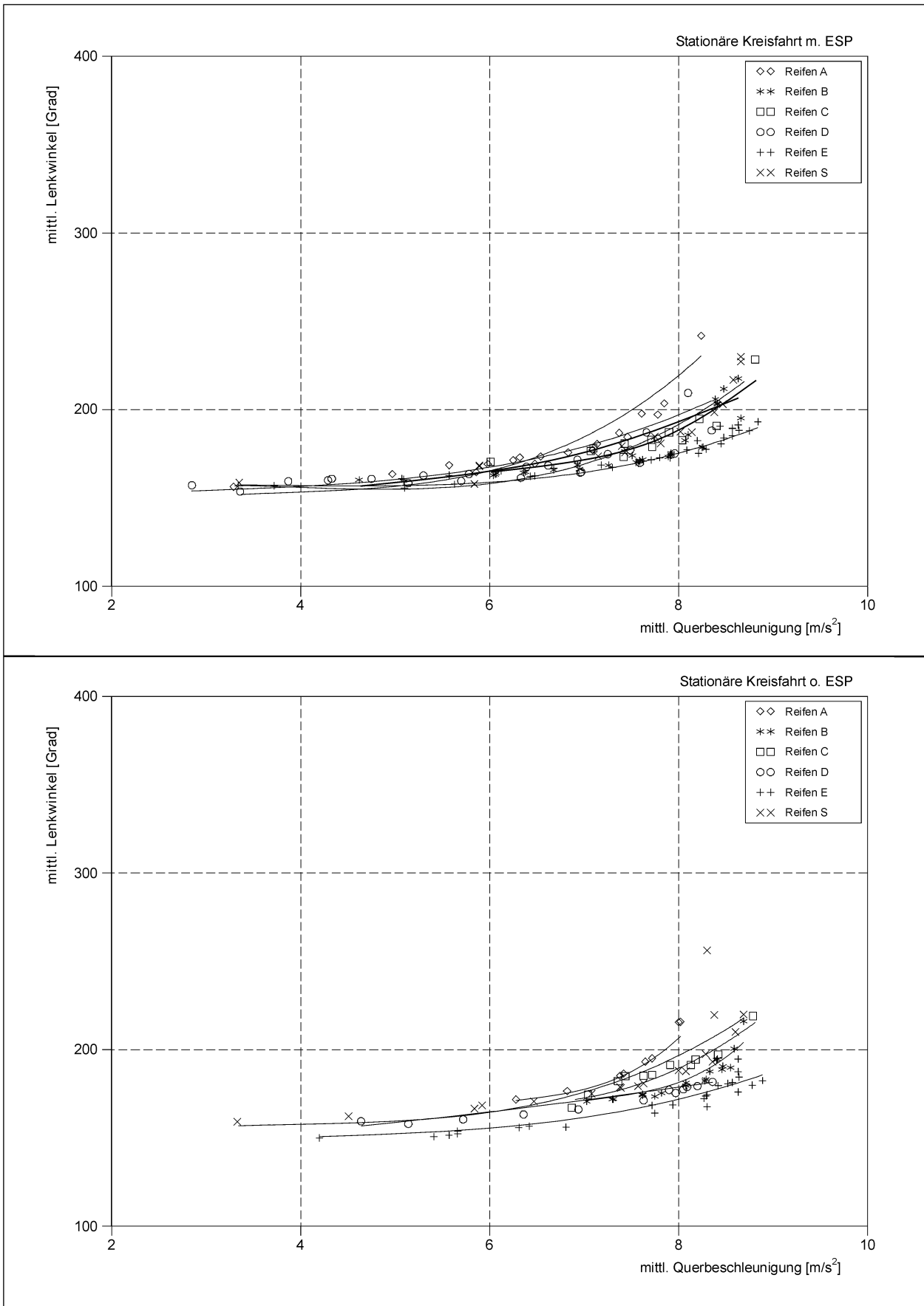


Bild 3.6: Lenkradwinkelbedarf in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung für verschiedene Reifen bei stationärer Kreisfahrt (druckbehaftet mit/ohne ESP)

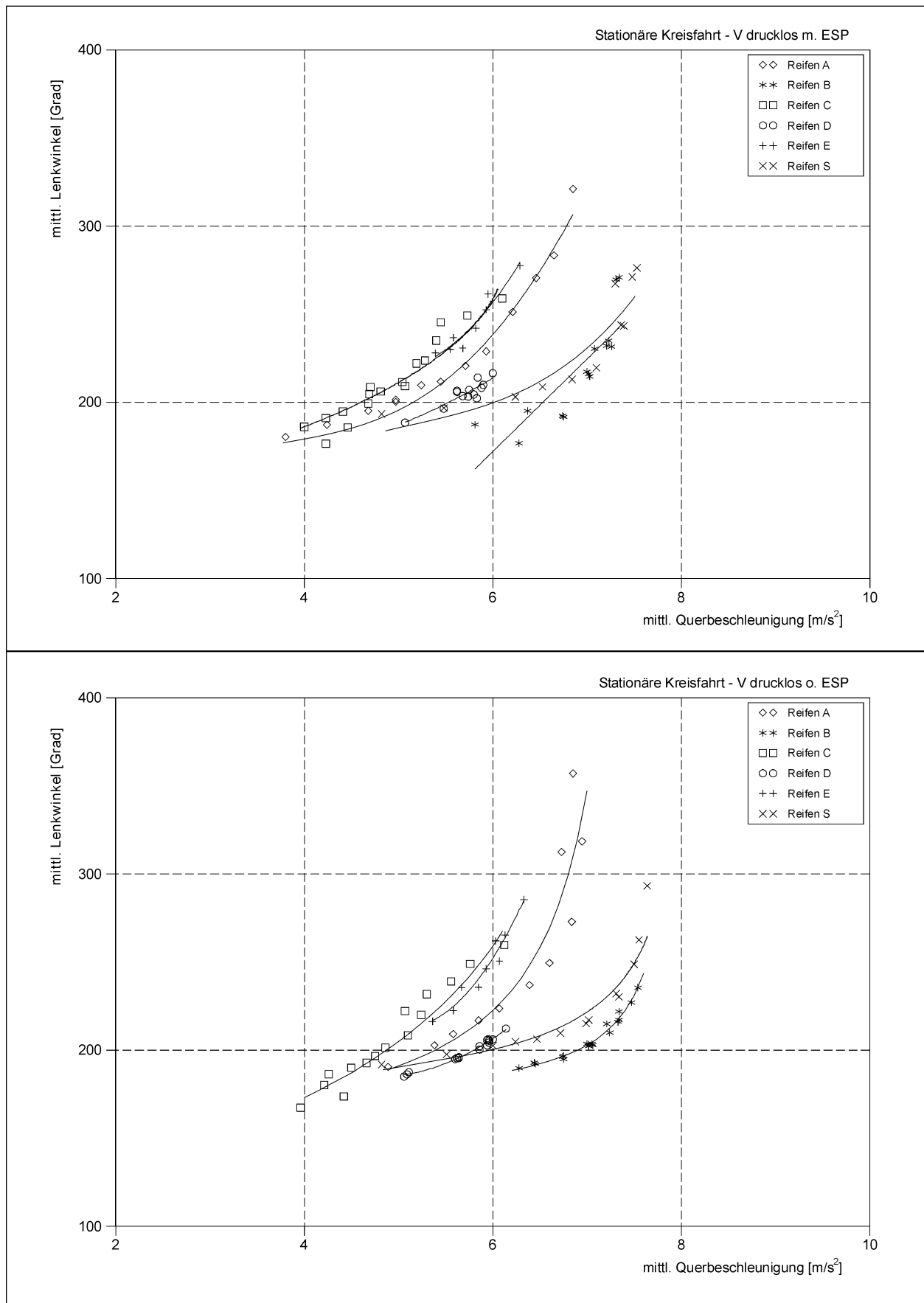


Bild 3.7: Lenkradwinkelbedarf in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung für verschiedene Reifen bei stationärer Kreisfahrt (drucklos vorne mit/ohne ESP)

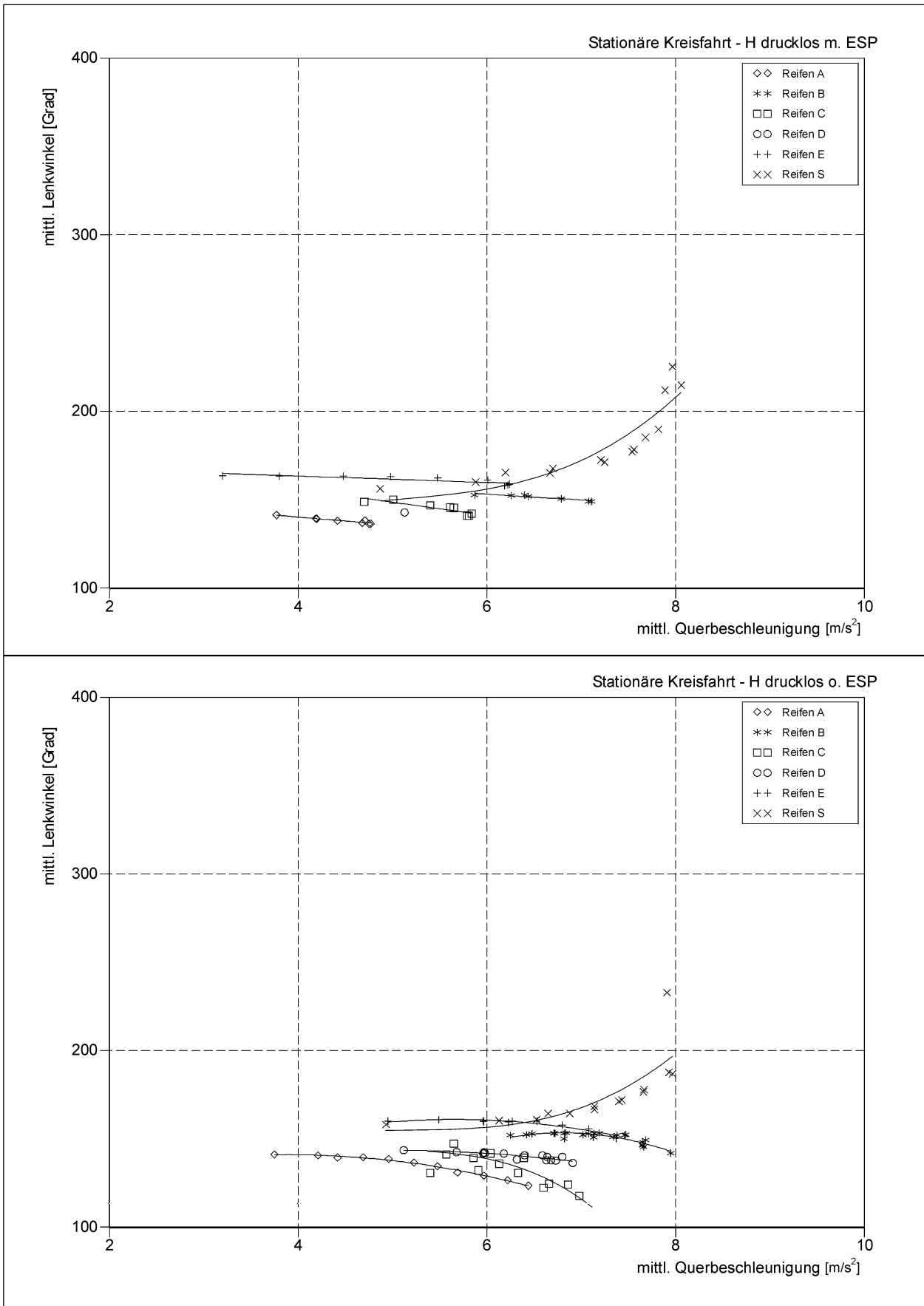


Bild 3.8: Lenkradwinkelbedarf in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung für verschiedene Reifen bei stationärer Kreisfahrt (drucklos hinten mit/ohne ESP)

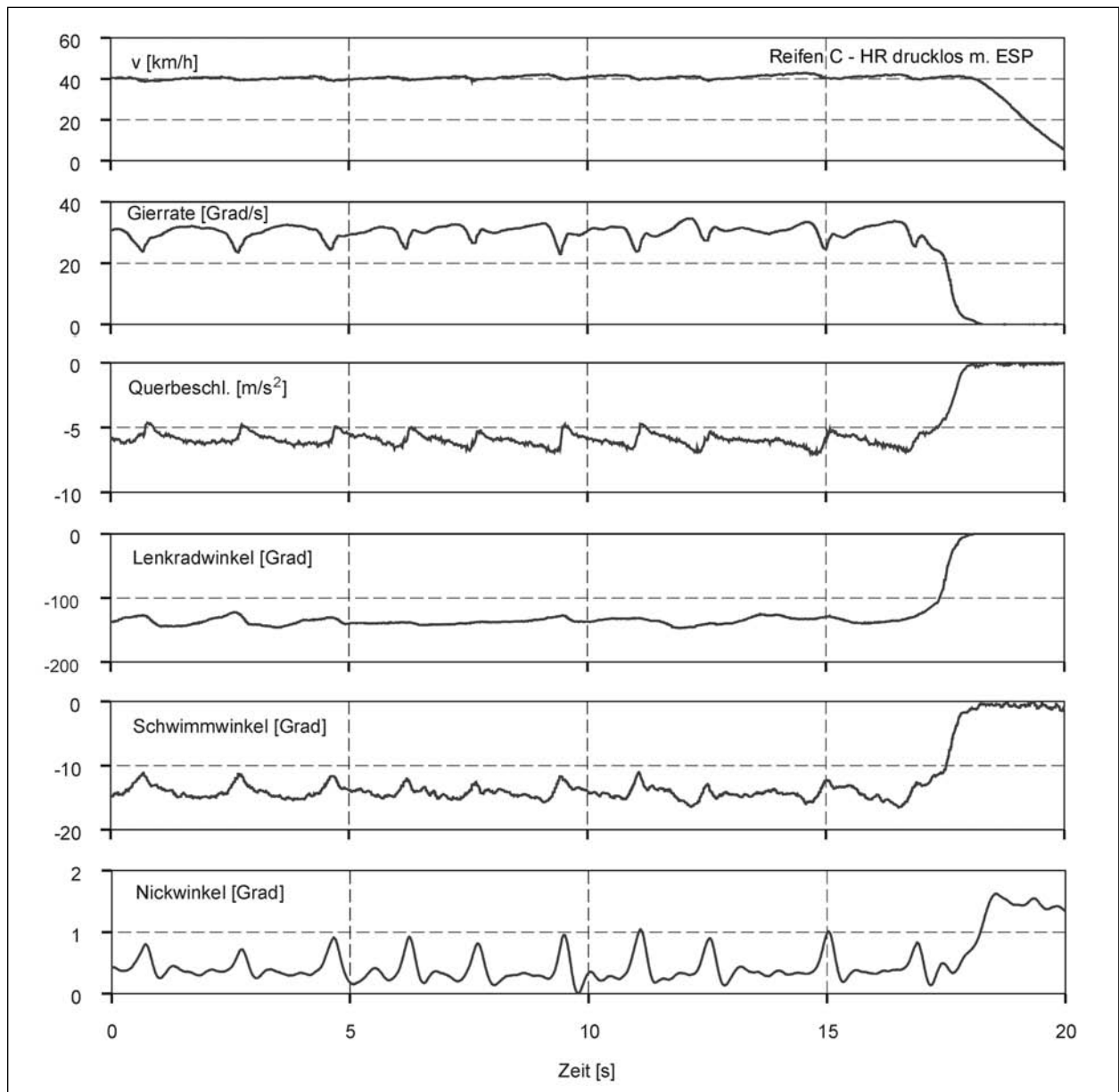


Bild 3.9: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen bei Kreisfahrt und entlüftetem Hinterrad bei eingeschalteter Fahrdynamikregelung (Reifen C). Durch den Eingriff der Fahrdynamikregelung kommt es zu einer starken periodischen Nickbewegung des Fahrzeugs

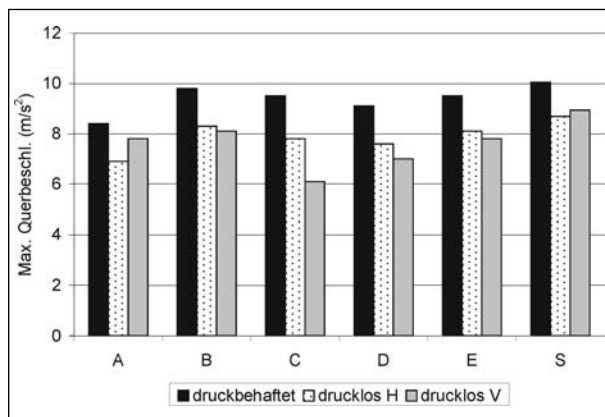


Bild 3.10: Maximale Querbeschleunigung bei stationärer Kreisfahrt ohne ESP

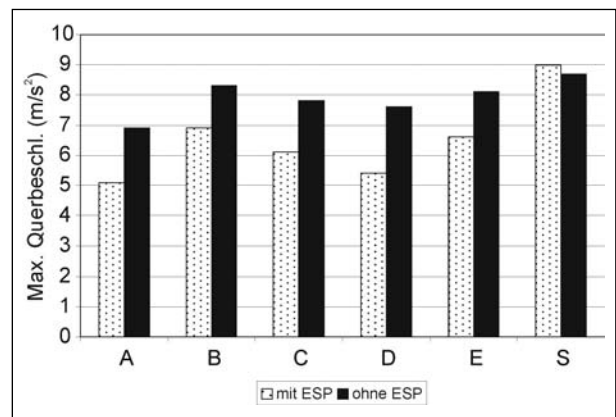


Bild 3.11: Maximale Querbeschleunigung bei stationärer Kreisfahrt: Einfluss der Fahrdynamikregelung

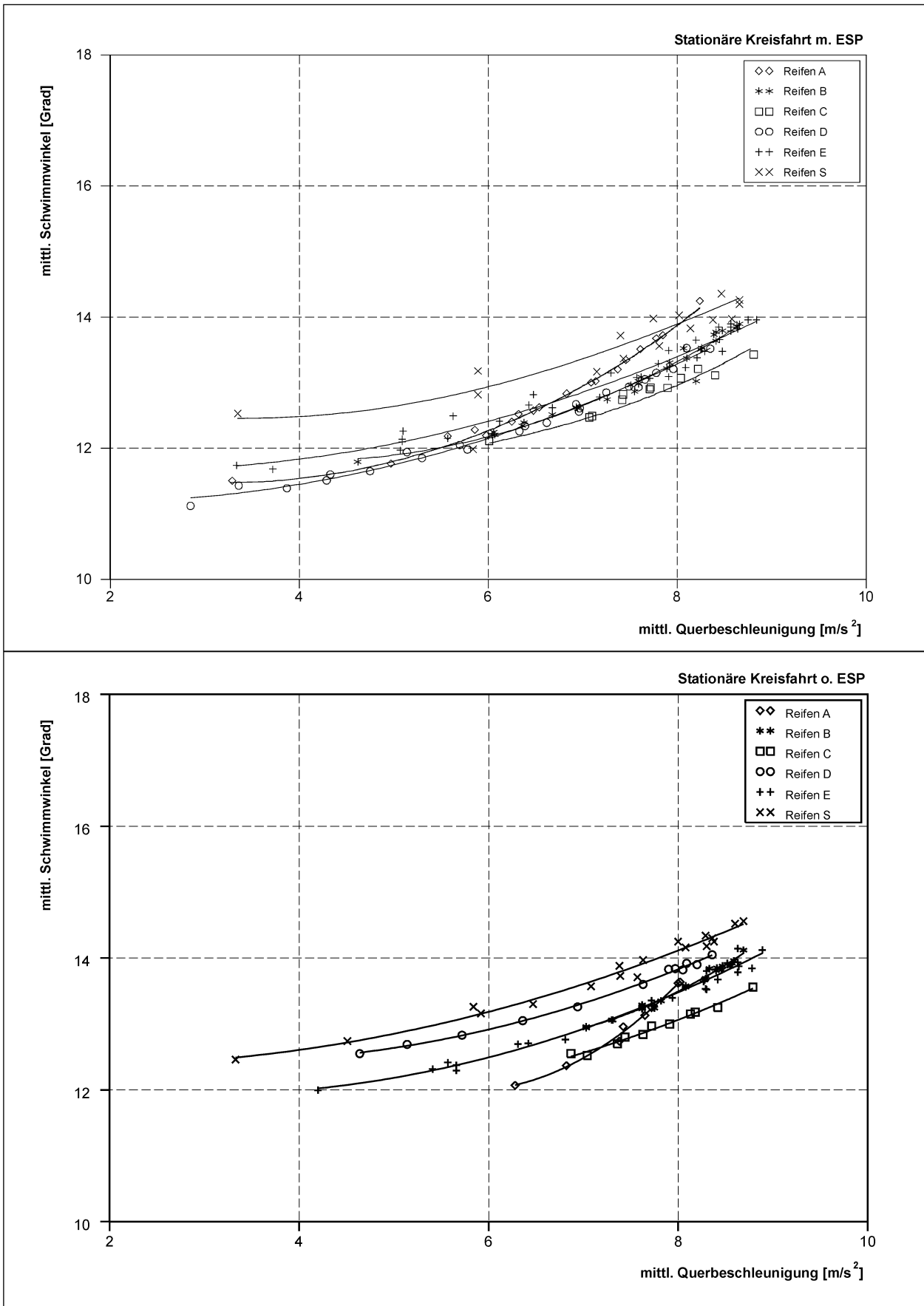


Bild 3.12: Mittlerer Schwimmwinkel in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung für verschiedene Reifen bei stationärer Kreisfahrt (druckbehaftet, mit/ohne ESP)

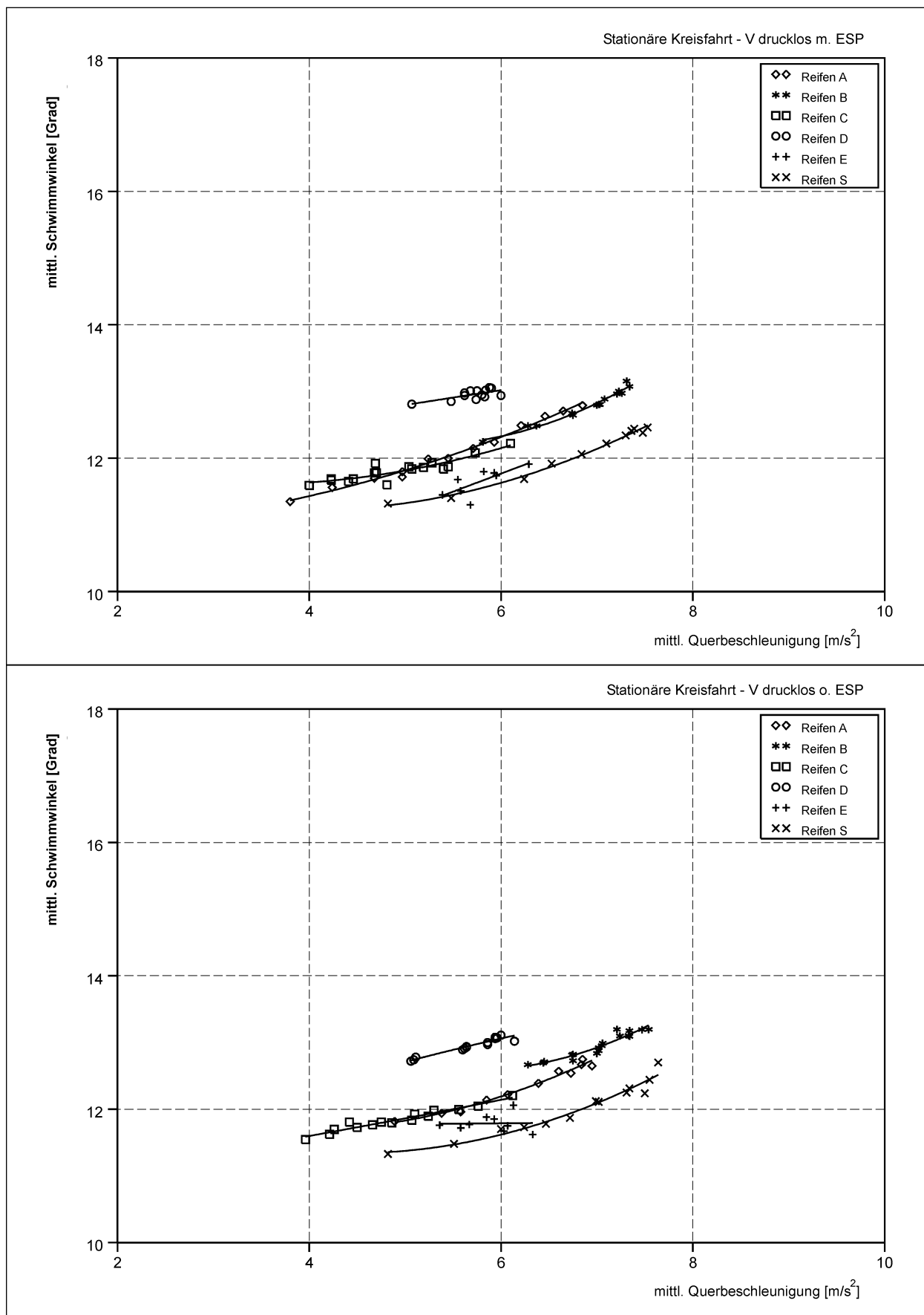


Bild 3.13: Mittlerer Schwimmwinkel in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung für verschiedene Reifen bei stationärer Kreisfahrt (vorne drucklos, mit/ohne ESP)

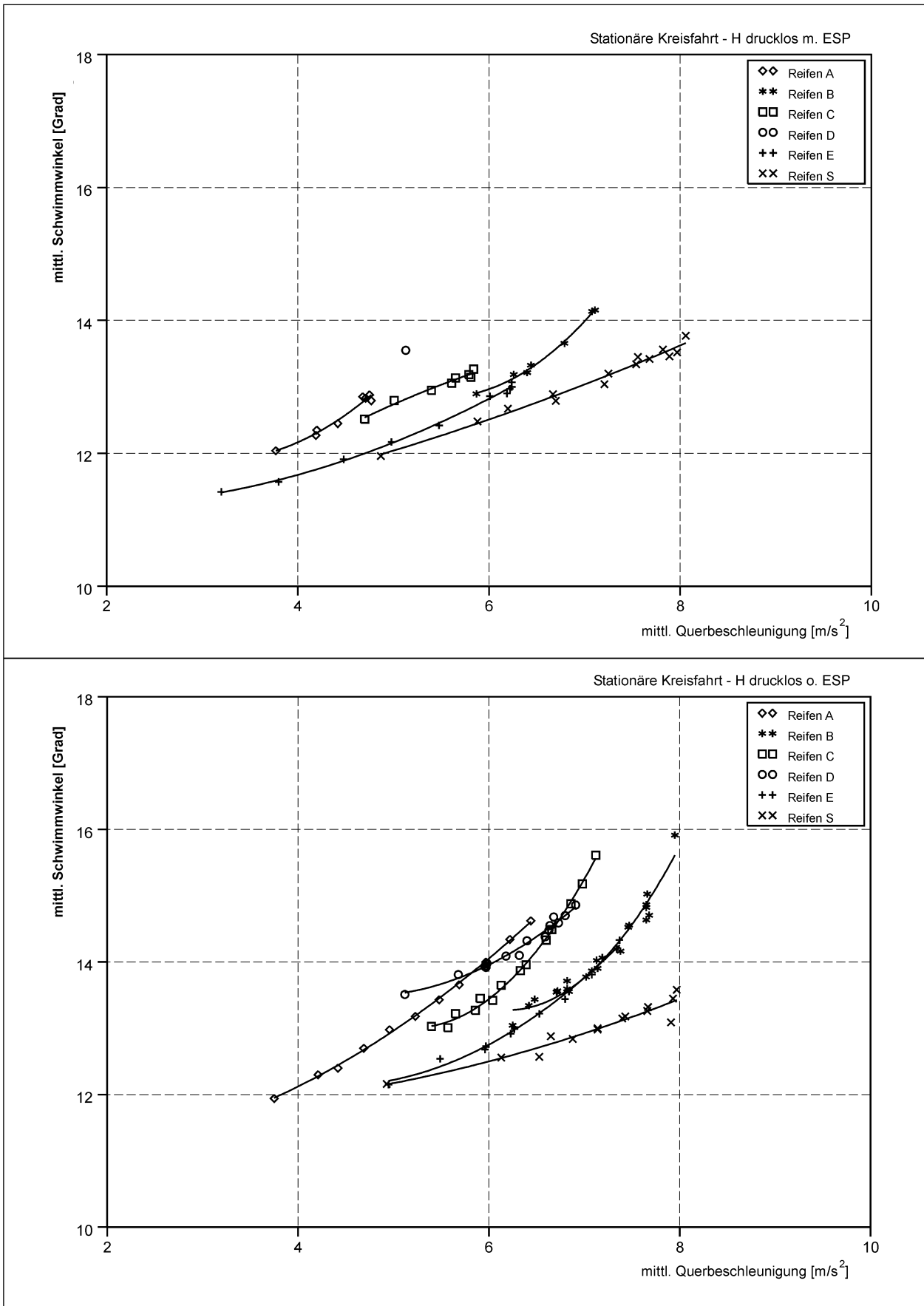


Bild 3.14: Mittlerer Schwimmwinkel in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung für verschiedene Reifen bei stationärer Kreisfahrt (hinten drucklos, mit/ohne ESP)



Bild 3.15: Laufflächenablösung durch hohe Beanspruchung bei stationärer Kreisfahrt

der Kreis also schneller durchfahren lässt. ESP nimmt Geschwindigkeit aus der Fahrt heraus, was für die Fahrsicherheit hilfreich ist, da das Fahrzeug während des Übersteuerns als Folge des drucklosen Hinterreifens im Allgemeinen schwerer zu beherrschen ist. Der Standardreifen mit 0,7 bar zeigt nahezu keine Beeinflussung der maximalen Querschleunigung durch die Fahrdynamikregelung.

Zur Beurteilung der Fahrstabilität ist insbesondere der Schwimmwinkel eine aussagekräftige Größe. Der Schwimmwinkel bezeichnet den Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Richtung des Geschwindigkeitsvektors des Fahrzeugs. Die Bilder 3.12–3.14 zeigen den mittleren Schwimmwinkel in Abhängigkeit von der Querschleunigung für alle Reifentypen und Versuchsdesigns. Insgesamt wächst der Schwimmwinkel mit steigender Querschleunigung.

Bei Normaldruck zeigen sich mit ESP kaum Unterschiede zwischen den Reifen. Erst bei ausgeschalteter Fahrdynamikregelung lassen sich die Kurven voneinander trennen. Insgesamt bewegt sich der Schwimmwinkel für die Run-Flat-Reifen unter 14° , das Fahrzeug lässt sich gut beherrschen, was für den druckbehafteten Fall selbstverständlich ist.

Bei entlüftetem Vorderrad zeigt Reifen D einen gegenüber den übrigen Reifen erhöhten Schwimmwinkel. Dieser beträgt bei 6 m/s^2 aber immer noch nur 13° . Das Fahrzeug ist bis auf das zum Teil starke Untersteuern gut beherrschbar. Auch hier hat die Fahrdynamikregelung so gut wie keinen Einfluss auf den Schwimmwinkel.

Erst bei entlüftetem Hinterreifen und ausgeschalteter Fahrdynamikregelung zeigen sich größere Schwimmwinkel von bis zu 16° . Hier zeigt sich für die Run-Flat-Reifen auch ein stärkerer Anstieg des Schwimmwinkels mit wachsender Querschleunigung. Die Kurven für die einzelnen Reifen grenzen sich deutlich voneinander ab.

Während der Versuche zur stationären Kreisfahrt kam es bei einem Reifen zu Schädigungen auf Grund der großen Beanspruchung und Wärmeentwicklung durch permanentes Fahren mit hohen Querschleunigungen. Bei diesem Reifen hat sich die Lauffläche komplett abgelöst (siehe Bild 3.15), sodass die Versuchsfahrt abgebrochen werden musste.

3.4.2 Stationäre Kreisfahrt mit zusätzlicher plötzlicher Entlüftung

Die Versuche mit plötzlicher Entlüftung eines Reifens wurden aus der stationären Kreisfahrt (20-m-Radius) heraus durchgeführt. Während der Schnellentlüftung war das Lenkrad in der Ausgangsposition festzuhalten und auch die Gaspedalstellung beizubehalten, sodass allein die Fahrzeugreaktion auf den plötzlichen Luftverlust bestimmt werden konnte. Es wurde pro Versuch jeweils nur am vorderen oder hinteren kurvenäußeren Rad entlüftet. Die Versuche wurden mit und ohne ESP durchgeführt. Da die speziell für die Schnellentlüftung konstruierte Felge verwendet werden musste, wurde das Messprogramm hier nur für die vier selbsttragenden Reifen absolviert.

Das Fahrzeug zeigte bei Entlüften des Vorderrades deutliches Untersteuern, was zu einem Verlassen der Kreisbahn nach außen hin führte. Für den Fall ohne ESP sind in Bild 3.16a die Bahnkurven des Fahrzeugs ab dem Moment der Entlüftung für die vier vermessenen Reifen aufgetragen. Deutlich sind Pfadabweichungen von der ursprünglichen Kreisbahn zu erkennen.

Bei plötzlicher Entlüftung des hinteren Reifens war die Fahrzeugreaktion heftiger. Es kam zum Übersteuern des Fahrzeugs. Bild 3.16b zeigt die zu-

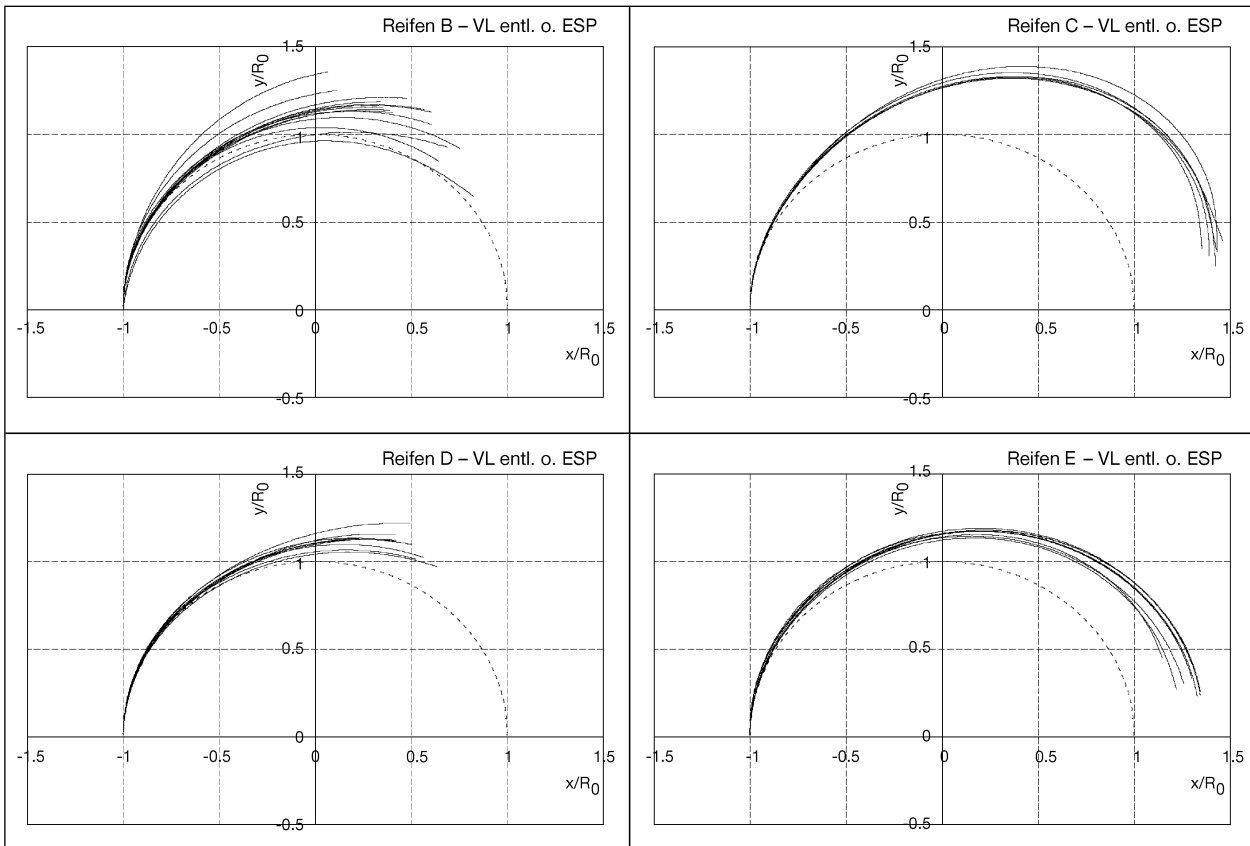


Bild 3.16a: Bahnkurven des Fahrzeugs ab dem Moment der Schnellentlüftung am Vorderrad (ohne ESP)

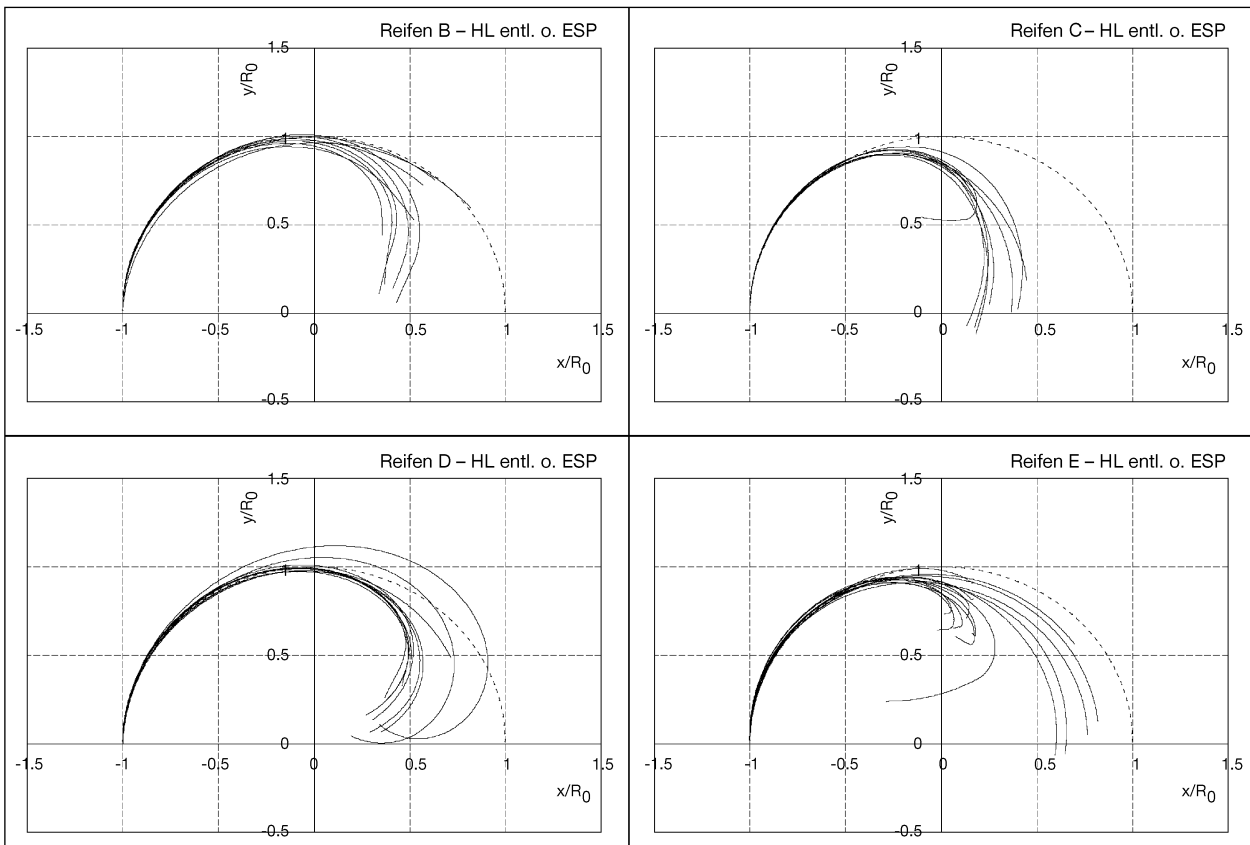


Bild 3.16b: Bahnkurven des Fahrzeugs ab dem Moment der Schnellentlüftung am Hinterrad (ohne ESP)



Bild 3.17: Verformung des Reifens nach plötzlichem Luftverlust

gehörigen Bahnkurven für Fahrten ohne ESP. Grundsätzlich war die Tendenz zum Eindrehen bei höheren Anfahrgeschwindigkeiten höher. Im Vergleich zwischen den Reifen zeigen sich unterschiedlich starke Effekte als Reaktion auf den Luftverlust. Zum Teil liegen die Bahnkurven für unterschiedliche Geschwindigkeiten nahe beieinander, zum Teil ist ein Auffächern der Bahnenschar zu verzeichnen. Auch das Verlassen der ursprünglichen Kreisbahn erfolgt je nach Reifen unterschiedlich spät. So zeigt Reifen C bei zurückgelegten 90° eine Fahrspur weit innerhalb des Ausgangskreises, bei Reifen D erfolgt die Reaktion erst bei wesentlich größeren Winkeln. Zusätzlich zum Verlassen der Kreisbahn kommt zum Teil auch noch eine Drehung des Fahrzeuges um die Hochachse hinzu, was bei Reifen E zu hakenförmigen Bahnen führt; das Fahrzeug dreht sich zum Schluss des Versuches nahezu auf der Stelle.

Mit eingeschalteter Fahrdynamikregelung gestaltet sich die Fahrzeugreaktion weniger ausgeprägt. Das ESP hilft bei plötzlichem Druckverlust, den gewünschten Kurs halbwegs zu halten, bzw. bremst das Fahrzeug beim Übersteuern radikal ab. Es treten jedoch auch hier eindeutige Pfadabweichungen nach außen (bei Druckverlust am kurvenäußeren Vorderrad) bzw. innen (bei Druckverlust am kurvenäußeren Hinterrad) auf.

Durch die ausgeprägten Fahrzeugbewegungen nach der Schnellentlüftung wirken auf den entleerten Reifen starke Kräfte ein, die diesen verformen und ihn von der Felge zu ziehen versuchen. Wie die Standbilder in Bild 3.17 zeigen, wird der Reifen mehrere cm nach innen gezogen und das Felgenhorn berührt fast die Fahrbahnoberfläche. Im weiteren Verlauf der Fahrt kommt es zu Faltungen der Lauffläche des drucklosen Reifens. Nach dem Ende



Bild 3.18: Nach innen gestülpter Reifen nach Messfahrt mit Schnellentlüftung

der Beanspruchung springt der Reifen letztlich wieder zurück auf die Felge. Dies stellt für diese extremen Bedingungen optimales Verhalten dar.

Während des normalen Versuchsprogramms mit Neureifen kam es bei der Schnellentlüftung zu keinem Abwurf des Reifens von der Felge. Bei einer Messfahrt mit einem Reifen, der durch eine Vielzahl von Fahrversuchen vorgeschädigt war, konnte man dieses Phänomen jedoch beobachten (s. Bild 3.18).

Im Folgenden wird auf die wesentlichen Messgrößen zur Beurteilung des Fahrverhaltens bei der Schnellentlüftung im Detail eingegangen.

Wie die oben gezeigten Bahnkurven verdeutlichen, verlässt das Fahrzeug wegen des plötzlichen Druckverlustes die ursprüngliche Fahrspur. Es bietet sich daher an, die Abweichung vom Ausgangskreis zu untersuchen. Bild 3.19 stellt die Pfadabweichung gegenüber der ab dem Beginn der Ent-

lüftung zurückgelegten Strecke dar, hier beispielhaft für eine Entlüftung am Hinterrad bei aktiver Fahrdynamikregelung. In Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit fächert sich die Kurvenschar mit fortschreitender Strecke auf.

Um die Versuche vergleichen zu können, ist es sinnvoll, die Pfadabweichung nach einer bestimmten Wegstrecke festzuhalten. Als geeigneter Wert hat sich für die durchgeführten Messfahrten 40 m nach dem Öffnen der Entlüftungsmechanik herausgestellt. In den Bildern 3.20 und 3.21 ist die Pfadabweichung bei 40 m gegenüber der Anfangsgeschwindigkeit aufgetragen. Die Bilder beziehen sich auf eine Entlüftung des hinteren Reifens, wobei ESP

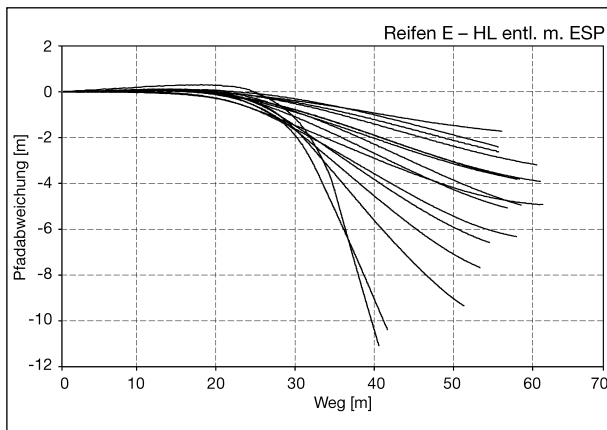


Bild 3.19: Pfadabweichung in Abhängigkeit zur zurückgelegten Strecke nach Schnellentlüftung

einmal an- und einmal abgeschaltet war. Für die Fahrten mit ESP zeigt sich in der Regel eine Zunahme der Pfadabweichung mit wachsender Geschwindigkeit zum Inneren des Kreises hin. Dabei werden Unterschiede in der Pfadabweichung zwischen den Reifen deutlich. Bei Reifen D tritt nahezu keine Pfadabweichung auf, bei anderen Reifen sind es über 5 m Abweichung bei Geschwindigkeiten über 45 km/h. Für den Fall ohne ESP sehen die Abhängigkeiten etwas anders aus, da kein Bremsengriff erfolgt, der das Eindrehen des Fahrzeugs bei festgehaltenem Lenkradwinkel begünstigt. Für Geschwindigkeiten nahe 50 km/h zeigt sich dadurch die Tendenz, dass die Pfadabweichung wieder abnimmt.

Zusätzlich zur Abweichung von der ursprünglichen Bahnkurve zeigt das Fahrzeug als Reaktion auf die Schnellentlüftung eine Änderung der Gierrate gegenüber der während der Anfahrt herrschenden konstanten Gierrate. Der Maximalwert dieser Änderung im Versuchsverlauf stellt ein Maß dafür dar, wie heftig die Gierbewegung ausfällt, und gibt damit Auskunft über die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs in der Situation eines Reifenplatzers bei Kurvenfahrt. Bild 3.22 stellt diese Differenz der Gierrate in Abhängigkeit von der zu Beginn des Tests gefahrenen Geschwindigkeit dar. Es zeigt sich, dass es insbesondere mit den Reifen C und E zu stärkeren Gierratenänderungen kommt, wobei bei Reifen E wiederum eine Abnahme der Ausprä-

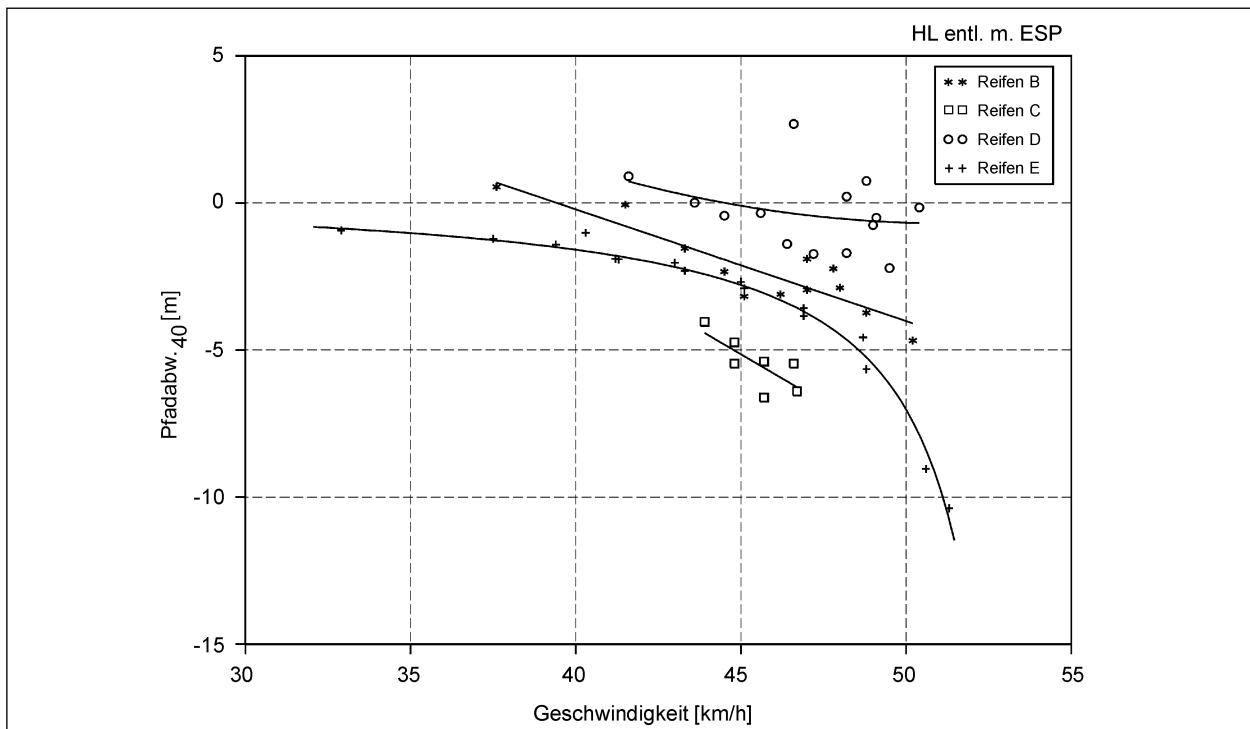


Bild 3.20: Pfadabweichung nach 40 m in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Schnellentlüftung am Hinterrad (mit ESP)

gung der Drehbewegung bei Geschwindigkeiten über 45 km/h auftritt.

Es ist nun nahe liegend, die bisher dargestellten Kenngrößen Pfadabweichung und Gierratendiffe-

renz zur Differenzierung der Fahrzeugreaktion zusammenzufassen und das Produkt der beiden Größen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu betrachten. Dies ist in Bild 3.23 für Reifen B und in

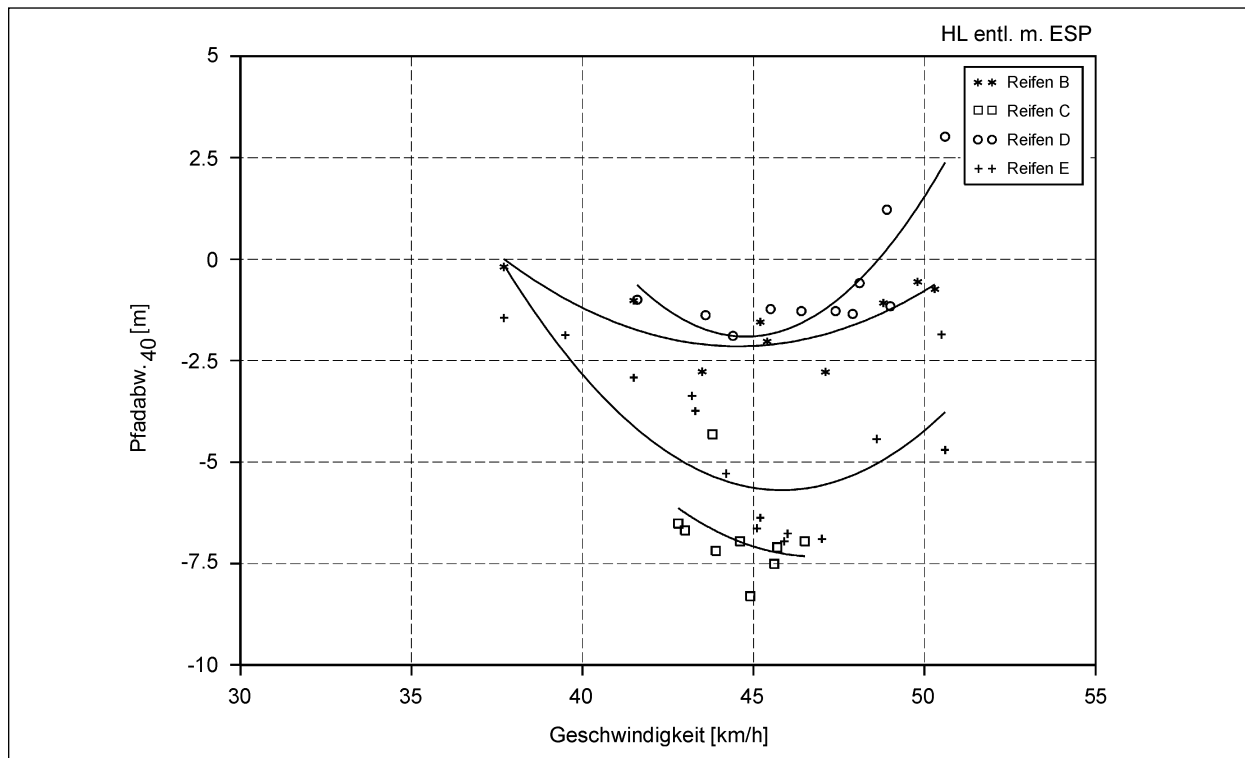


Bild 3.21: Pfadabweichung bei 40 m in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Schnellentlüftung am Hinterrad (ohne ESP)

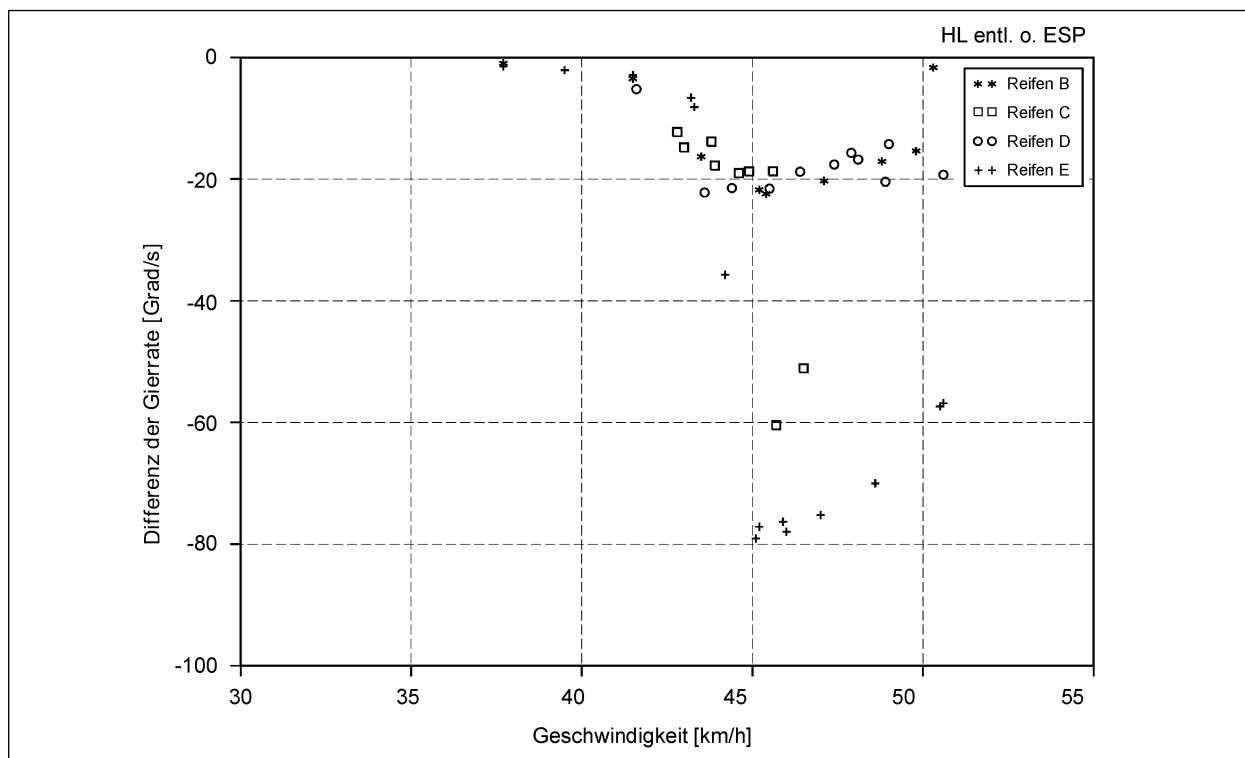


Bild 3.22: Differenz der Gierrate bei Schnellentlüftung hinten ohne ESP

Bild 3.24 für Reifen C erfolgt. Vergleicht man beide Bilder, so ergeben sich für Reifen C generell höhere Werte als für Reifen B. Innerhalb des Bildes 3.24 sind deutlich die Unterschiede zwischen den Versuchsarten (mit/ohne ESP, vorne/hinten schnell-

entlüftet) zu erkennen. Fahrten mit ausgeschalteter Fahrdynamikregelung und Schnellentlüftung am Hinterrad führen bei Reifen C zu extremen Werten von $400 \text{ m} \cdot \text{Grad/s}$.

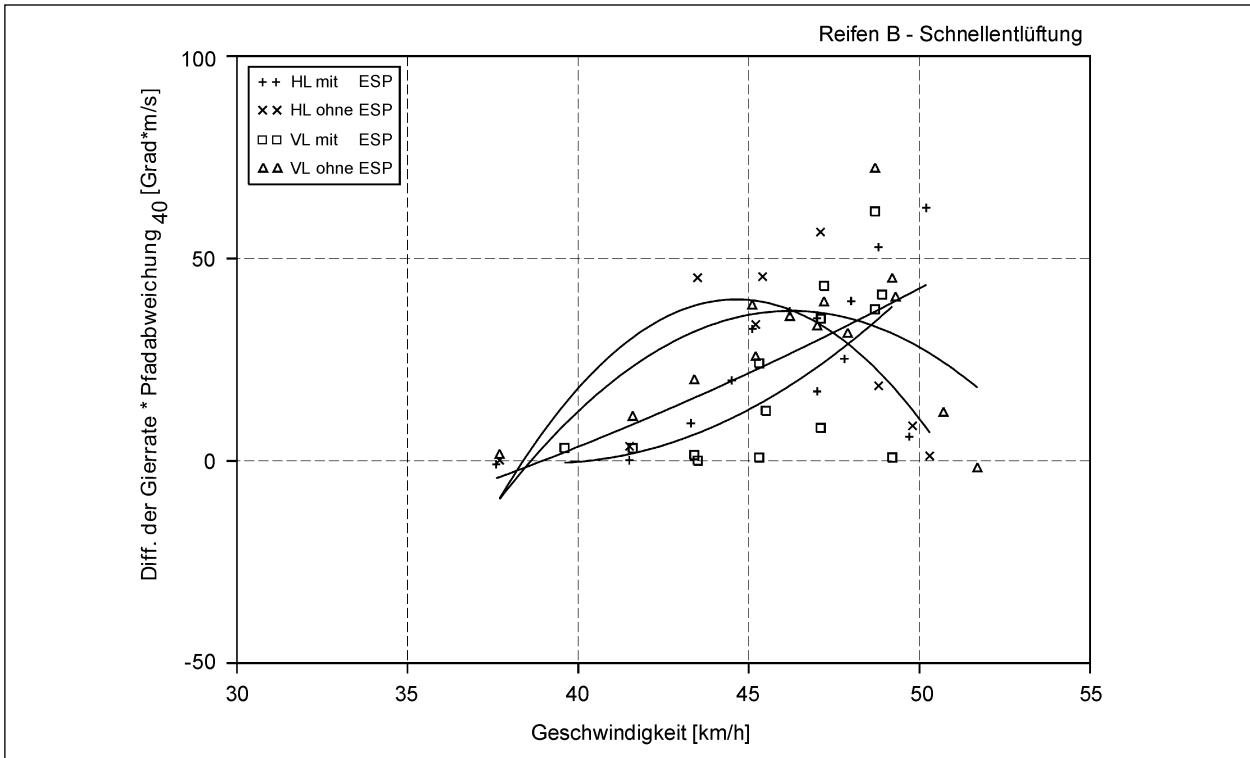


Bild 3.23: Produkt aus Gierratendifferenz und Pfadabweichung für Reifen B

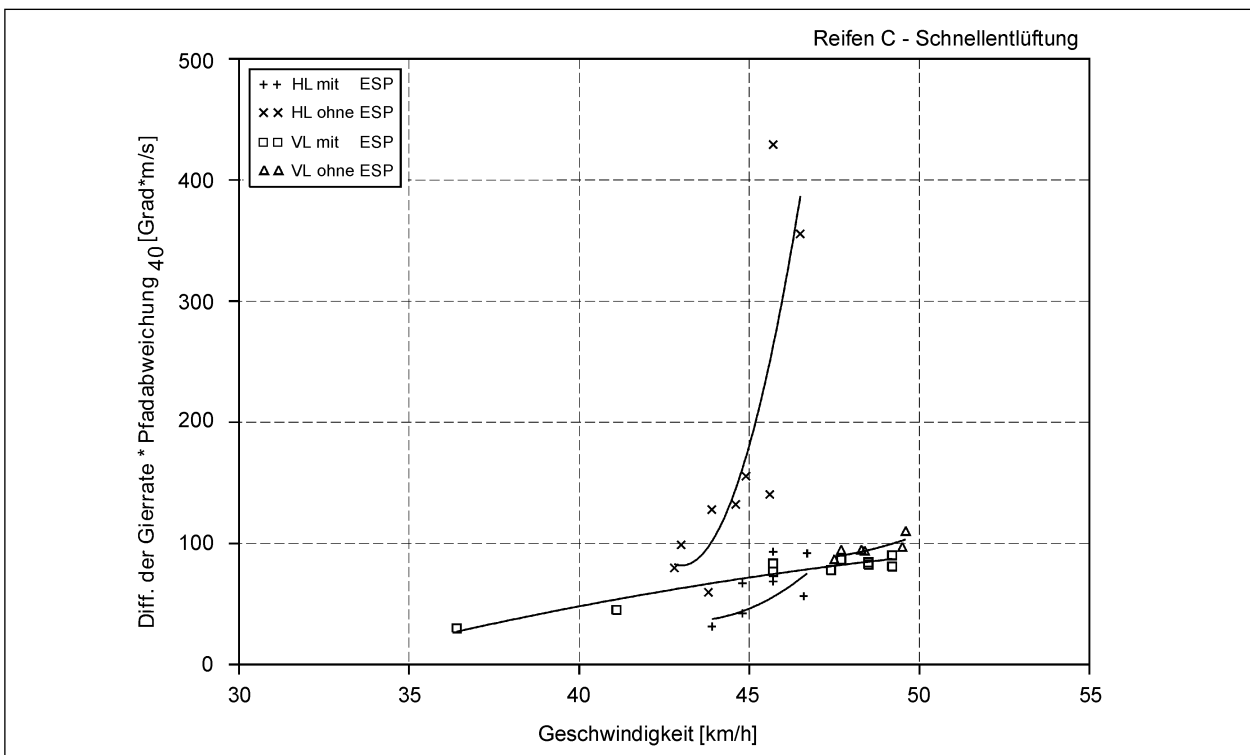


Bild 3.24: Produkt aus Gierratendifferenz und Pfadabweichung für Reifen C

Eine weitere wichtige Größe zur Beurteilung der Fahrstabilität ist der Schwimmwinkel. Entsprechend der Gierrate ist bei der Schnellentlüftung maßgebend, inwieweit sich der Schwimmwinkel gegenüber seinem Ausgangswert bei stationärer

Kreisfahrt ändert, sodass wiederum die maximale Differenz zum Anfangswert betrachtet wird. In den Bildern 3.25 und 3.26 ist die Schwimmwinkeldifferenz gegenüber der Anfangsgeschwindigkeit für Entlüftung am Vorderrad aufgetragen für die

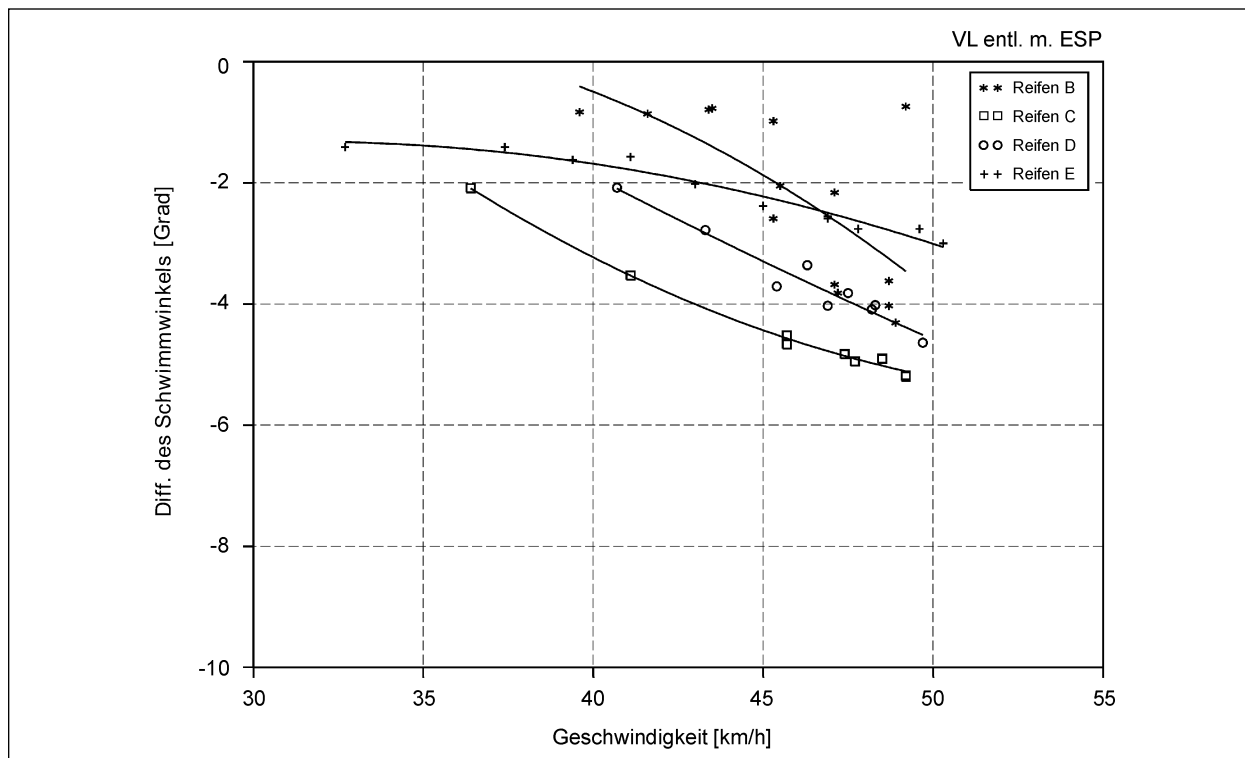


Bild 3.25: Schwimmwinkeldifferenz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Schnellentlüftung vorne mit ESP

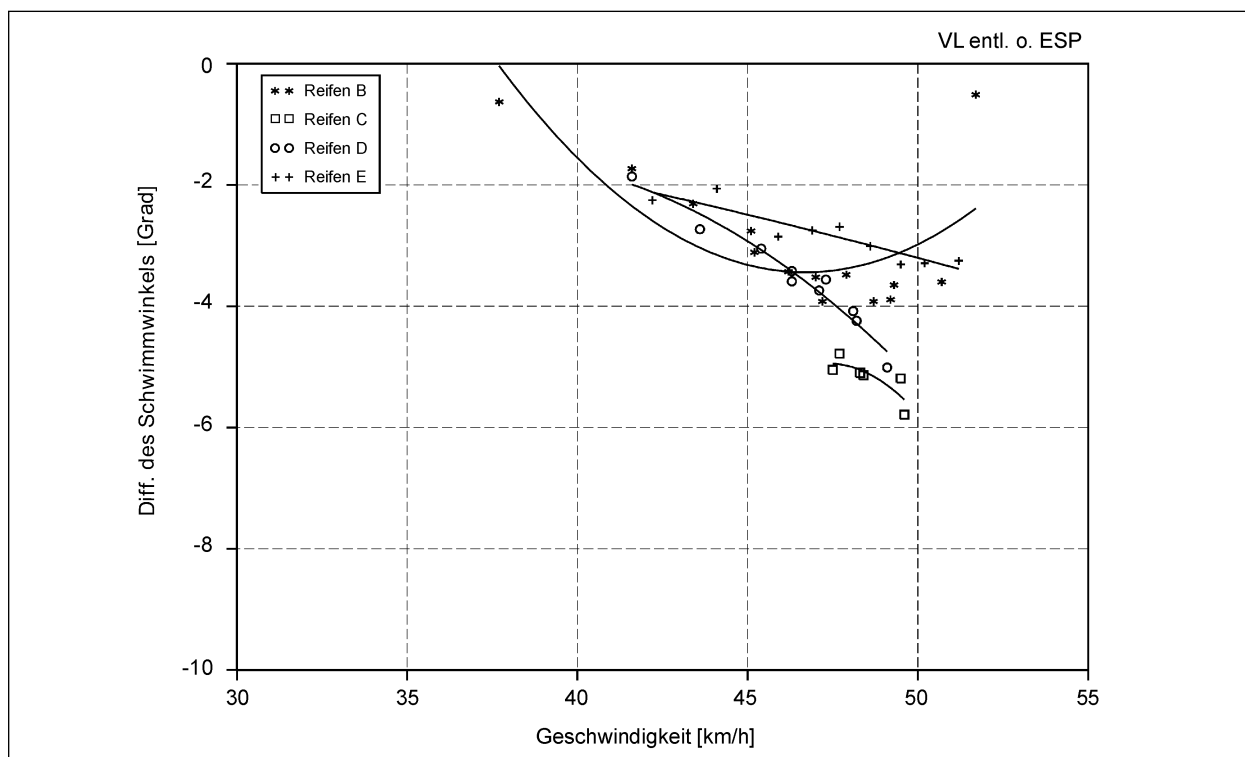


Bild 3.26: Schwimmwinkeldifferenz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Schnellentlüftung vorne ohne ESP

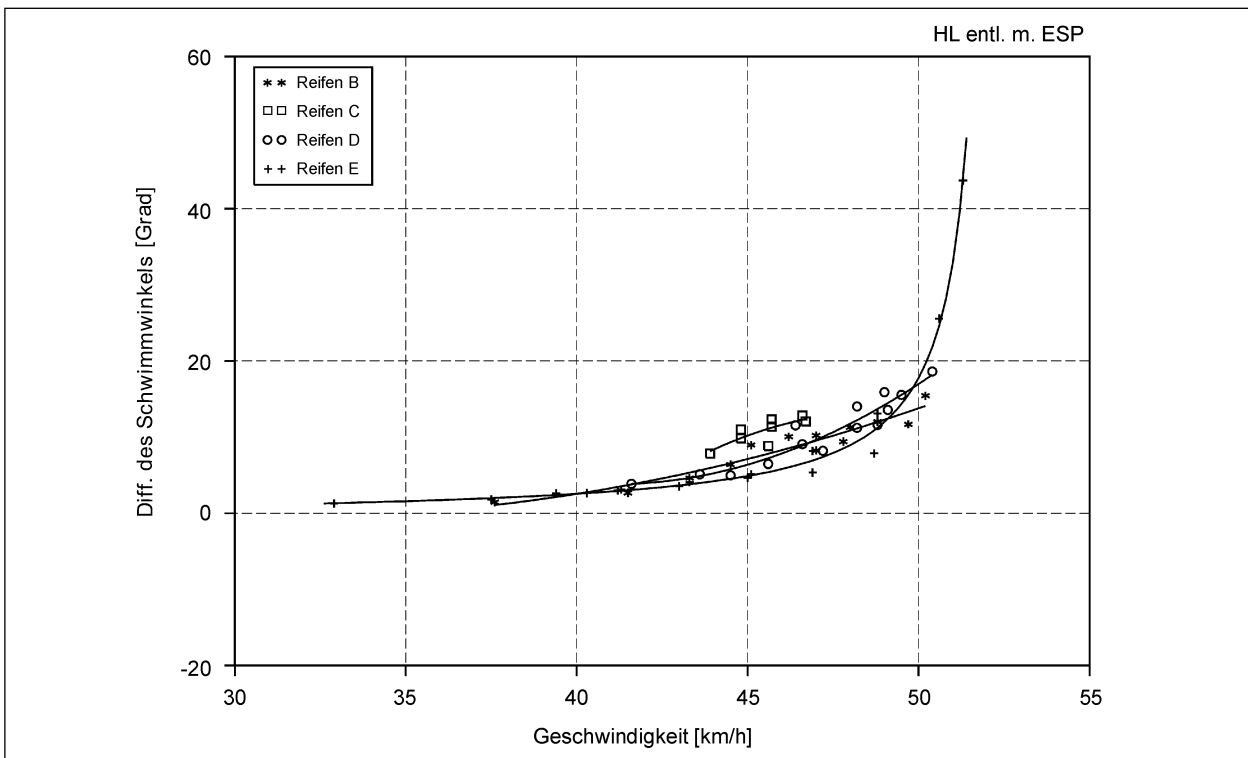


Bild 3.27: Schwimmwinkeldifferenz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Schnellentlüftung hinten mit ESP

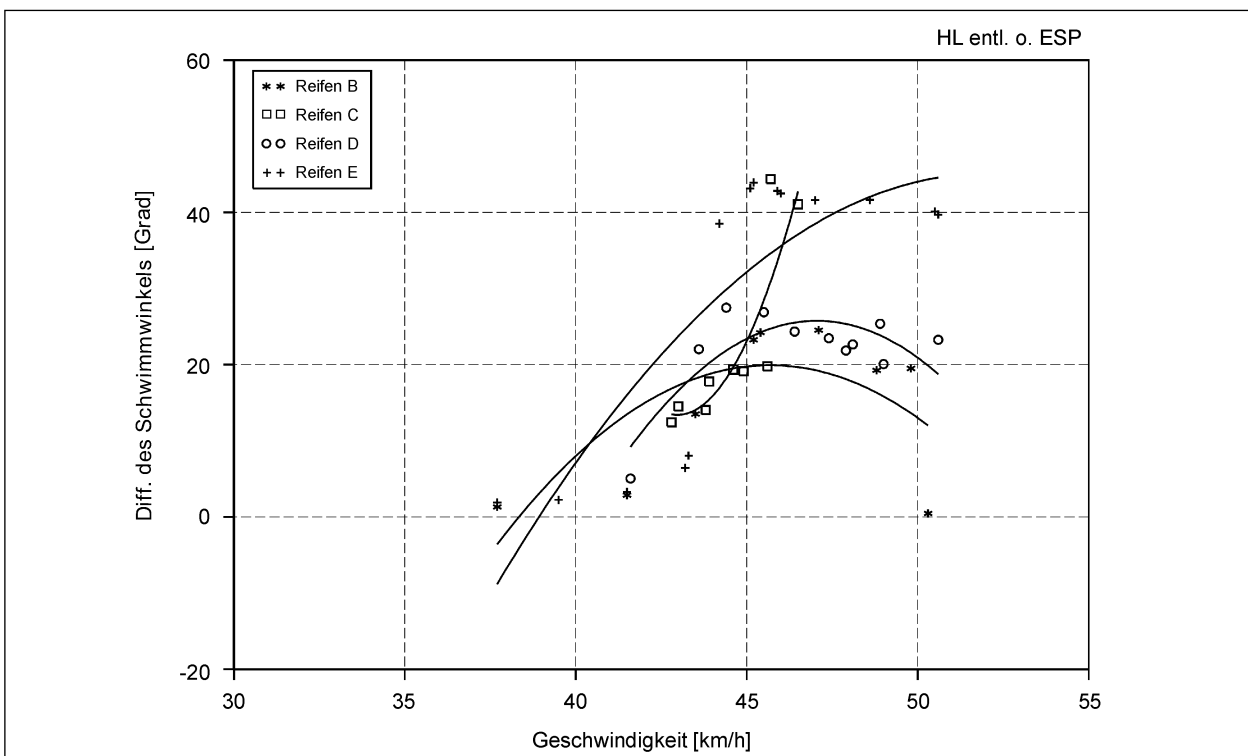


Bild 3.28: Schwimmwinkeldifferenz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Schnellentlüftung hinten ohne ESP

Fälle mit und ohne ESP. Bei beiden Versuchsdesigns erreicht die Schwimmwinkeländerung kaum Werte von 5° . Leichte Unterschiede zwischen den Reifen sind festzustellen. Der Einfluss von ESP ist gering.

Die Bilder 3.27 und 3.28 zeigen die gleichen Zusammenhänge für die Entlüftung am Hinterrad. Die Schwimmwinkeländerungen sind wesentlich größer als bei den Versuchen mit Schnellentlüftung am Vorderrad. Mit ESP sind kaum Unterschiede zwi-

schen den Reifen auszumachen. Ohne ESP sind die Schwimmwinkeldifferenzen im Versuchsverlauf noch einmal größer. Für diese Versuchsreihen lassen sich die Reifen auch deutlich voneinander abgrenzen.

Insgesamt zeigt sich bei den Versuchen mit Schnellentlüftung, dass das Fahrzeug mit Run-Flat-Reifen beherrschbar bleibt. Mit leichten Lenkmanövern ist es möglich, das Fahrzeug auf dem gewünschten Kurs zu halten. Eine Fahrdynamikregelung trägt dazu bei, dass die Fahrzeugreaktionen zusätzlich abgemildert werden. Erst bei extremen Querbesehleunigungen und auch nur bei Entlüftung des Hinterrades kommt es bei ausgeschalteter Fahrdynamikregelung zu nicht mehr kontrollierbaren Fahrzeugreaktionen. Zwischen den Reifen bestehen Unterschiede, was den Zeitpunkt der Reaktion auf das Entlüftungsereignis angeht sowie die Ausprägung der Fahrzeugbewegung. Dies lässt sich auf die Auslegung der Reifen und deren Eigenschaften wie Reifenbreite oder -steifigkeit zurückführen. Ein Abwerfen des Reifens von der Felge wird durch die Run-Flat-Reifen in der Regel verhindert, dies fand nur bei einem Versuch mit vorgeschädigtem Reifen statt. Der Versuch der Schnellentlüftung stellt ein geeignetes Verfahren dar, Unterschiede in den Fahrzeugreaktionen auf Reifenplatzer herauszuarbeiten. Als wesentliche Kenngrößen können dabei sowohl Pfadabweichung, Gierratenänderung als auch Schwimmwinkeländerung dienen.

3.4.3 Bremsen geradeaus

Bremsungen aus Geradeausfahrt heraus wurden nur ohne Fahrdynamikregelung durchgeführt, da diese bei Testmessungen keinen Einfluss auf den Versuchsverlauf zeigte. Die Versuchsgeschwindigkeiten reichten bis an 80 km/h heran. Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit verschiedenen Reifen und Druckzuständen wurde eine Geschwindigkeit von 75 km/h gewählt, da für diese für alle Messfahrten ausreichend Datenpunkte vorhanden waren. Zur Beurteilung des Bremsvermögens und der Fahrstabilität beim Bremsen wurden die mittlere Verzögerung sowie die bei der Bremsung auftretende maximale Gierrate herangezogen. Die mittlere Verzögerung wurde bestimmt vom Zeitpunkt der Bremspedalbetätigung bis zum Erreichen von 0,5 km/h. Es wurde immer mit möglichst großer Bremskraft verzögert.

Bild 3.29 zeigt die mittlere Verzögerung für die verschiedenen Versuchsdesigns. Bei entlüftetem Vor-

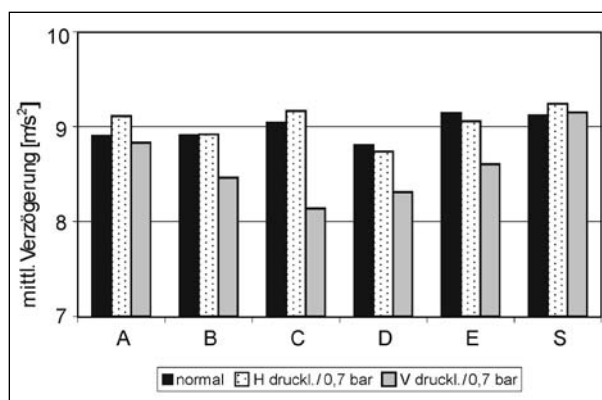


Bild 3.29: Mittlere Verzögerung für Bremsungen aus 75 km/h

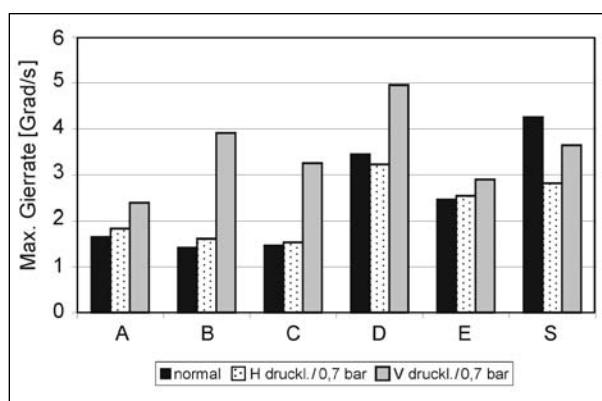


Bild 3.30: Maximale Gierrate beim Bremsen geradeaus

derrad treten etwas geringere Verzögerungen auf, dies zeigt sich insbesondere an Reifen C. Bei drucklosem Hinterrad ist die Verzögerung ähnlich wie bei Normaldruck. Dies verwundert nicht, da durch die dynamische Radlastverlagerung der Großteil der Kraft über die Vorderachse erbracht wird. Beim Standardreifen werden auch bei auf 0,7 bar reduziertem Druck noch Verzögerungen über 9 m/s² erreicht.

In Bild 3.30 ist die maximale Gierrate der entsprechenden Bremsversuche dargestellt. Die Gierrate blieb in allen Fällen unter 5°/s. Unterschiede zwischen den Reifen bestehen kaum. Auch der Druckverlust hat nahezu keinen Einfluss.

Die Run-Flat-Reifen zeigen also selbst im drucklosen Zustand noch gute Bremseigenschaften. Die Fahrstabilität war in allen Fällen gegeben.

3.4.4 Bremsen in der Kurve

Das Manöver „Bremsen in der Kurve“ wurde bei einem Kreisbahnradius von 30 m durchgeführt. Drucklos war jeweils nur ein Reifen auf der kurvenäußeren Seite. Die Versuche wurden je nach

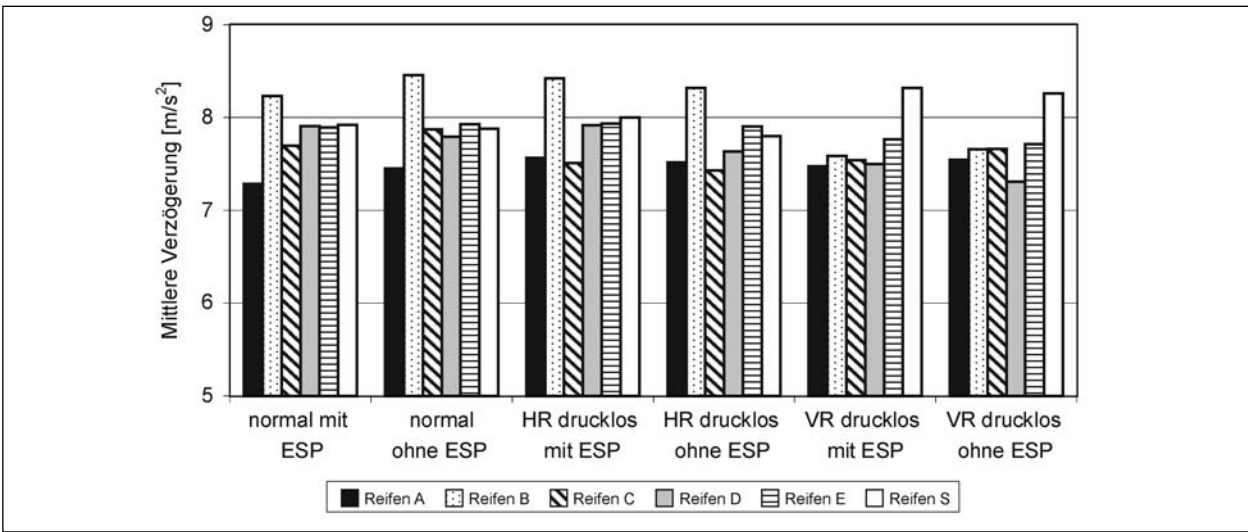


Bild 3.31: Mittlere Verzögerung beim Bremsen in der Kurve aus 50 km/h

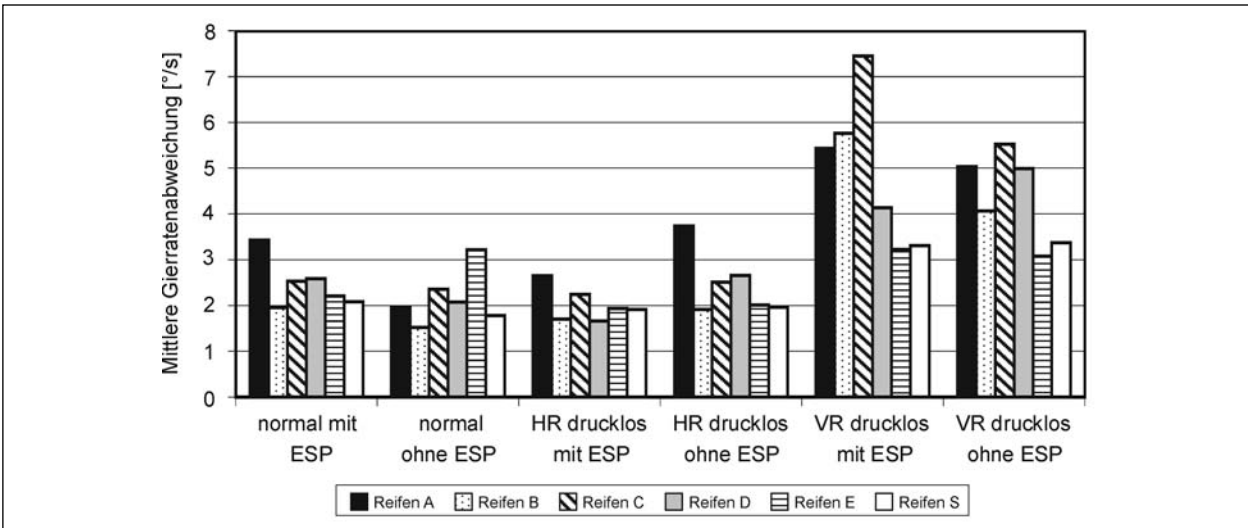


Bild 3.32: Mittlere Gierratenabweichung beim Bremsen in der Kurve aus 50 km/h

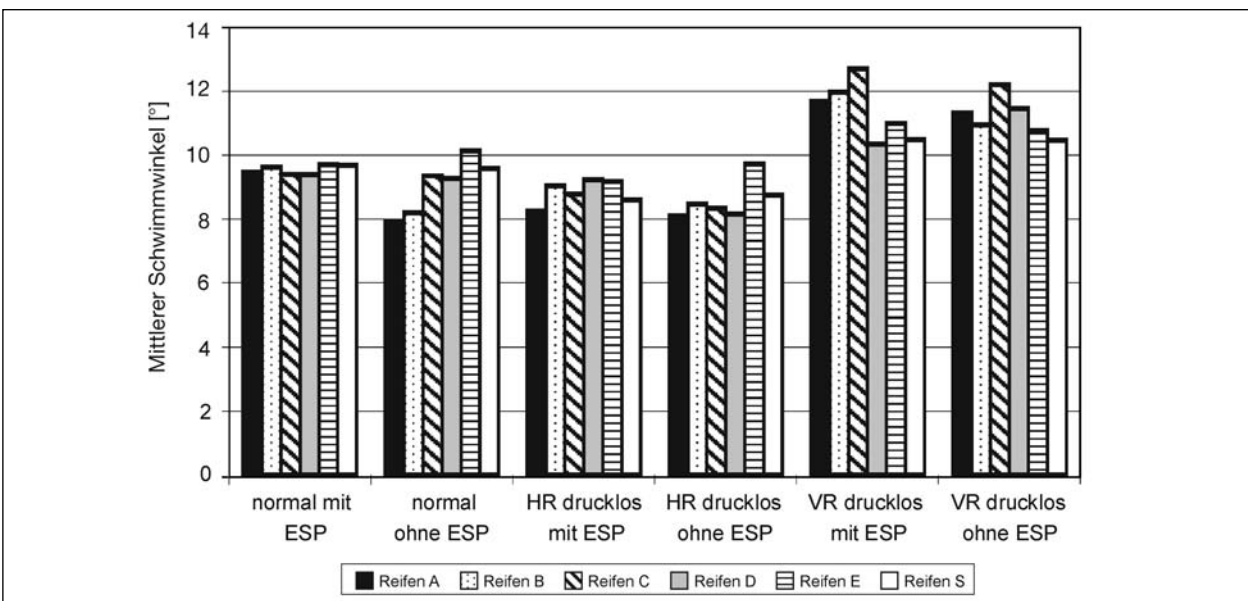


Bild 3.33: Mittlerer Schwimmwinkel beim Bremsen in der Kurve aus 50 km/h

Bedingung bei Geschwindigkeiten zwischen 40 km/h und 60 km/h durchgeführt. Zunächst wurden die Messwerte mit Hilfe von Regressionskurven verbunden. Zum Vergleich der Versuchsreihen wurde dann die Geschwindigkeit von 50 km/h ausgewählt. Für diese Geschwindigkeit sind die mittlere Verzögerung für die Bremsungen (Bild 3.31), die mittlere Gierratenabweichung (Bild 3.32) und der mittlere Schwimmwinkel (Bild 3.33) dargestellt.

Bei der mittleren Verzögerung sind geringe Unterschiede zwischen den Reifen festzustellen. Schon im druckbehafteten Zustand erreicht Reifen A eine geringere Verzögerung als die anderen, Reifen E erreicht gute Verzögerungswerte bei Normaldruck und Entlüftung hinten. Im Mittel sind die Verzögerungen bei Entlüftung am Vorderrad leicht geringer. Nur der Standardreifen, der mit 0,7 bar betrieben wurde, zeigt bei Druckminderung vorne ähnliche Verzögerungswerte wie bei Normaldruck.

Ein Einfluss der Fahrdynamikregelung ist nicht zu erkennen.

Die mittlere Gierratenabweichung gibt Auskunft über die Gierbewegung des Fahrzeugs während der Bremsung. Die Gierratenabweichung wurde wie folgt bestimmt: Ausgangspunkt ist eine Referenzierrate, die sich zu jeder Zeit aus dem Quotienten von aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit und vorgegebenem Bahnradius von 30 m ergibt. Um die Gierratenabweichung zu erhalten, wird die tatsächliche Gierrate von der Referenzierrate abgezogen und der Betrag gebildet. Zum Schluss wird diese Größe über den Bremsvorgang gemittelt. Wie in Bild 3.32 dargestellt, zeigt sich, dass die mittlere Gierratenabweichung vor allem bei den Versuchen mit entlüftetem Vorderrad erhöht ist. Dieses Manöver wies auch die stärksten Fahrzeugreaktionen auf. Hier zeigen sich auch deutliche Unterschiede zwischen den Reifen.

Bild 3.33 zeigt den mittleren Schwimmwinkel während des Bremsvorganges. Dieser war ebenfalls bei den Manövern mit entlüftetem Vorderrad am größten. Unterschiede zwischen Run-Flat-Reifen und Standardreifen sind nicht zu beobachten.

Insgesamt zeigt sich beim Bremsen in der Kurve, dass gute Verzögerungswerte erreicht werden. Lediglich bei entlüftetem Vorderrad zeigen sich erhöhte Gierratenabweichungen. Das Fahrzeug war jedoch jederzeit beherrschbar.

3.4.5 Doppelter Spurwechsel (VDA-Gasse)

Für den doppelten Spurwechsel wurde die in ISO 3888-2 (Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance) [66] beschriebene Fahrspur verwendet. Diese Fahrspur ist in Deutschland auch als VDA-Gasse bekannt. Die gesamte Länge der Gasse beträgt 61 m. Bild 3.34 zeigt die Abmessungen des Parcours und die Positionen der zur Markierung der Strecke zu verwendenden Leitkegel. Die Fahrspur nach ISO 3888-2 beschreibt einen abrupten Wechsel auf eine Parallelspur nach links und wieder zurück in die Ausgangsspur. Dabei sind die geraden Strecken zwischen den Spurwechseln, in denen sich das Fahrzeug stabilisieren kann, sehr kurz (13,5 m und 12,5 m). Der Test ermöglicht somit eine Einschätzung der Fahrdynamik des Versuchsfahrzeugs hinsichtlich der Lateralstabilität. 2 m nach Beginn der ersten Gasse nimmt der Fahrer das Gas weg, sodass bei dem verwendeten Automatikgetriebe das Fahrzeug in Getriebestellung D durch die Gassen rollt. Der Test gilt als gültig absolviert, wenn keine der Pylonen verschoben wurden. Als Anfahrtschwindigkeit wird die Geschwindigkeit beim Loslassen des Gaspedals genommen.

War bei den Versuchen ein Reifen entlüftet, so betraf das jeweils den Reifen vorne oder hinten rechts. Bild 3.35 zeigt die für die verschiedenen Reifen und Entlüftungsfälle erreichten maximalen Anfahrtschwindigkeiten. Schon im druckbehafteten Zustand mit ESP zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Reifen. Drucklos sind die erreichten Geschwindigkeiten in der Regel geringer. Vergleicht man Fahrten mit und ohne ESP, so sind die Geschwindigkeiten mit ESP leicht höher. Auch bei Entlüftung vorne lässt sich die Gasse schneller durchfahren als bei Entlüftung hinten. Ein Extre-

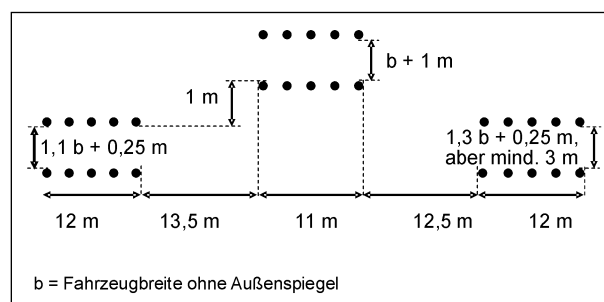


Bild 3.34: Abmessungen der Fahrspur des Tests entsprechend ISO 3888-2 (Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance)

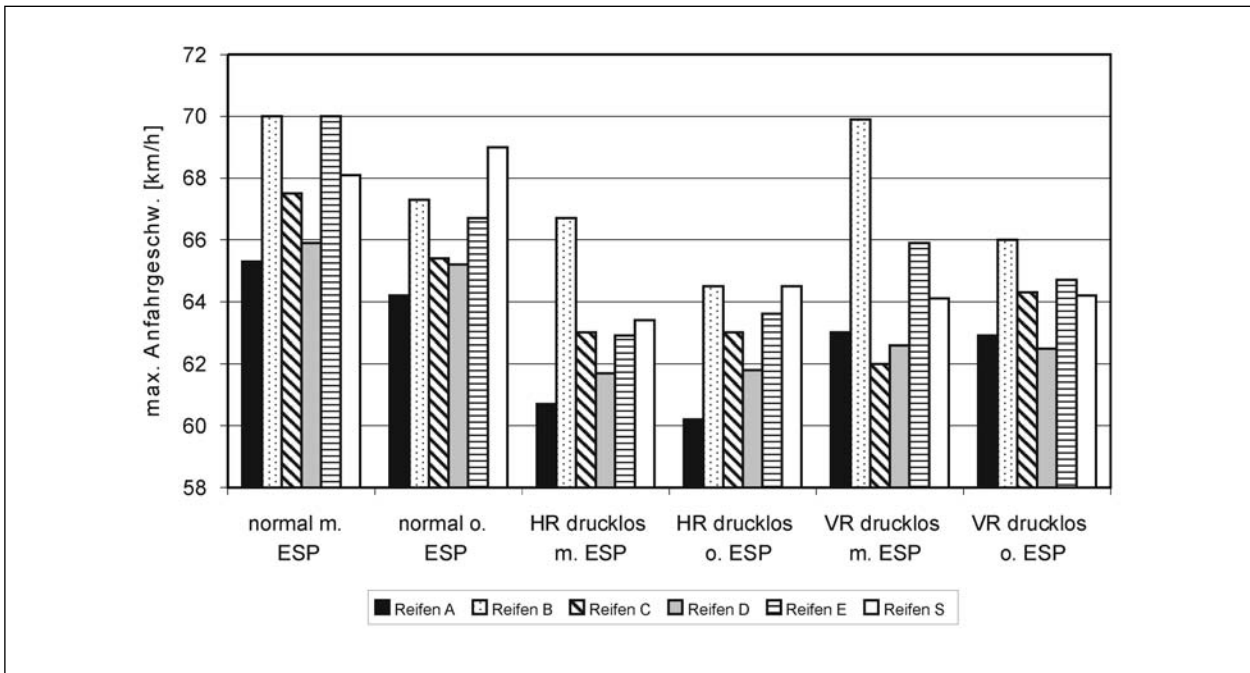


Bild 3.35: Maximale Anfahgeschwindigkeit beim doppelten Fahrspurwechsel

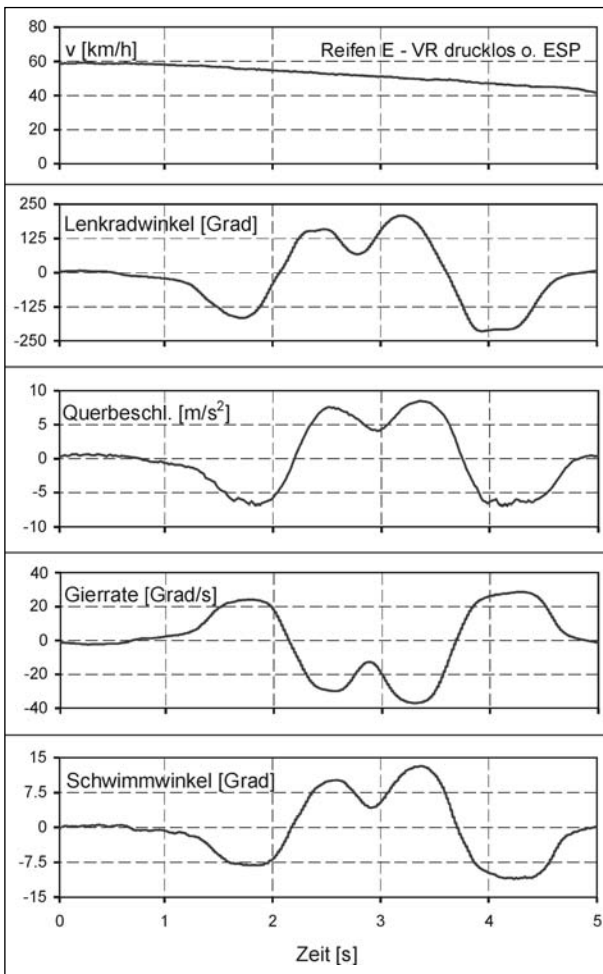


Bild 3.36: Zeitschrieb der Messgrößen eines Versuchs mit entlüftetem Vorderrad ohne ESP beim doppelten Fahrspurwechsel

mum stellt Reifen B dar, mit dem sich vorne drucklos fast 70 km/h fahren ließen, genau wie im druckbehafteten Fall. Der Standardreifen unterscheidet sich beim doppelten Spurwechsel kaum von den Run-Flat-Reifen. Auch die Fahrten mit 0,7 bar entsprechen den drucklosen Fahrten bei Run-Flat-Reifen.

Im Allgemeinen waren mit Fahrdynamikregelung leichter gültige Versuche zu erreichen.

Um die Versuche untereinander hinsichtlich weiterer Messgrößen vergleichen zu können, werden im Folgenden jeweils Fahrten mit Anfangsgeschwindigkeit 60 km/h betrachtet.

Bild 3.36 zeigt beispielhaft die Zeitverläufe der Messgrößen bei einer solchen Fahrt. Hier dargestellt sind Geschwindigkeit, Lenkradwinkel, Querbeschleunigung, Gierrate und Schwimmwinkel für eine Fahrt mit entlüftetem Vorderrad ohne ESP.

Sieht man sich die erreichten maximalen Querbeschleunigungen an, dargestellt in Bild 3.37, so zeigt sich, dass diese für die Run-Flat-Reifen immer im Bereich zwischen 8 und 9 m/s² liegen. Trotz dieser hohen Werte wurde kein Reifen von der Felge abgeworfen. Große Unterschiede zwischen den Reifen treten nicht auf (nur mit dem Standardreifen wurden höhere Querbeschleunigungen aufgebaut). Für Fahrten mit entlüftetem Vorderrad sind die Werte leicht niedriger als bei den übrigen Fahrten.

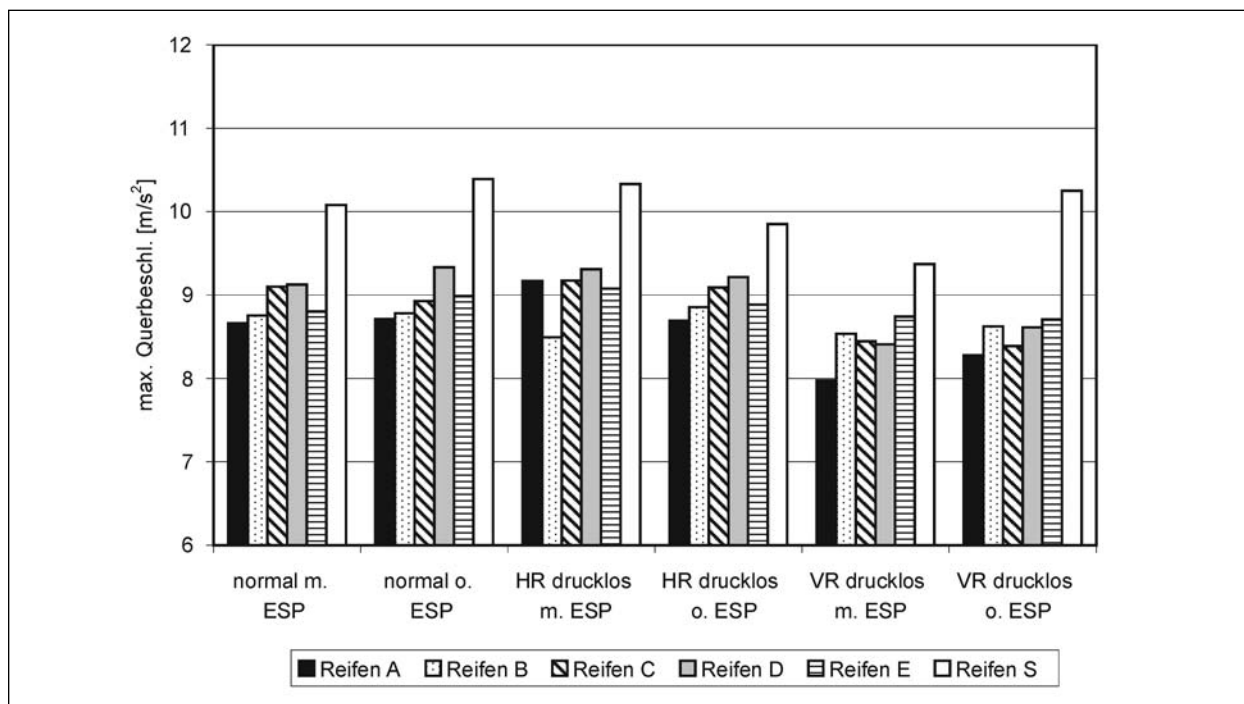


Bild 3.37: Maximale Querbeschleunigung beim doppelten Fahrspurwechsel (Anfahrsgeschwindigkeit 60 km/h)

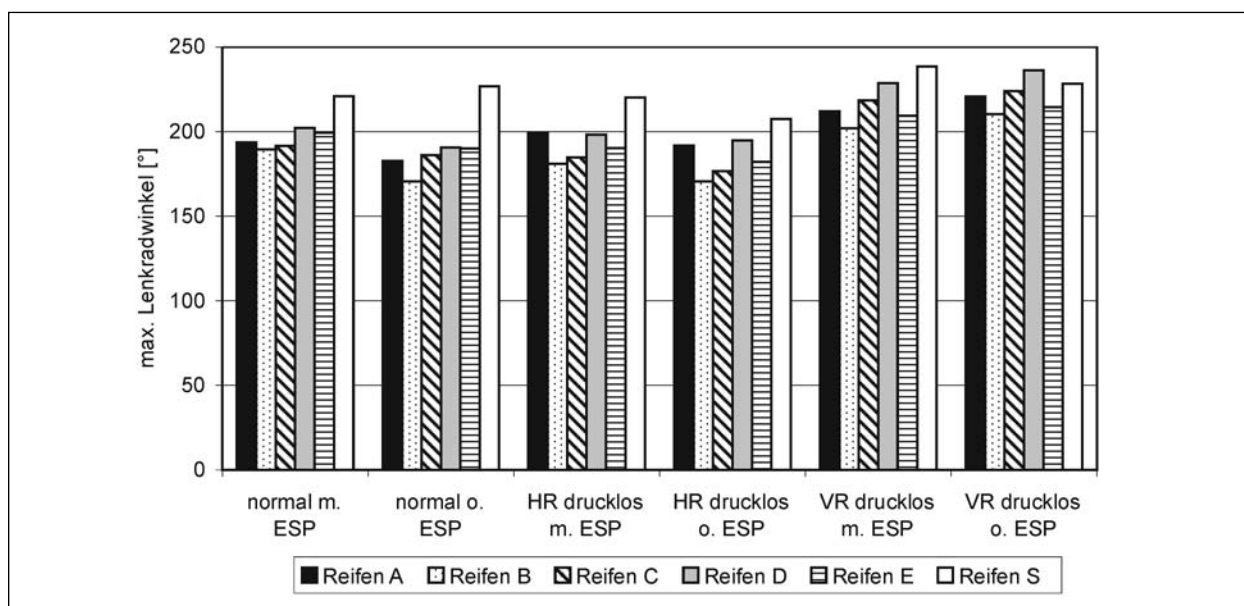


Bild 3.38: Maximaler Lenkwinkel beim doppelten Fahrspurwechsel (Anfahrsgeschwindigkeit 60 km/h)

Auch beim maximalen benötigten Lenkwinkel (s. Bild 3.38) ragen nur die Fahrten mit entlüftetem Vorderrad heraus. Hier ist auf Grund des platten Reifens ein höherer Lenkwinkel erforderlich, um die Gasse durchfahren zu können. Diese Beobachtung steht im Einklang mit der vermehrten Untersteuerneigung des Fahrzeugs bei entlüftetem Vorderrad.

Eindeutig abgrenzen lassen sich die verschiedenen Versuchsdesigns bei der Betrachtung des maximalen Schwimmwinkels (s. Bild 3.39). Dieser bewegt

sich bei Fahrten mit Druck knapp unter 15° (nur der Standardreifen zeigt höhere Schwimmwinkel). Für entlüftetes Vorderrad sind die Werte etwas niedriger, für entlüftetes Hinterrad signifikant höher, für einen Reifen über 20°. Auch subjektiv wird das Fahren mit entlüftetem Hinterrad als schwieriger empfunden.

Insgesamt zeigte sich, dass das Fahren mit Run-Flat-Reifen druckbehaftet sich nicht von dem mit Standardreifen unterscheidet. Auch drucklos kann

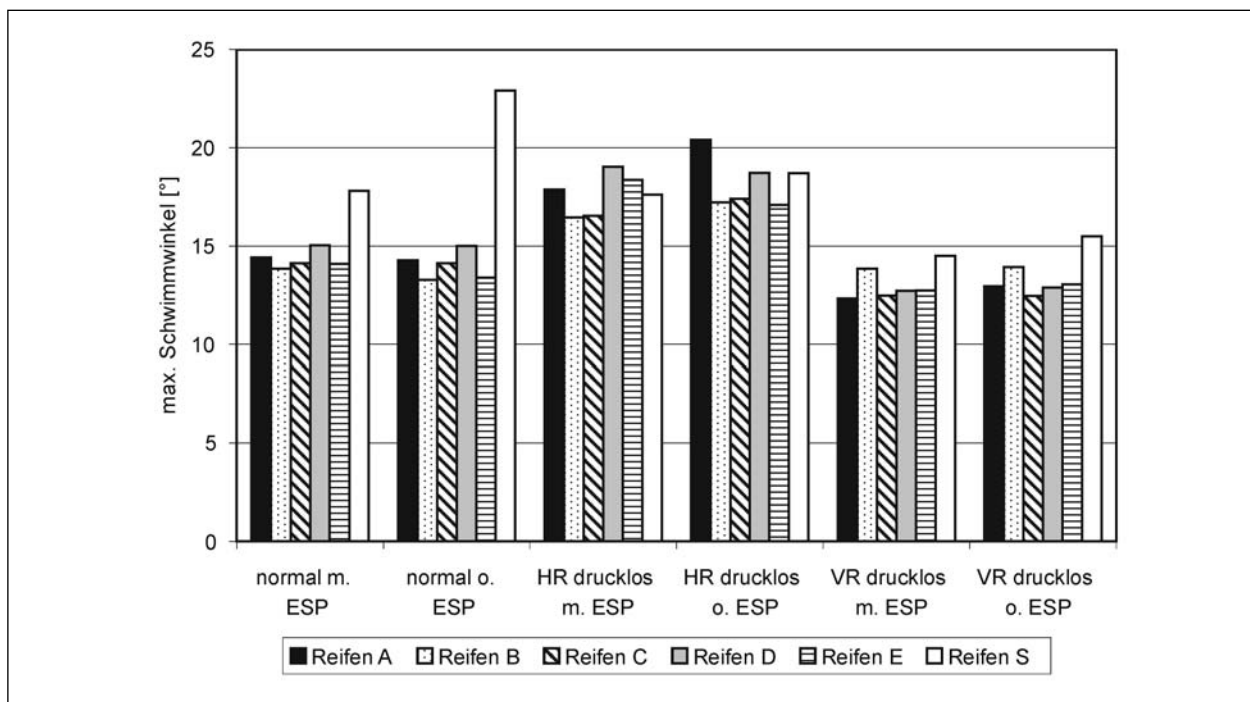


Bild 3.39: Maximaler Schwimmwinkel beim doppelten Fahrspurwechsel (Anfahrgeschwindigkeit 60 km/h)

man den Run-Flat-Reifen beim doppelten Spurwechsel unter den besonderen Bedingungen sehr gute fahrdynamische Eigenschaften bescheinigen.

3.5 Fahrerfahrung auf anderen Fahrzeugen

Mini

Auf dem Testgelände der BMW AG wurden Fahrten mit einem BMW Mini durchgeführt, um einen subjektiven Fahreindruck bei der Nutzung von Run-Flat-Reifen zu gewinnen. Der Mini war ausgerüstet mit Ganzjahres-Run-Flat-Reifen Goodyear EMT der Größe 205/45 R17. Zum einen wurden Fahrten auf dem Handlingkurs absolviert, wobei der Druck im Reifen hinten links sukzessive von 2,2 bar auf null bar reduziert wurde. Sowohl bei 1,7 bar als auch bei 1,2 bar war der Druckverlust weder am Reifen zu sehen noch beim Fahren zu spüren. Das Fahrverhalten wurde lediglich als etwas komfortabler empfunden. Bei 0,7 bar war die Druckminderung am Reifen zu sehen und es waren verstärkte Abrollgeräusche in Rechtskurven zu hören. Bei 0,2 bar bzw. 0,0 bar war der Druckverlust deutlich zu sehen. Aber auch hier waren nur bei Rechtskurven zusätzliche Geräusche zu hören, das Fahrverhalten geradeaus und in Linkskurven wurde als normal empfunden.

Zum anderen wurden Kreisfahrten durchgeführt. Bei drucklosem Reifen hinten links war in Linkskurven kein Unterschied zum druckbehafteten Zustand zu merken. Bei Rechtskurven dagegen traten lautere Abrollgeräusche auf und das Fahrzeug übersteuerte stark, sodass Gegenlenken erforderlich war und die Fahrdynamikregelung eingriff. Bei drucklosem Reifen vorne links waren in Linkskurven Vibrationen am Lenkrad spürbar. Diese waren in Rechtskurven noch stärker und zusätzlich untersteuerte das Fahrzeug stark, sodass wiederum die Fahrdynamikregelung ansprach. Allgemein zeigte das Fahrzeug die Tendenz, leicht nach links zu ziehen. Insgesamt war jedoch ein Druckverlust vorne leichter für den Fahrer zu beherrschen als hinten.

Wesentliches Fazit dieser Testfahrten ist, dass mit Run-Flat-Reifen trotz Druckverlusts das Fahrverhalten kaum beeinträchtigt ist, was zur Folge hat, dass man den Druckverlust ohne Reifendruckkontrolle bei normaler Fahrt gegebenenfalls gar nicht wahrnimmt. Letzteres könnte jedoch zu einer Überbeanspruchung eines drucklosen Run-Flat-Reifens führen.

5er BMW

Im Rahmen von Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle von modernen Fahrzeugen stand der BAST ein Versuchsfahrzeug der 5er-Reihe zur Verfügung, das mit Run-Flat-Reifen der

Dimension 225/50 R17 94H ausgerüstet war. Bei Fahrten mit druckbehafteten Reifen über mehrere hundert Kilometer in der Stadt, über Land und auf der Autobahn war subjektiv kein Unterschied zu Normalreifen bezüglich der Fahreigenschaften (selbst bei Eingriffen der Fahrdynamikregelung) und des Komforts festzustellen.

Audi 90

Für Vorversuche zu diesem Projekt wurde ein Fahrzeug vom Typ Audi 90 mit Run-Flat-Reifen der Firma Goodyear (Goodyear EMT) ausgestattet, die die Dimension 195/50 ZR15 82 W besaßen. Auch mit diesen Reifen war ein Druckverlust erst nahe eines Restdruckes von null bar zu spüren – und das auch nur während Kurvenfahrten. Bezüglich des Fahrkomforts waren gegenüber den Standardreifen (195/60 R14 86T) insbesondere bei kurzen Stößen leichte Einbußen zu registrieren.

3.6 Ergebnisse einer Untersuchung des ADAC

Vom ADAC wurden im Jahr 2002 fünf verschiedene Run-Flat-Reifen getestet, die sich zu diesem Zeitpunkt am Markt befanden [67-69]. Dabei ging es neben den Notlaufeigenschaften auch um Komfort und Nässeigenschaften. Die Reifen wurden auf jeweils dem Fahrzeug getestet, für das der Reifen konzipiert und freigegeben war. Es wurden folgende Reifen untersucht: Bridgestone Potenza Re 050 (225/45 R17 W), Michelin Spacity (195-620 R420 A H), Pirelli eufori@ (205/45 R17 V), Dunlop SP Sport 3000 DSST und Goodyear Eagle NCT5 EMT (beide 195/55 R16 H). Dabei war ein Renault Scénic mit dem Michelin PAX-System ausgerüstet, ein 3er BMW mit den Bridgestone-Reifen und ein Mini mit den übrigen drei Fabrikaten. Als Vergleichsreifen in Standardbauweise dienten für die jeweiligen Fahrzeuge ein Michelin Energy (195/60 R15 H), ein Bridgestone Potenza ER 30 (225/45 R17 W) und ein Pirelli P 3000 Energy (175/65 R15 H).

Das Fahrverhalten auf trockenen und nassen Fahrbahnen wurde auf einem Testgelände in Südfrankreich ermittelt. Kriterien waren auf trockener Fahrbahnoberfläche das Kurven- und Geradeausverhalten sowie das Verhalten beim Spurwechsel, auf nasser Oberfläche das Bremsverhalten und das Handling sowie Längs- und Queraquaplaning. Der Komfort und die Innengeräusche wurden subjektiv durch zwei Personen beurteilt. Das Außengeräusch

wurde auf einer Lärmstrecke mit 80 km/h und abgestelltem Motor durch Messung des Schallpegels ermittelt. Der Rollwiderstandsbeiwert wurde auf einem Prüfstand der Continental AG gemessen. Zum Test der Notlaufeigenschaften wurde je ein Run-Flat-Reifen an der Antriebsachse luftleer mit 80 % Fahrzeugauslastung 170 km bei 80 km/h gefahren.

Als Ergebnisse sind festzuhalten:

Im Notlaufbetrieb ließen sich die Fahrzeuge sicher manövrieren. Alle Reifen haben die Notlaufstrecke ohne sichtbaren Schaden überstanden. Nur in einem Fall zeigte sich ein sehr lautes Abrollgeräusch. Bezüglich des Handlingverhaltens mit einem luftleeren Reifen decken sich die Ergebnisse im Wesentlichen mit den Erfahrungen der BAST. Luftdruckverlust vorne äußert sich durch Untersteuern in Kurven und leichtes Ziehen zur Seite, insbesondere beim Bremsen. Luftdruckverlust hinten äußert sich teilweise durch Übersteuern. Beim Spurwechsel greift gegebenenfalls die Fahrdynamikregelung ein.

Für Fahrten auf trockener Fahrbahn wurden alle Reifen als „sehr gut“ eingestuft; Bei Nässe erhielten vier Reifen ein „gut“, einer ein „sehr gut“. Am komfortabelsten wurde der Reifen mit innerem Stützring empfunden. In Bezug auf die Geräusche waren die Reifen ähnlich und bekamen Noten zwischen „gut“ und „zufrieden stellend“. Unterschiede gab es beim Rollwiderstand, hier wurde der niedrigste am Reifen mit Stützring gemessen.

Insgesamt bewegten sich die Ergebnisse der Run-Flat-Reifen auf dem Niveau von guten herkömmlichen Reifen. Die Systeme werden durchweg als empfehlenswert dargestellt. Ein Reifendruckkontrollsystem wird als unbedingt erforderlich erachtet.

4 Prüfung der Dauerhaltbarkeit von Run-Flat-Reifen

4.1 Problemstellung

Bereits in den Jahren 1996, 1997 und 2001 wurden von der BAST Reifen mit Notlaufeigenschaften auf ihre Schnelllauf- und Dauerlauffestigkeit sowie die Notlauffähigkeit in BAST-eigenen Innentrommelprüfständen mit Innendurchmessern von 5,50 m und 3,80 m untersucht. Darunter waren Reifen der Firmen Michelin mit dem PAX-System (235/700

R450 AC) sowie mit dem ebenfalls stützringbasierten Notlaufsystem CRF der Firma Hutchinson (225/55 R17 97W MXM), Continental mit dem CTS-System (CT 265/40 R500 114H und 245/60 R500 14H) und Dunlop mit einem innen liegenden Stützring (245/60 R16 108H).

Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Versuche zur Dauerhaltbarkeit der Run-Flat-Reifen wurden im Innentrommelprüfstand (3,80 m) der BAST durchgeführt.

Es ist zu erwarten, dass die Notlaufeigenschaften derzeitiger Run-Flat-Reifen insbesondere hinsichtlich der Dauerlaufeigenschaften im Notlaufbetrieb unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Die vorliegende Untersuchung diente u. a. dazu, diese Unterschiede zu ermitteln.

Reifen sind sicherheitsrelevante Fahrzeugkomponenten, daher sind für sie technische Anforderungen in gesetzlichen Regelwerken festgelegt. Für Europa sind die Richtlinie 92/23/EWG der Europäischen Union (EU) und die Regelung der Economic Commission of Europe ECE R-30 für Pkw-Reifen maßgebend.

Diese Regelwerke geben Mindestanforderungen vor, die ein Reifen im Rahmen einer Typzulassung erfüllen muss. Dies sind im Wesentlichen Anforderungen an die Dimensionierung der Reifen sowie eine Betriebsprüfung, d. h. für Pkw-Reifen eine Schnellaufprüfung. Seit dem 4. Februar 2003 ist die Richtlinie 92/23/EWG der EU mit der Änderung 2001/43/EG um eine Rollgeräuschprüfung für neue Reifentypen erweitert worden. In Folge der Einführung dieser Prüfung wird auch die Forderung nach einer Prüfung weiterer sicherheitstechnischer Eigenschaften der Reifen gestellt, vornehmlich Bremsen bei Nässe.

Für die speziellen Eigenschaften eines Reifens mit Notlaufeigenschaften sind in diesen Regelwerken bisher noch keine Kriterien genannt. Daher wurden für die Bestimmung der Notlaufeigenschaften der hier untersuchten Reifentypen eigene Prüfbedingungen erarbeitet.

Für einen Vergleich der Fähigkeiten im drucklosen Betrieb der unterschiedlichen Reifen bietet sich eine gezielte Belastungsprüfung im Prüfstand an. Unter gleich bleibenden Bedingungen kann hier die Reaktion des Reifens auf Veränderungen von Längs- und Seitenkräften ohne den Einfluss durch unterschiedliche Fahrzeuge gemessen werden. Die von den Reifenherstellern angegebene Laufleis-

tung für den Notlaufbetrieb kann ohne Sicherheitsprobleme bis zum Versagen des Reifens ausgedehnt werden.

4.2 Festlegen der Prüfbedingungen

Für die Prüfbedingungen wurden weit gehend die Vorgaben eingehalten, die in den vorgenannten Regelwerken beschrieben sind, z. B. für die Schnellaufprüfung. Abweichungen ergaben sich aus der Tatsache, dass die Schnellaufprüfung in der Regel auf einer Außentrommel mit einem Durchmesser von 1,7 m - 2 m durchgeführt wird, der Prüfstand der BAST aber mit einer Innentrommel mit ca. 4,0 m Durchmesser ausgerüstet ist. Daher ist bei dem Prüfstand der BAST die Verformung der Reifenaufstandsfläche ähnlicher der Verformung auf einer ebenen Unterlage. Die Reifenbelastung ist dadurch bei sonst gleichen Parametern geringer als bei einer Außentrommel.

Die Reifen wurden in drucklosem Zustand geprüft. An den Prüfreifen wurden die Winkel von Sturz und Vorspur jeweils auf 0° eingestellt.

Um die Nachteile des Betriebs eines Reifens in einem Prüfstand gegenüber dem einer realen Straße auszugleichen, wurde die Prüfung in einer klimatisierten Umgebung durchgeführt. Durch die Klimatisierung sollen die Erwärmung der begrenzten Fahrbahnlänge von ca. 12 m und der fehlende Fahrtwind ausgeglichen werden. Die Prüftemperatur betrug 20 °C. Infolge der Trägheit der Temperaturregelung wurden bei den Versuchen Schwankungen der Lufttemperatur von ca. $\pm 1,5$ °C gemessen.

Zur Vorbereitung auf den Prüflauf wurden Reifen und Prüfstand 3 Stunden auf die Prüftemperatur konditioniert.

Wie bei der Schnellaufprüfung wurde eine Belastung des Prüfreifens von 80 % der Last entsprechend der Tragfähigkeitskennzahl¹ vorgegeben.

Als Prüfgeschwindigkeit wurde 80 km/h gewählt, dies entspricht für alle Reifen der von den Reifenherstellern angegeben Höchstgeschwindigkeit für den Notlaufbetrieb.

¹ „Tragfähigkeitskennzahl“, eine Zahl, welche die Last anzeigt, die der Reifen tragen kann, und zwar bei der durch die Geschwindigkeitskategorie zugeordneten Geschwindigkeit und unter den vom Reifenhersteller vorgesehenen Einsatzbedingungen

Vom Hersteller wird für einen Reifen mit Notlauf-eigenschaften eine Mindeststrecke genannt, über die der Reifen in drucklosem Zustand bei einer maximalen Geschwindigkeit von 80 km/h betrieben werden kann. Bei der Mehrzahl der Reifentypen ist das eine Strecke von 80 km. Es befinden sich im Prüfprogramm jedoch auch Reifen, für die Strecken bis 150 bzw. 200 km genannt werden. Die Dauer der Prüfung der Reifen wurde daher in Abhängigkeit der Herstellerangabe durchgeführt.

Da die Prüfparameter nicht auf eine Grenzbelastung ausgelegt waren, bestand ein Interesse daran, die Notlaufreserven der Reifen durch Ausdehnung der Prüfung bis zum Bruch zu erfahren. Daher wurde die Prüfung in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe wurde der Reifen über die vom Hersteller angegebene Strecke von 80, 150 oder 200 km mit wechselnden Beanspruchungen geprüft. In einer zweiten Stufe wurde der Reifen bis zum Versagen bzw. bis zum Dreifachen der vom Hersteller angegebenen Strecke geprüft.

Die wechselnden Beanspruchungen in der ersten Prüfstufe wurden durch Längs- und Querkräfte erzeugt, die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge sowie Kurvenfahrten simulieren sollten. Durch Beschleunigen und Verzögern der Drehung des Reifens gegenüber der Trommel wurden Längskräfte in Höhe von 30 % der entsprechenden Radlast auf den Reifen aufgebracht. Diese Kräfte wirkten jeweils fünf Sekunden und wurden von einer kraftfreien Phase, nur Rollen, von einer Sekunde entsprechend einer Strecke von 22 m unterbrochen (s. Bild 4.1). Dieser Betriebsmodus wirkte über 20 % der angegebenen Notlaufstrecke.

Über weitere 20 % der Strecke wurde der Reifen mit wechselndem Schräglaufwinkel über die Fahrbahn geführt. Der angestrebte maximale Winkel betrug $\pm 2^\circ$, der Schräglauf wurde sinusförmig über eine Dauer von ca. 10 Sekunden geändert (s. Bild 4.2).

Ebenfalls über 20 % der Strecke wurde der Reifen so geführt, dass er mit einem Lenkwinkel von 0° parallel zur Fahrbahnlängsachse die Fahrspur änderte. Dieser Fahrspurwechsel wurde mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 cm/s ausgeführt. Durch dieses Fahrmanöver sollten ähnliche Belastungen auf den Reifen einwirken, wie sie auch im normalen Betrieb, z. B. für die Hinterräder, auftreten können (s. Bild 4.3).

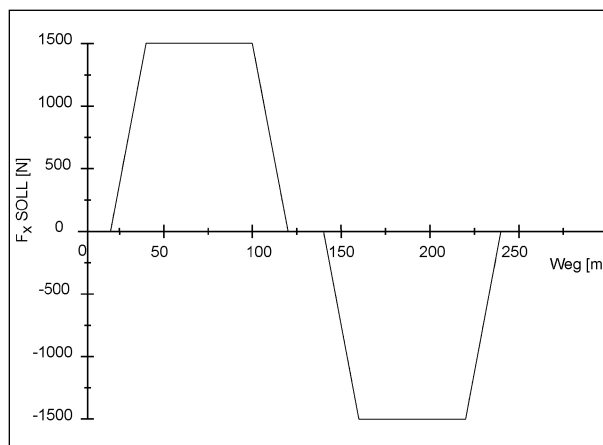


Bild 4.1: Vorgegebener Verlauf der Umfangskräfte am Prüfreifen durch Beschleunigen oder Verzögern der Umfangsgeschwindigkeit des Reifens

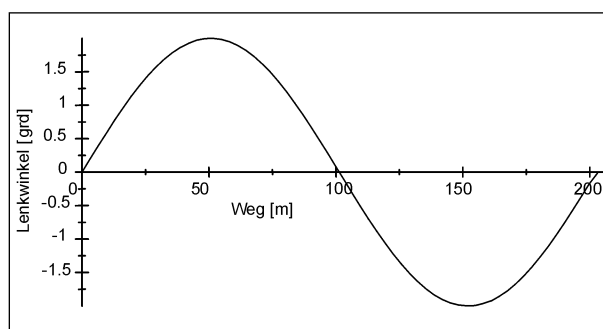


Bild 4.2: Sinusförmige Lenkwinkelvorgabe für 20 % der Prüfstrecke der Notlaufzeitung

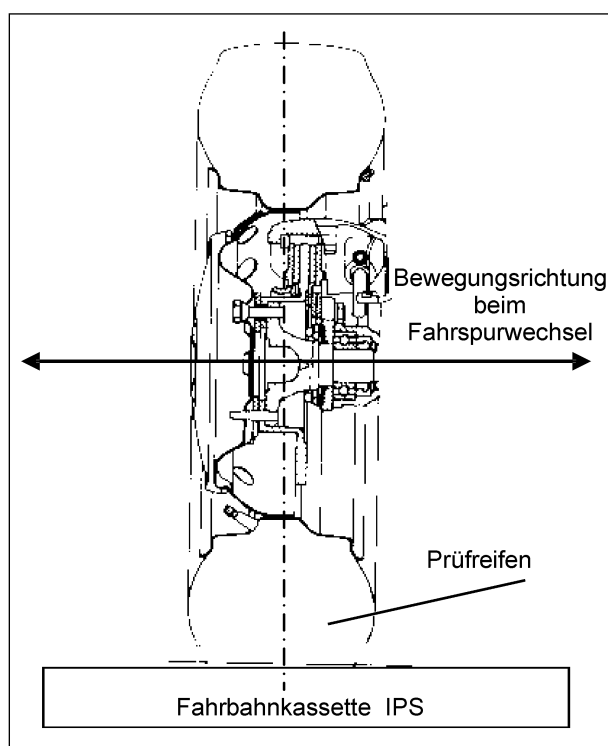


Bild 4.3: Fahrspurwechsel des Prüfreifens

Versuchsbedingungen für die Prüfung der Notlaufeigenschaft	
Prüfstrecke	maximal das Dreifache der vom Hersteller genannten Strecke 80, 150 oder 200 km
Prüfgeschwindigkeit	80 km/h
Reifeninnendruck	drucklos
Umgebungstemperatur	20 °C (klimatisiert)
Achsgeometrie	
Vorspur	0°
Sturz ϵ	0°
Prüfbelastungen	
Radlast F_z	80 % der Last entsprechend der angegebenen Tragfähigkeitskennzahl
Beanspruchung des Reifens	
1. Prüfstufe:	
40 % der angegebenen Strecke	nur Rollen mit F_z
20 % der angegebenen Strecke	
Bremsen/Beschleunigen mit der Umfangskraft F_x	$F_x = 30 \% \times (\pm F_z)$ periodisch wechselnd
20 % der angegebenen Strecke	
Lenken	Lenkwinkel = $\pm 2^\circ$ (Ansteuerung sinusförmig)
20 % der angegebenen Strecke	
Fahrspurwechsel	Versatzgeschwindigkeit ≈ 2 cm/s
2. Prüfstufe:	
Fahrspurwechsel bis zum Bruch bzw. bis zur dreifachen Strecke	

Tab. 4.1: Belastungen der Reifen für die Prüfung der Notlaufeigenschaften

Im Anschluss an die erste Prüfdistanz wurde der Prüfreifen in der zweiten Prüfstufe, im Prüfmodus „Fahrspurwechsel“, weiter belastet bis zum Versagen des Reifens bzw. dem Dreifachen der angegebenen Laufleistung.

Insgesamt stellen die Prüfbedingungen verhältnismäßig harte Bedingungen an die Run-Flat-Reifen, um Aussagen über die Notlaufeigenschaften der Reifen treffen und Unterschiede herausarbeiten zu können.

4.3 Versuchsaufbau

4.3.1 Der Innentrommelprüfstand (IPS) der BAST

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einer mechanisch gelagerten und einseitig offenen Lauftrommel mit einem Durchmesser von 3,80 m. In zwölf auswechselbaren Kassetten können reale Straßenbeläge mit einer Stärke bis zu 80 mm in die

Trommel eingebracht werden. Die Kassetten sind 0,50 m breit und ergeben pro Umdrehung eine Wegstrecke in der Trommel von 12 m. Auf Grund eines speziellen Einbauverfahrens entsprechen diese Beläge weitgehend den im heutigen Straßenbau verwendeten Deckschichten hinsichtlich Aufbau und Oberflächenbeschaffenheit.

Die Trommel wird von einem drehzahlgeregelten Gleichstrommotor angetrieben. Über einen Rad-schlitten kann der Pkw-Reifen in die Trommel eingefahren werden und auf der Fahrbahn abrollen. Die Räder werden an Parallelenkern geführt und können über Schraubenfedern mit einstellbaren Radlasten bis zu 10 kN belastet werden. Die Radlast wird über ein Hebelsystem auf die oberen Parallelenker der Radstation aufgebracht. Bild 4.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Prüfstandes IPS.

Die Trommel mit aufgesetztem Rad ist von einer Klimahaube umgeben, die es ermöglicht, Versuche bei Luft- und Fahrbahntemperaturen zwischen -10 °C und +40 °C durchzuführen. Die hier beschriebenen Versuche wurden bei 20 °C auf trockener Fahrbahn durchgeführt.

Die Einstellung von Sturz und Schräglauf wird über eine Radnabe vorgenommen, mittels derer auch die Kräfte und Momente am Rad gemessen werden können. Die geregelte Verstellung des Schräglaufes erlaubt die vorgenannten Lenkmanöver während des Versuchs, siehe Bild 4.5.

Die hier beschriebenen Prüfungen wurden auf einem standardmäßigen Oberflächenbelag nach ISO 10844 durchgeführt, einem dichten Asphaltbeton 0/8 mit einer Ausgangsstärke von 40 mm.

Während der Versuche wurden neben den vorgegebenen Versuchsparametern wie Geschwindigkeit, Radlast und Winkel etc. auch die Kräfte am Rad in x- und y-Richtung sowie die Temperaturen von Luft, Straßenbelag und Reifen gemessen. Die Temperaturen der Reifen und der Fahrbahnoberfläche wurden mittels Strahlungspyrometer auf Lauffläche und Fahrbahnmitte gemessen. Durch das starr eingebaute Pyrometer änderte sich bei einer Reifenbewegung der Messort. Beim Versetzen des Reifens auf der Fahrbahn wurden dadurch sehr unterschiedliche Reifentemperaturen gemessen, weil der Messort von der Lauffläche zur Reifenseitenwand verändert wurde. Dies ist bei der Interpretation der Messschriebe zu berücksichtigen.

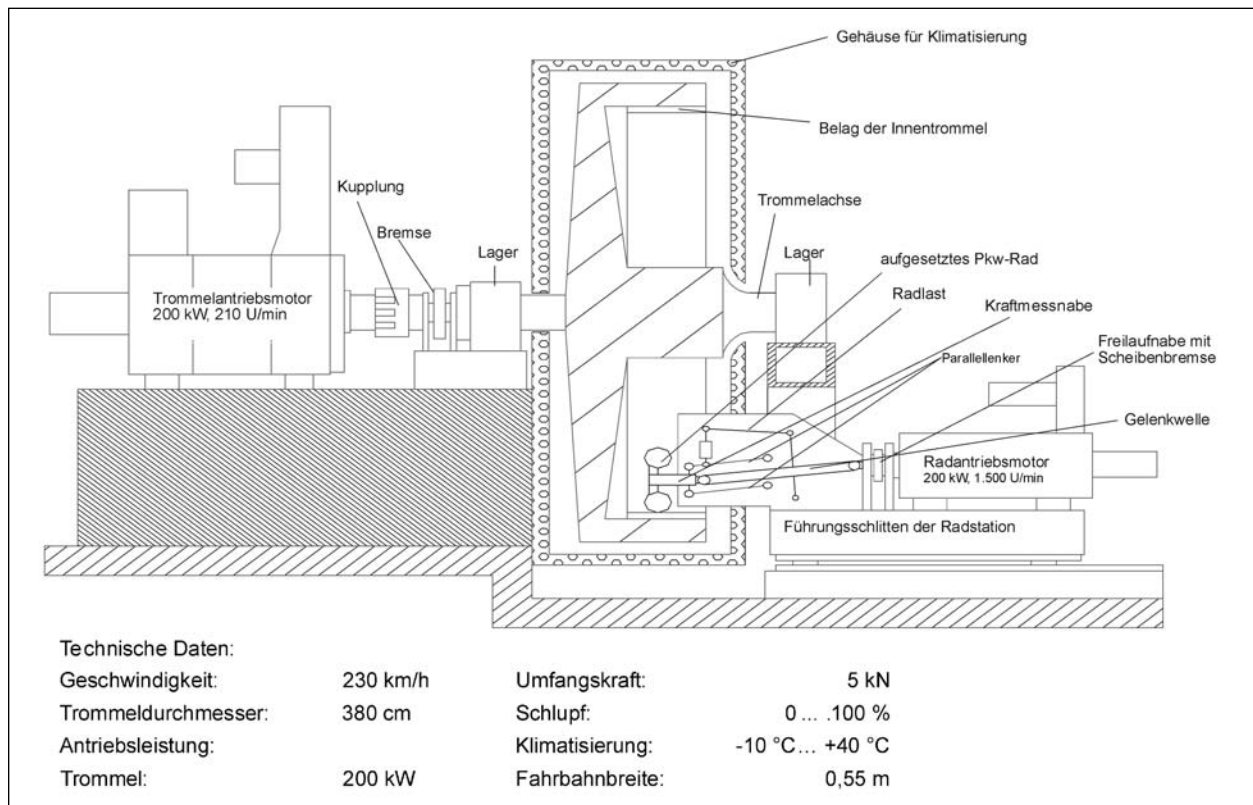


Bild 4.4: Versuchsanlage IPS (schematisch)

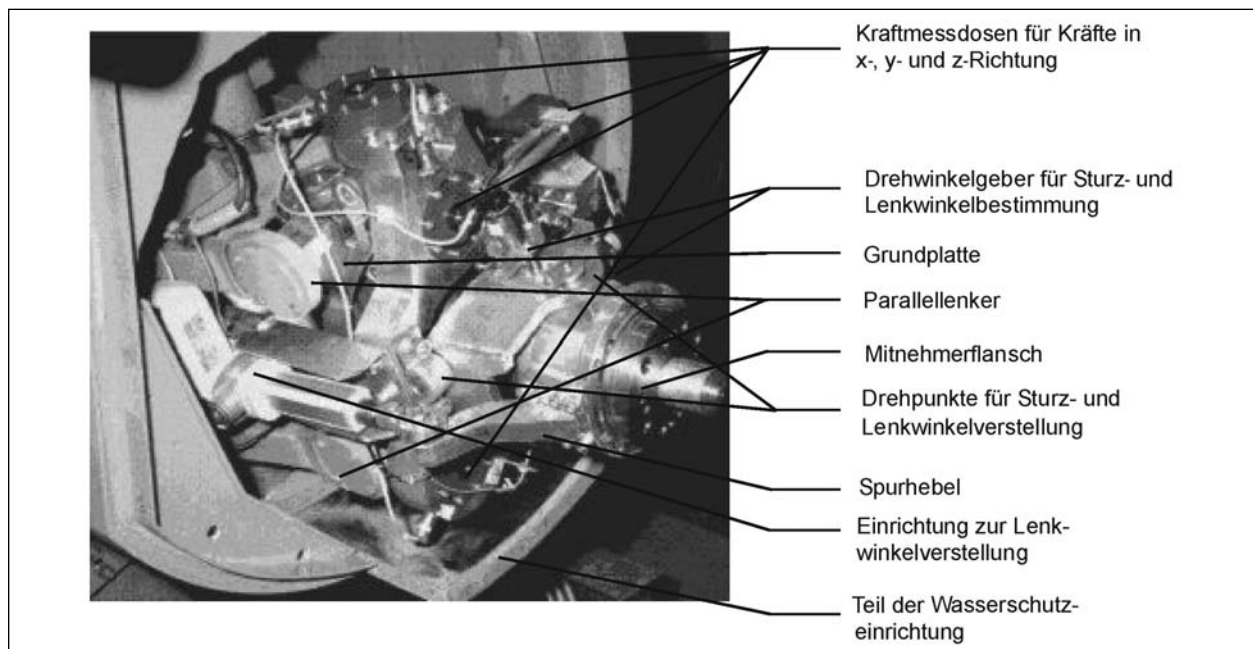


Bild 4.5: Kraftmessnabe des Innentrommelprüfstandes

4.3.2 Die Prüfreifen

Die Notlaufeigenschaften von Reifen werden bisher nicht durch gesetzliche Regelungen oder Richtlinien geregelt. Die Prüfreifen wurden daher nicht nach einer gesetzlichen Messvorschrift geprüft, die den

Herstellern bekannt ist. Daher konnte keine Optimierung der Reifen auf diese Prüfung hin erfolgen. Damit daraus keine Nachteile für die Hersteller der ausgewählten Reifen entstehen, wurden die Reifenbezeichnungen anonymisiert. Die Ergebnisse werden im Bericht so dargestellt, dass den Reifen-

Reifendimension
195/50 ZR15 82W
205-650 R44A 94H
225/45 R17 91W
245/45 R17 95W
245/45 R17 95W
245/40 R18 93W

Tab. 4.2: Übersicht über die Dimensionen der verwendeten Reifen

herstellen in zufälliger Reihenfolge die Buchstaben A bis F zugeordnet werden. Die Dimensionen der sechs Prüfreifen sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Bei den Reifen und Zuordnungen handelt es sich um die gleichen wie bei den Fahrdynamiktests. Es wurden bei den Prüfstandsversuchen jedoch neue Reifen verwendet, das heißt, die Reifen waren vorher nicht an Fahrzeugen für Versuche im Einsatz.

Unter den Reifen befanden sich fünf selbsttragende Reifen (SST = Self Supporting Technology) und ein Reifen mit einem inneren Stützring.

4.4 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Der konditionierte Reifen wurde belastet und auf die geforderte Geschwindigkeit von 80 km/h beschleunigt. Nach Erreichen der Versuchsgeschwindigkeit wurde die Radlast eingestellt, die Winkel von Sturz und Spur kontrolliert und das Versuchsprogramm gestartet.

Neben den aufgezeichneten Messdaten wurden die Reifen im Anschluss an den Versuchslauf optisch kontrolliert, Schäden festgestellt und fotografisch dokumentiert.

Durch die bereits erwähnte Abhängigkeit der Radlast von der Reifenhöhe und damit auch von dynamischen Vorgängen schwankt die Radlast während der Prüfung. Durch eine geringfügig höhere Last wurde gewährleistet, dass 80 % der angegebenen Tragfähigkeit nicht unterschritten wurden.

Durch die zeitliche Befristung des Lenkvorganges wurden die angestrebten 2-°-Schräglaufwinkel in den meisten Fällen nicht ganz erreicht. In Bild 4.6 ist ein Ausschnitt aus einer Ist-Werte-Kurve des Schräglaufwinkels während der Prüfung des Reifens A dargestellt.

Die Laufstrecke, die während der notwendigen Prüfstandseinstellungen zurückgelegt wurde, war Teil der Testgesamtstrecke.

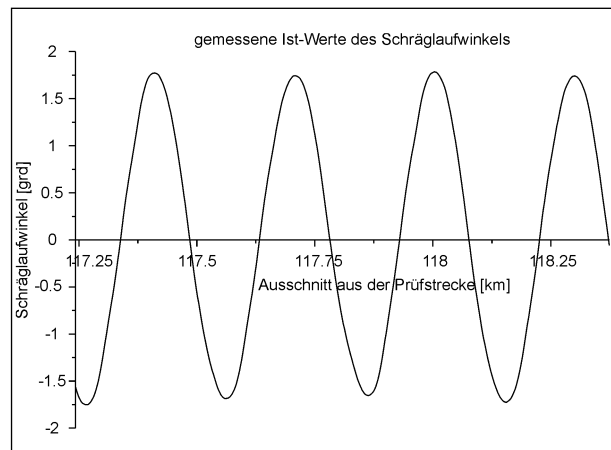


Bild 4.6: Tatsächlicher Schräglaufwinkel des Reifens A während eines Abschnitts der Prüfstrecke von ca. 1 km

4.4.1 Reifen A

Der Reifen A überstand die vom Hersteller angegebene Strecke von 200 km und auch die erweiterte Distanz von insgesamt 600 km ohne erkennbare Fehlfunktionen oder Beschädigungen. Dabei blieben alle Parameter sehr konstant. Bild 4.8 zeigt den Reifen während des Versuchs. Die Diagramme in Bild 4.7 zeigen einen Überblick über die gemessenen Parameter während des Versuchslaufes.

Die Diagramme in Bild 4.7 zeigen das Verhalten der wesentlichen Versuchsparameter über die Strecke von 600 km. Im ersten Diagramm sind die Geschwindigkeiten der Fahrbahn (Trommel) und des Prüfrades dargestellt. Es sind die Änderung der Geschwindigkeiten von Rad und Trommel innerhalb der Soll-Strecke von 200 km entsprechend den Zusatzbelastungen durch Änderung der Umfangskraft (40 km bis 80 km) und infolge der Lenkbewegung des Reifens (100 km bis 140 km) zu erkennen. Im zweiten Diagramm sind die Kräfte am Rad dargestellt. Der drucklose Reifen hat einen hohen Rollwiderstand², der sich infolge der Erwärmung des Reifens von 380 N auf ca. 270 N mindert.

Im dritten Diagramm von Bild 4.7 sind die Temperaturen von Reifen, Fahrbahnoberfläche und Luft dargestellt. Die in allen drei Temperaturverläufen sichtbare Welligkeit wird durch den Regelzyklus der Klimaanlage verursacht. Von der Erwärmung der Luft durch die Reifenbewegung bis zum Einsetzen der Kühlung vergingen ungefähr 15 Minuten. Die in den Prüfraum eingeblasene kalte Luft kühlte besonders schnell den Reifen und die Fahrbahn.

² Der Rollwiderstand wurde nicht entsprechend dem ISO-Standard 8767 ermittelt

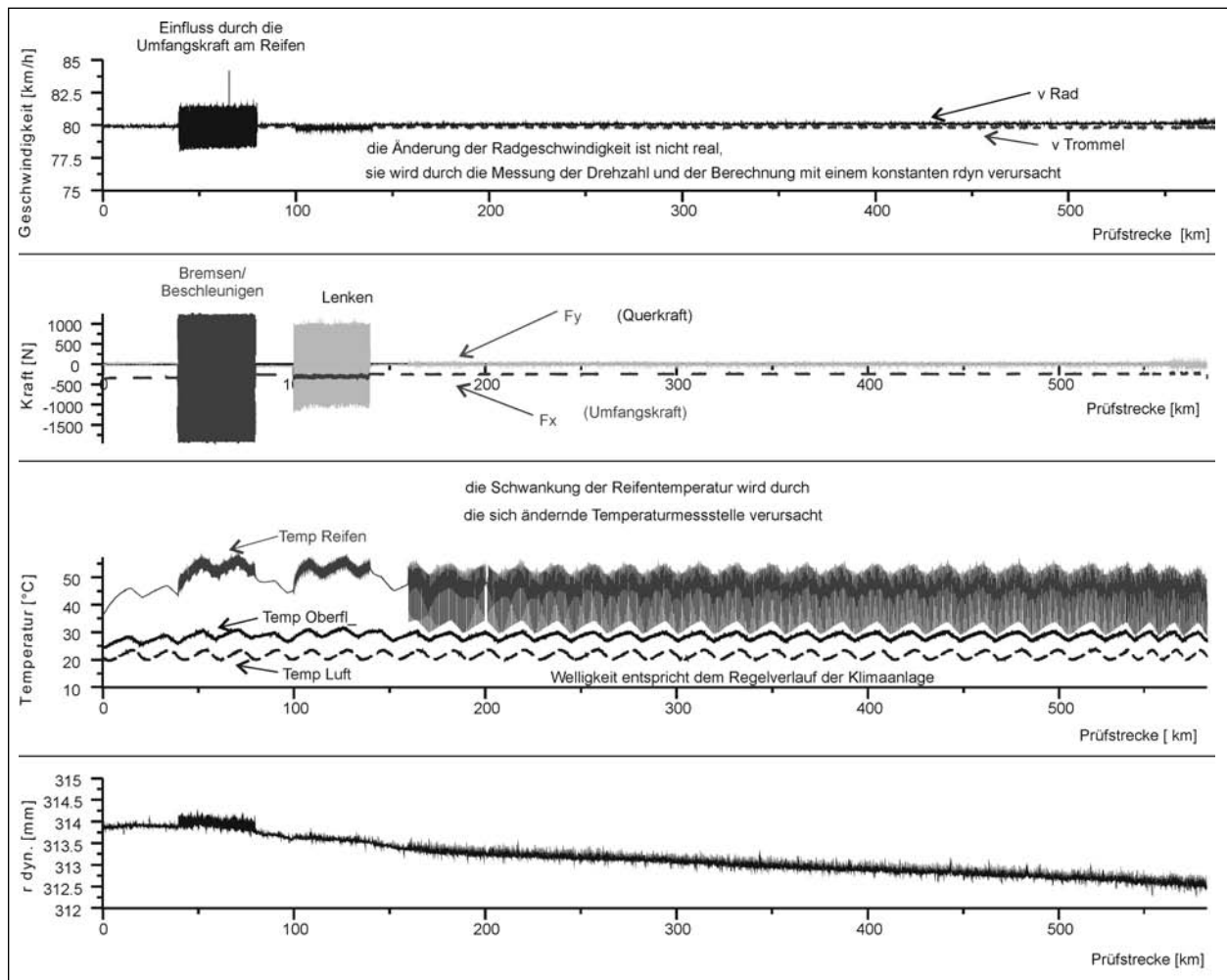


Bild 4.7: Aufgezeichnete Messdaten beim Lauf des Reifens A; der Versuch endete nach 600 km



Bild 4.8: Der Reifen A in drucklosem Zustand, belastet mit 5.250 N, bei $v = 80$ km/h während einer Lenkbewegung

Im vierten Diagramm von Bild 4.7 ist der Messwert des dynamischen Reifendurchmessers über die Prüfstrecke dargestellt. Von diesem Wert kann auf das Verhalten der Reifenstruktur geschlossen werden. Beim Reifen A, dessen Lauffläche sich in drucklosem Zustand auf einem Innenring abstützt,

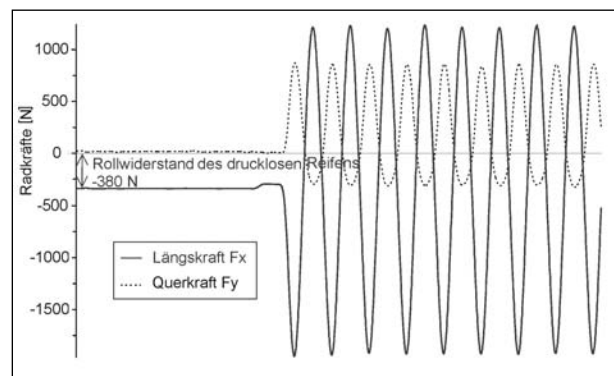


Bild 4.9: Längs- und Querkräfte am Prüfreifen A während der Beschleunigung und Verzögerung des Rades

ist der Radius über die gesamte Prüfstrecke sehr konstant, er verändert sich nur um ca. 1,5 mm.

Die Kräfte beim Beschleunigen und Verzögern des Reifens sind in Bild 4.9 im Detail dargestellt. Berücksichtigt man den Ausgangswert der Umfangskraft, so sind die Kräfte am Rad für das Beschleunigen und Verzögern sehr symmetrisch. Das Beschleunigen mit 30 % der Radlast (5.300 N) be-

wirkt Umfangskräfte von 1.560 N, für die Verzögerung ergeben sich 1.540 N.

Die Kräfte am Reifen durch die Änderung des Schräglaufwinkels infolge der sinusförmigen Lenkwinkelvorgabe sind in der Höhe geringer als beim Beschleunigen oder Verzögern, die maximalen Querkräfte reichen von 960 N bis -1.060 N. Die Längskräfte pendeln bei der Lenkbewegung um -300 N, entsprechend dem Rollwiderstand. Eine detailliertere Darstellung der Kräfte beim Lenken zeigt Bild 4.10. Eine Darstellung des Schräglaufwinkels in dieser Prüfung ist in Bild 4.6 wiedergegeben. Der Schräglaufwinkel während der Winkelvorgabe 0° ist sehr konstant und zeugt von einem ruhigen Lauf des Reifens.

Das Notlaufsystem A absolvierte sowohl die vom Hersteller angegebene Strecke von 200 km als auch die anschließenden 400 km ohne ein messbares Versagen. Schäden am Reifen wurden nicht

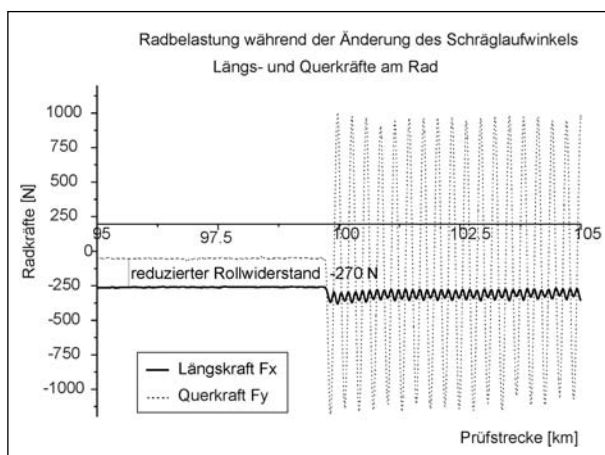


Bild 4.10: Längs- und Querkräfte am Prüfreifen A während der sinusförmigen Lenkbewegung des Rades

festgestellt, der Innenring zeigt Risse, die aber nicht zu einer entscheidenden Beschädigung der Struktur führten. Bild 4.11 zeigt Reifen A und den Innenring nach dem Versuch. Die Innenseite des Reifens sowie die Lauffläche des Innenrings zeigen Spuren des Gels zur Reibungsminderung.

4.4.2 Reifen B

Der Reifen B sollte laut Hersteller Notlaufeigenschaften über eine Strecke von 150 km aufweisen. Der hier geprüfte Reifen zeigte nach ca. 80 km, mit dem Einsetzen der zusätzlichen Belastung durch den Schräglauf, erste Hinweise auf ein Nachgeben der Reifenstruktur. In Bild 4.12 ist das an dem Verlauf der Messwerte des dynamischen Halbmessers deutlich zu bemerken. Während der folgenden 20-30 km wurden die Veränderungen stärker. Wegen starker Vibrationen und um den Prüfstand zu schonen, wurde der Versuch nach einer Strecke von ca. 115 km abgebrochen.

Der Rollwiderstand des Reifens B betrug anfangs -450 N, reduzierte sich nach ca. 60 km auf -370 N, um mit einsetzender Zerstörung des Reifens wieder auf -550 N anzusteigen. Der Schräglaufwinkel erreichte in dieser Prüfung 2 bzw. $-1,9^\circ$.

Der hohe Rollwiderstand bewirkte eine hohe thermische Belastung des Reifens. In der Phase mit intakter Reifenstruktur, bis ca. 75 km, ist die Erwärmung des Reifens nur unwesentlich höher als bei dem Reifen A. Über diese Strecke sind auch die Kräfte am Rad und die Laufruhe konstant. Mit dem Nachgeben der Reifenstruktur nach 75-80 km steigt die Temperatur auf Werte über 70°C an. Der leichte Temperaturabfall kurz vor dem Ende der Prüfung ist auf die verminderte Radlast infolge des

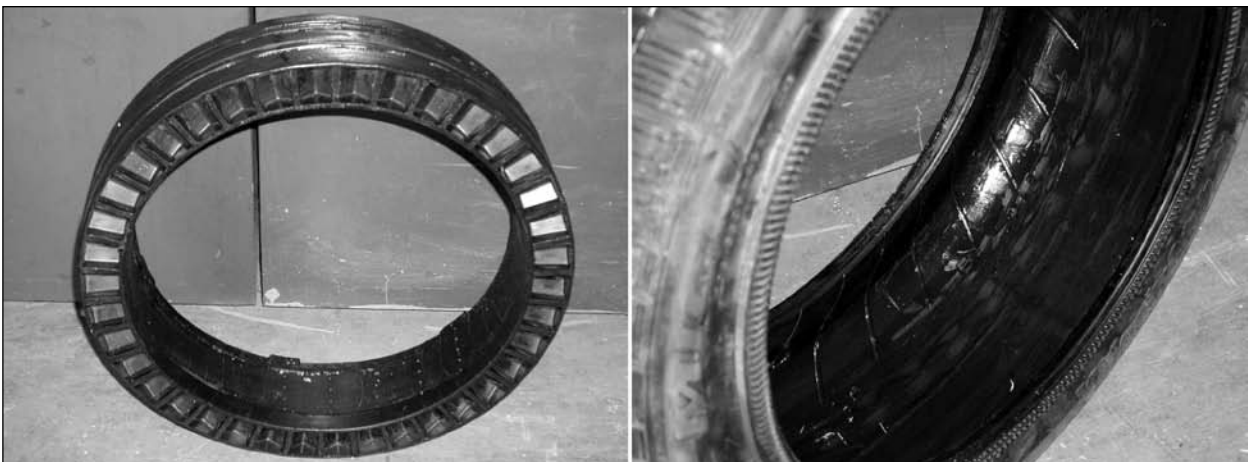


Bild 4.11: Notlaufsystem A mit Reifen und Innenring, Zustand nach 600 km Prüfstrecke

geringeren Radhalbmessers zurückzuführen. Zeitgleich setzte auch die Kühlung der Klimaanlage ein.

Die Felgenhörner haben sich nach den 115 km um ca. 20 mm tief in die Reifenflanke eingearbeitet. Die Begutachtung des Reifens nach dem Versuch ergab, dass sich an der Außenseite der Reifenseitenwand starke Ausbeulungen beidseitig gebildet hatten. An vier Stellen hatte sich die Felge durch die Seitenwand über eine Länge von ca. 2-4 cm durchgedrückt. Nach dem Abziehen des Reifens zeigten sich an den inneren Seitenwänden Materialausbrüche. Diese Ausbrüche waren zum Teil von kugelförmiger Form, mit einem Durchmesser von ca. 5 mm, zum Teil waren es Stücke mit einer Fläche von 1-2 cm² (s. Bild 4.13). Die kugelige Form entstand durch das Aneinanderkleben von Gummipartikeln, die von der sehr warmen Seitenwand abgelöst werden. Dieser Vorgang ist ein Zeichen für eine hohe thermische Belastung der Reifeninnenwand.

Die im Vergleich zu dem Reifen A geringere Notlaufstrecke und die größeren Beschädigungen sind auf den größeren Rollwiderstand infolge der wesentlich höheren Walkarbeit und der hohen Druckbelastung durch die Felgenhörner zurückzuführen.

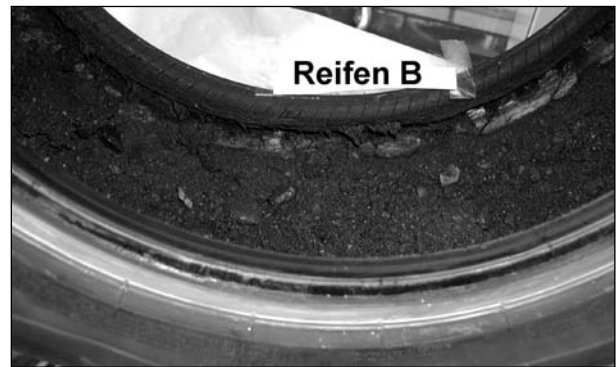


Bild 4.13: Blick in den Reifen B, mit ausgebrochenem Material

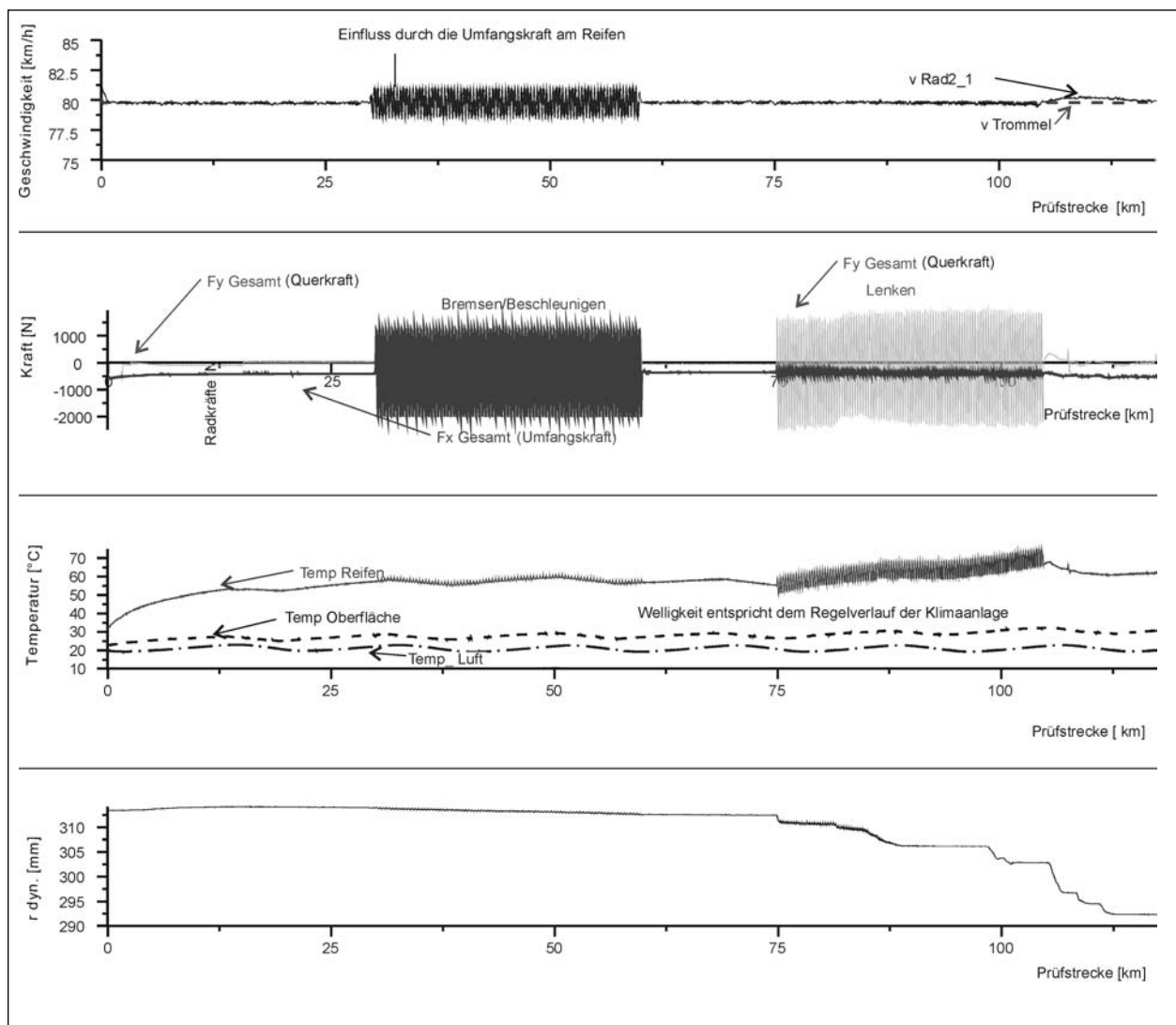


Bild 4.12: Aufgezeichnete Messdaten beim Lauf des Reifens B; der Versuch endete nach ca. 115 km

4.4.3 Reifen C

Für den Reifen C wurden vom Hersteller ebenfalls 150 km als Notlaufstrecke angegeben. Nach ungefähr 30 km bewirkte das Aufbringen der Längskräfte eine Veränderung des Lenkwinkels (s. Bild 4.14). Nach weiteren 20 km trat am Reifen eine messbare Veränderung auf. In der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase veränderte sich die geringe Seitenkraft (F_y) von -300 N über eine Strecke von ca. 10 km auf Werte um 400 N. Dieses Ereignis kann auch bei den Daten für den dynamischen Reifenhalmmesser und in einer kurzfristigen Temperaturerhöhung festgestellt werden.

Diese Veränderung machte sich durch starkes Schlagen des Reifens in der Trommel bemerkbar. Nach einer Strecke von 66 km wurde der Versuch abgebrochen, weil am Reifen eine starke Rauchentwicklung auftrat. Diese lokal begrenzte Überhitzung des Reifens konnte messtechnisch nicht nachgewiesen werden. Wie bereits weiter vorne ausgeführt, wurde die Reifentemperatur nur an einem Punkt auf der Lauffläche des Reifens gemessen, die größte Erwärmung trat jedoch an der Seitenwand im Innern des Reifens in Wulstnähe auf, wie die Begutachtung der Schäden im Nachhinein zeigte.

Der Rollwiderstand des drucklosen Reifens betrug -450 N. Nach der Phase des Beschleunigens und Verzögerns, in der eine erste Minderung des dynamischen Halbmessers gemessen wurde, stieg diese Kraft bis zum Bruch des Reifens auf ca. -750 N an. Bild 4.15 zeigt den Verlauf aller gemessenen Daten über der Prüfstrecke von nur 65 km. Bild 4.16 zeigt im Detail den Verlauf der Umfangskraft über diese Strecke.

Nach dem Prüflauf wies der Reifen an beiden Seitenwänden Beulen auf. Auf einer Seite hatte sich ein Riss in der Mitte der Seitenwand gebildet. Auf der gegenüberliegenden Seitenwand bildete sich ein Riss in Wulstnähe, der zu einer kompletten Abtrennung von Wulst und Seitenwand hätte führen können (s. Bild 4.17).

Das innen aus dem Reifen ausgebrochene Material bestand in der Mehrzahl aus Stücken von ca. 0,5 cm Dicke und einer Fläche von 2-3 cm². An den kleineren ausgebrochenen Teilen waren Anschmelzungen zu sehen.

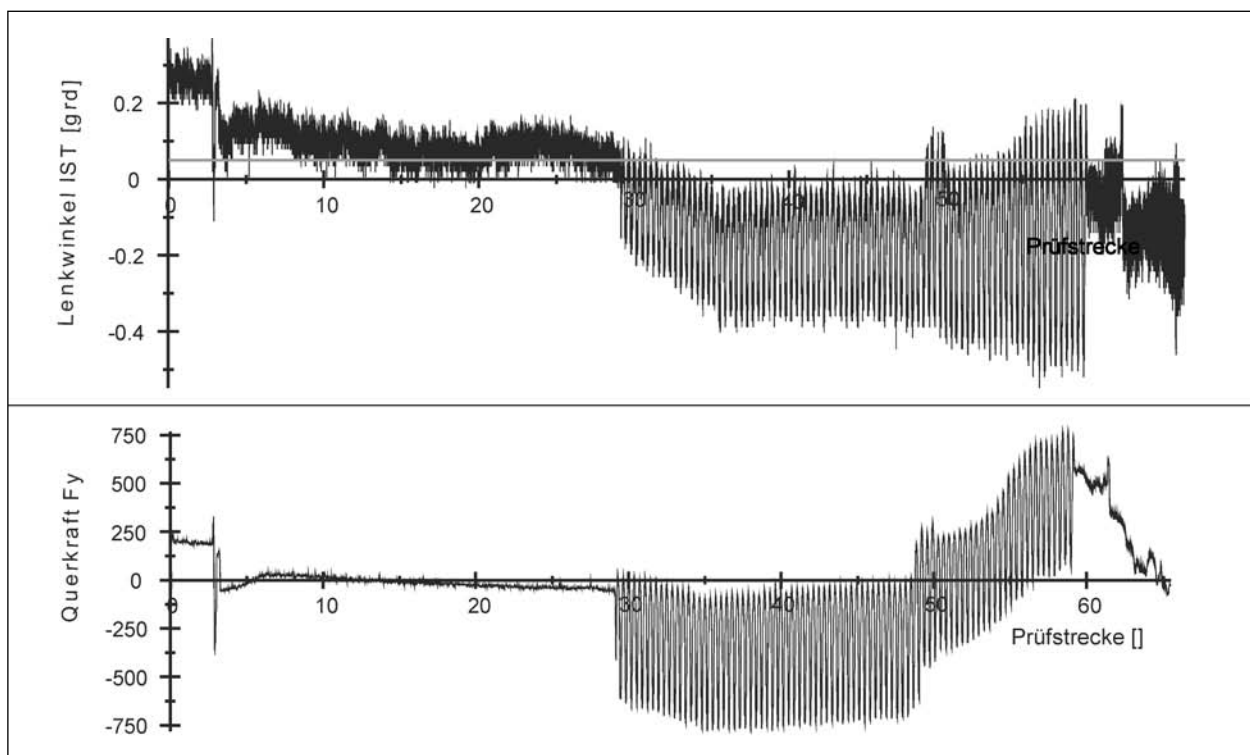


Bild 4.14: Erstes Versagensereignis beim Reifen C

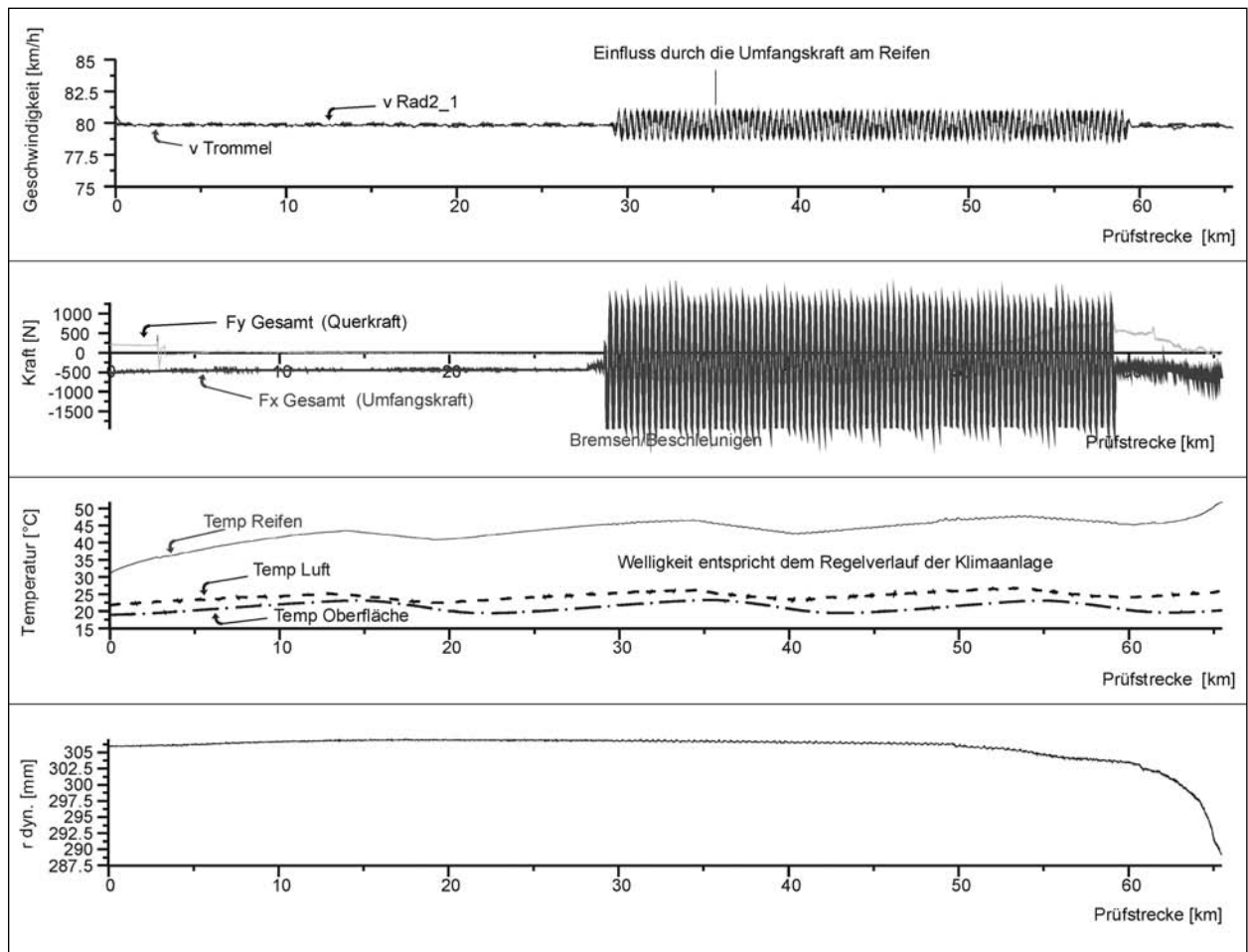


Bild 4.15: Aufgezeichnete Messdaten beim Lauf des Reifens C, der Versuch endete nach ca. 65 km

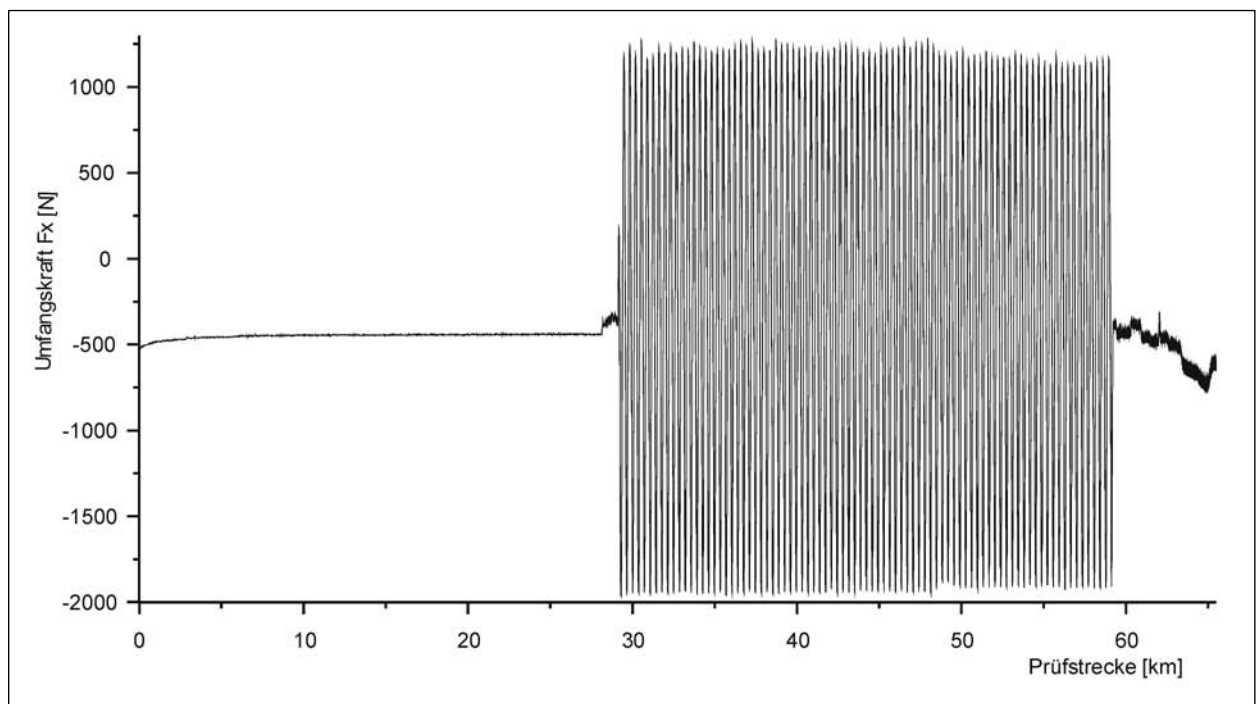


Bild 4.16: Verlauf der Umfangskraft F_x über der Prüfstrecke

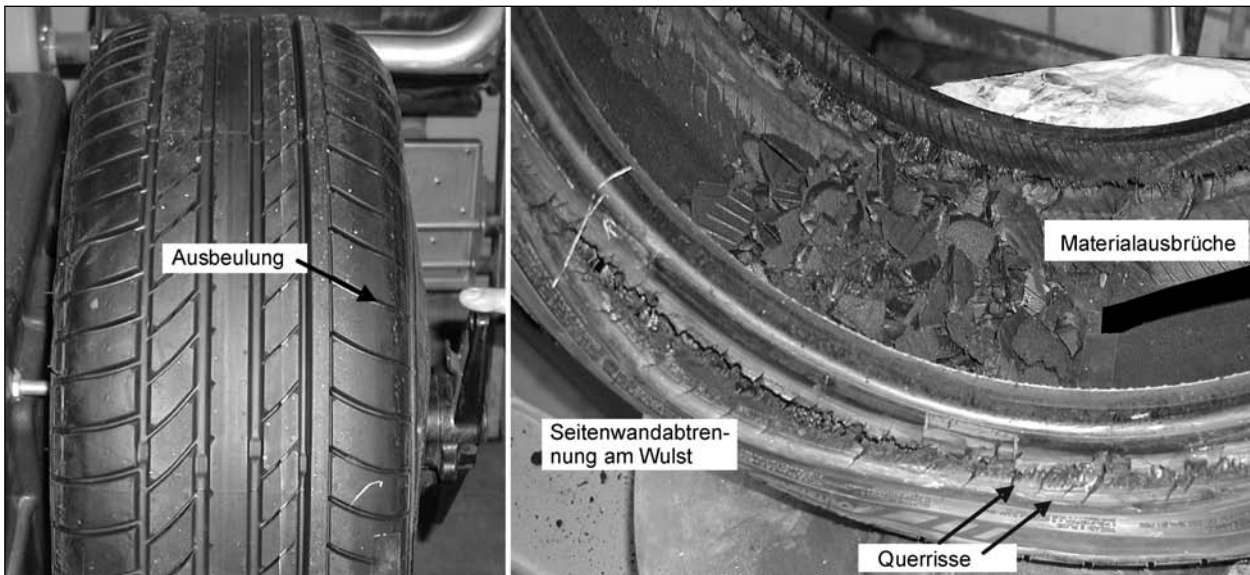


Bild 4.17: Reifen C nach dem Versuch, Beule in der Seitenwand und Riss in Reifenwulstnähe

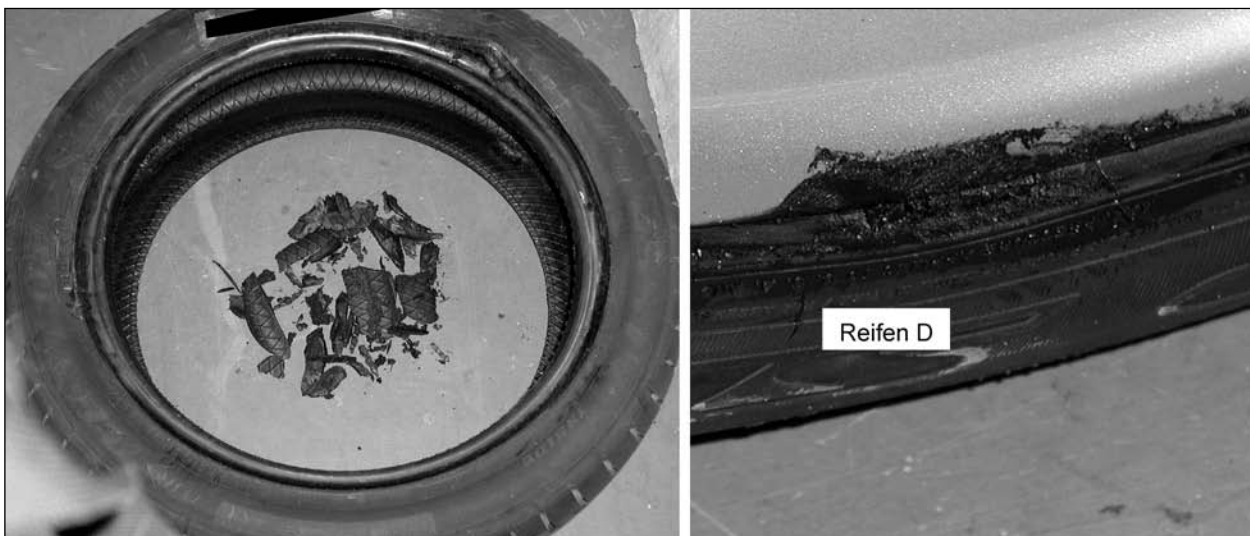


Bild 4.18: Reifen D nach dem Versuch

4.4.4 Reifen D

Vom Hersteller ist für den Reifen D eine Notlaufstrecke von 80 km angegeben. Nach einer Strecke von 81 km stieg der Rollwiderstand des drucklosen Reifens von bis dahin konstanten -445 N auf -750 N an. Nach 84 km musste der Versuch beendet werden, weil sich die Felge an einigen Stellen durch die Seitenwand des Reifens gedrückt hatte und der Reifen dadurch im Prüfstand starke Geräusche verursachte. Die beginnende Zerstörung konnte ab einer Strecke von 70 km durch ein Ansteigen der Reifentemperatur bemerkt werden. Die Kraftaufnahme und -übertragung an die Fahrbahn waren bei diesem Reifen bis zum Ende der Prüfung sehr gleichmäßig. Die Messdaten des dynamischen

Reifenhalbmessers liegen für diesen Versuch nicht vor. Einen Überblick über die aufgezeichneten Messdaten zeigt Bild 4.19.

Wie in Bild 4.18 zu sehen ist, erwärmte sich das Reifengummi im Bereich der Felge so stark, dass das Reifenmaterial anschlackte und auf die Felge verschmiert wurde. Im Reifinneren wurden durch die Walkarbeit aus der Innenseite des Reifens Teile des Gummis herausgebrochen. Diese Ausbrüche waren hier größere Stücke, es fehlte kleinteiliger Abrieb bzw. durch die Walkarbeit abgeriebene kugelige Gummiteile. Auch bei diesem Reifen wurde die Seitenwand durch das Felgenhorn an einer Stelle durchbrochen.

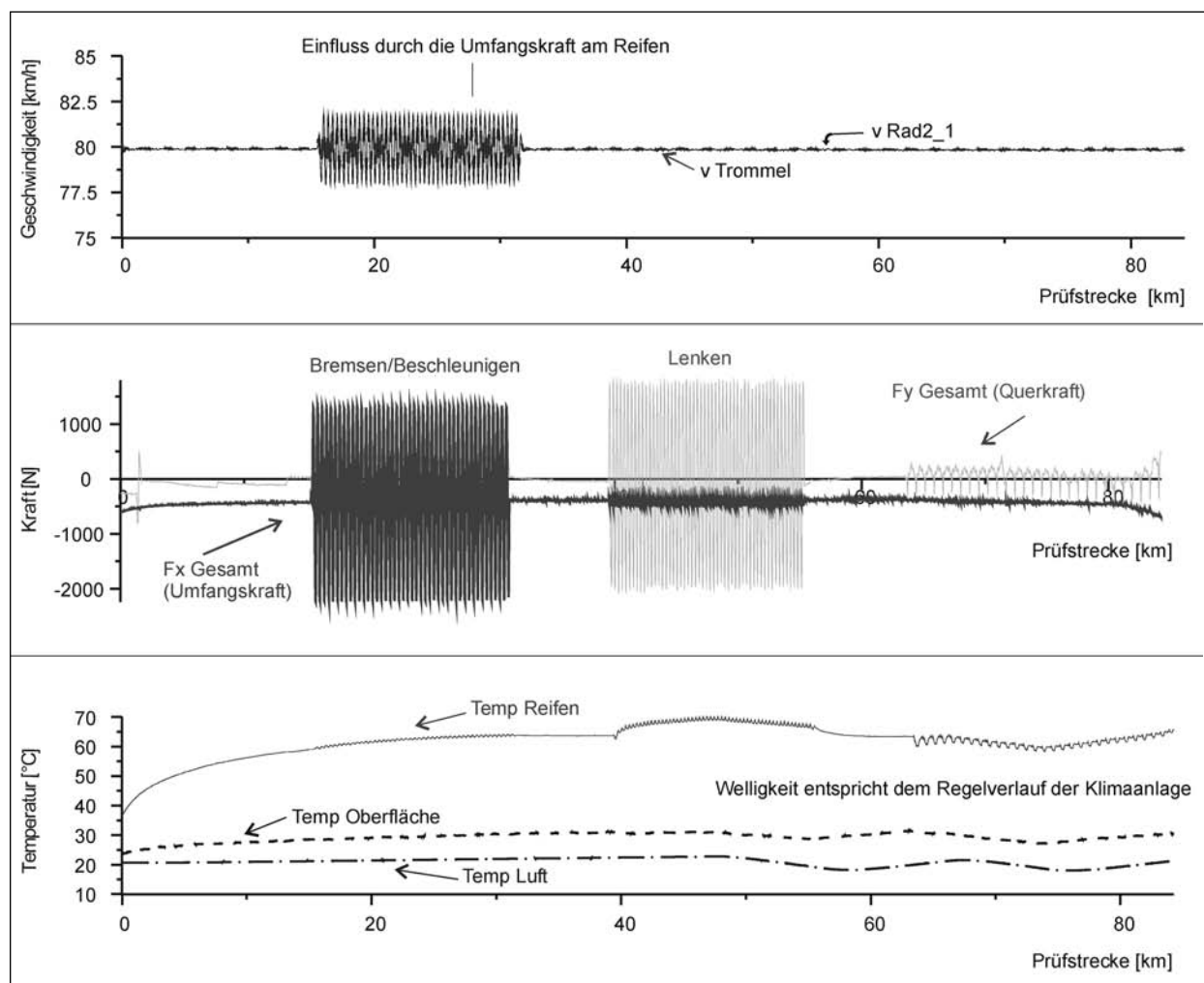


Bild 4.19: Aufgezeichnete Messdaten beim Lauf des Reifens D, der Versuch endete nach ca. 84 km

Der Reifen D konnte über die Prüfstrecke von 80 km betrieben werden und zeigte dabei ein konstantes Laufverhalten, bis die Felge die Seitenwand an einer Stelle durchgedrückt hatte.

4.4.5 Reifen E

Die vom Hersteller angegebene Notlaufstrecke beträgt für diesen Reifen 150 km. Der hier geprüfte Reifen behielt seine Notlaufeigenschaften über die gesamte Prüfdistanz von insgesamt 450 km bei.

Der Rollwiderstand des drucklosen Reifens betrug zu Beginn der Prüfung -400 N und fiel auf -320 N gering ab. Bei den zusätzlichen Belastungen Bremsen/Antreiben und Lenken wurden Kräfte bis 1.680 bzw. 2.580 N durch den Reifen übertragen.

Wie aus Bild 4.21, den Diagrammen 2 und 4, zu entnehmen ist, zeigte der Reifen E über eine Distanz von ca. 370 km eine konstante Kraftübertragung und eine nur geringe Veränderung des dyna-

mischen Radhalbmessers von ca. 2 mm. Nach dieser Strecke verändert sich der dynamische Halbmesser auf den nächsten 70 km um fast 5 mm. An der steigenden Seitenkraft, einem unruhigeren Lauf, der Veränderung des dynamischen Halbmessers und der ansteigenden Reifentemperatur sind die Beschädigung des Reifens und damit die Beeinträchtigung der Notlaufeigenschaften festzustellen.

Nach dem Versuch wurden in den Seitenwänden des Reifens am Ansatz zum Laufstreifen umlaufende Knickfalten festgestellt. Im Reifeninnern ist diese Schädigung durch einen erheblichen Abtrag von Gummi im Bereich der Falte ebenfalls festzustellen. Der Abtrag ist feinkörnig und besteht im Wesentlichen aus Gummistaub mit einzelnen ausgebrochenen Stücken von ca. 1 cm Länge. Der Bereich um den Reifenwulst ist nicht geschädigt. Die Art des Abtrags lässt darauf schließen, dass die Innenwand nicht angeschmolzen wurde und daher der Abtrag durch Abrasion gebildet wurde. Die

Knickfalte und das abgeriebene Material sind in Bild 4.20 dargestellt.

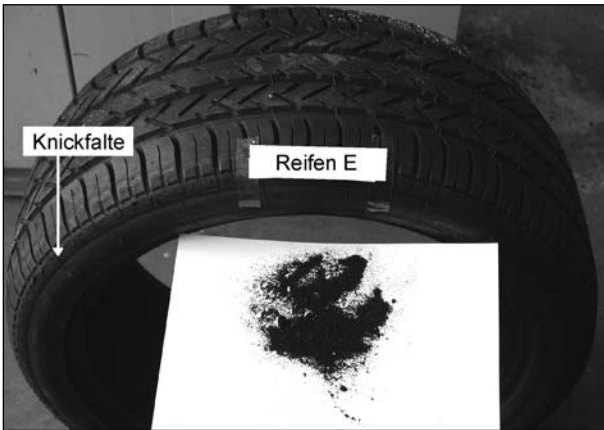


Bild 4.20: Schädigung des Reifens E durch den Notlaufbetrieb über 450 km

4.4.6 Reifen F

Vom Hersteller ist für den Reifen F eine Notlaufstrecke von 80 km angegeben. Der geprüfte Reifen überstand diese Strecke, ohne dass eine Schädigung festgestellt werden konnte. Auch die verlängerte Prüfdistanz von 240 km wurde ohne wesentliche Veränderungen der Notlaufeigenschaften überstanden.

Der Reifen F wurde bei einem Tragfähigkeitsindex von 82 mit der geringsten Radlast aller geprüften Reifen belastet, daher waren auch die am Reifen wirkenden Kräfte, verglichen mit denen der anderen Reifen, gering. So betrug der Rollwiderstand des drucklosen Reifens nur -305 N, der sich nach einer Einlaufzeit auf -190 N verringerte. Eine grafische Darstellung der Messdaten der Prüfung des Reifens F zeigt Bild 4.23. Bis zu einer Strecke von

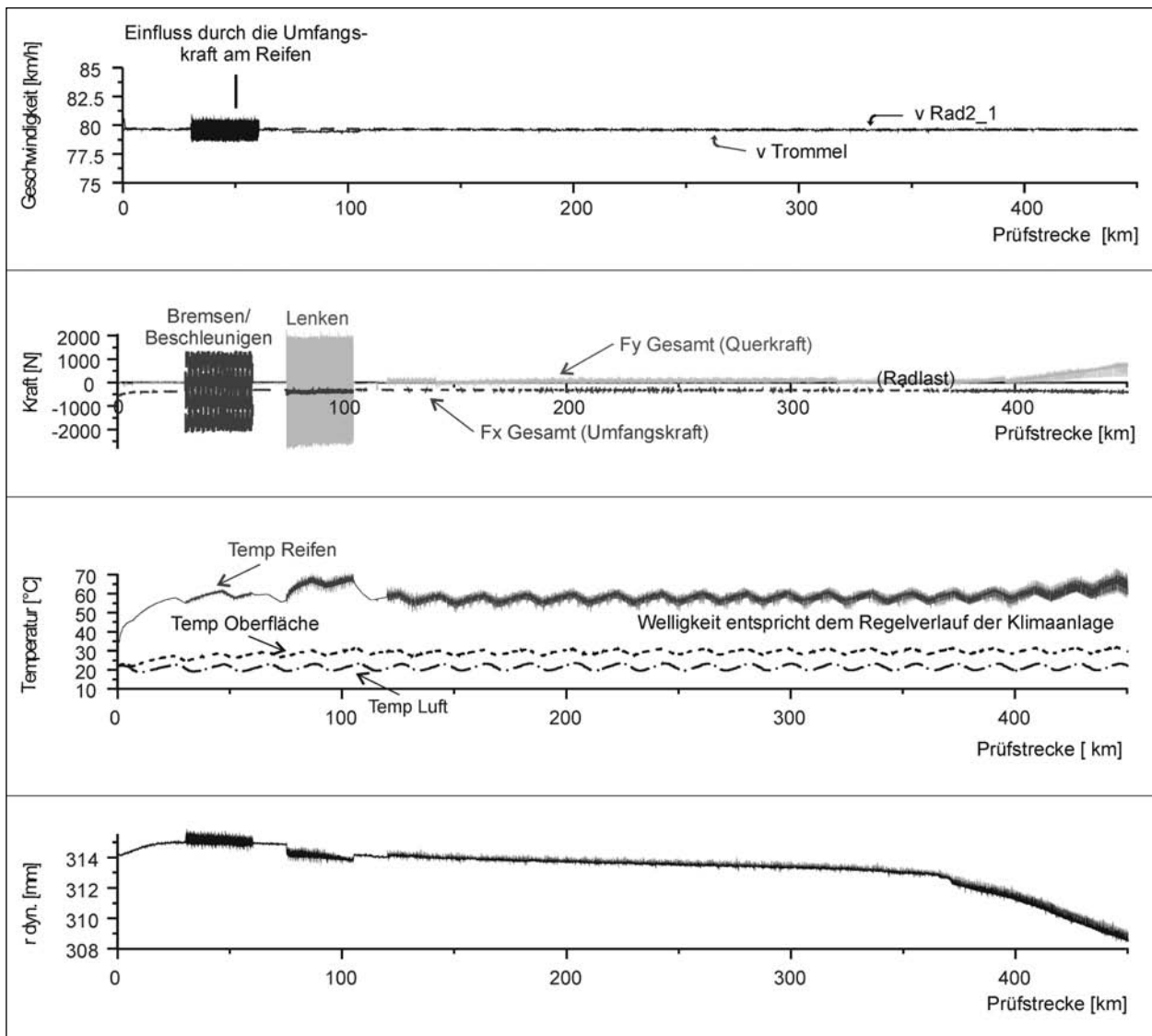


Bild 4.21: Aufgezeichnete Messdaten beim Lauf des Reifens E, der Versuch endete nach der Gesamtstrecke von 450 km

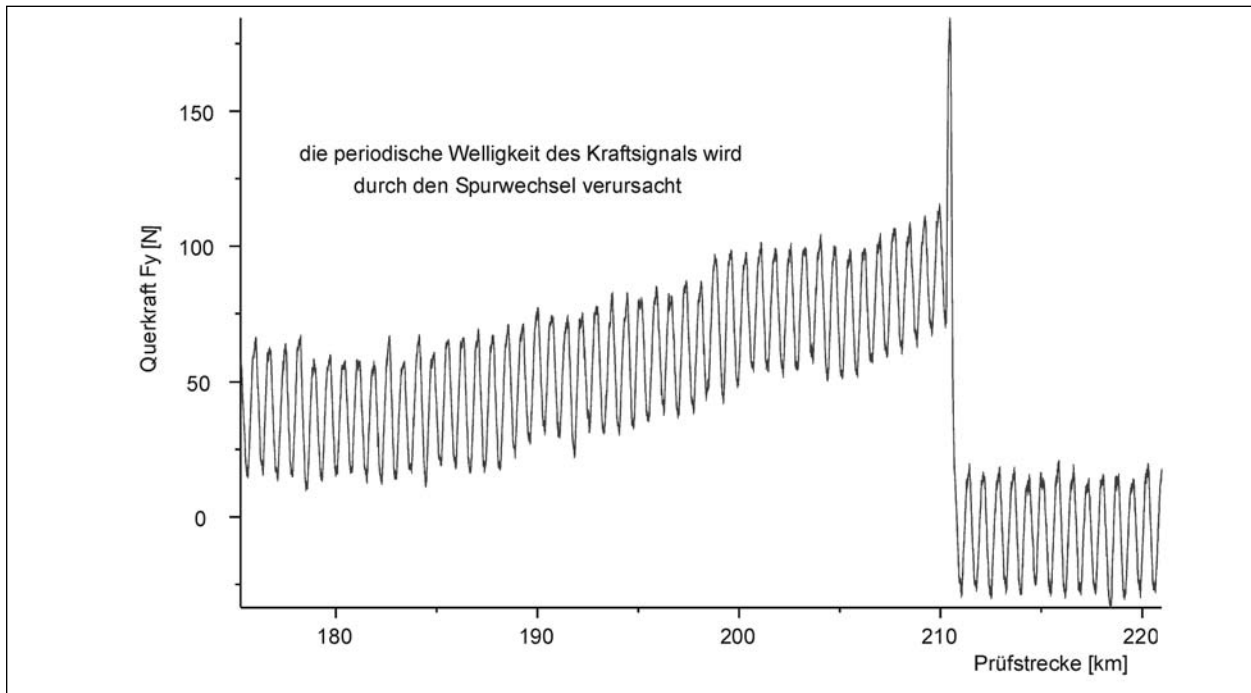


Bild 4.22: Unregelmäßigkeit im Verlauf der Querkraft (F_y) im Belastungsmodus Spurwechsel

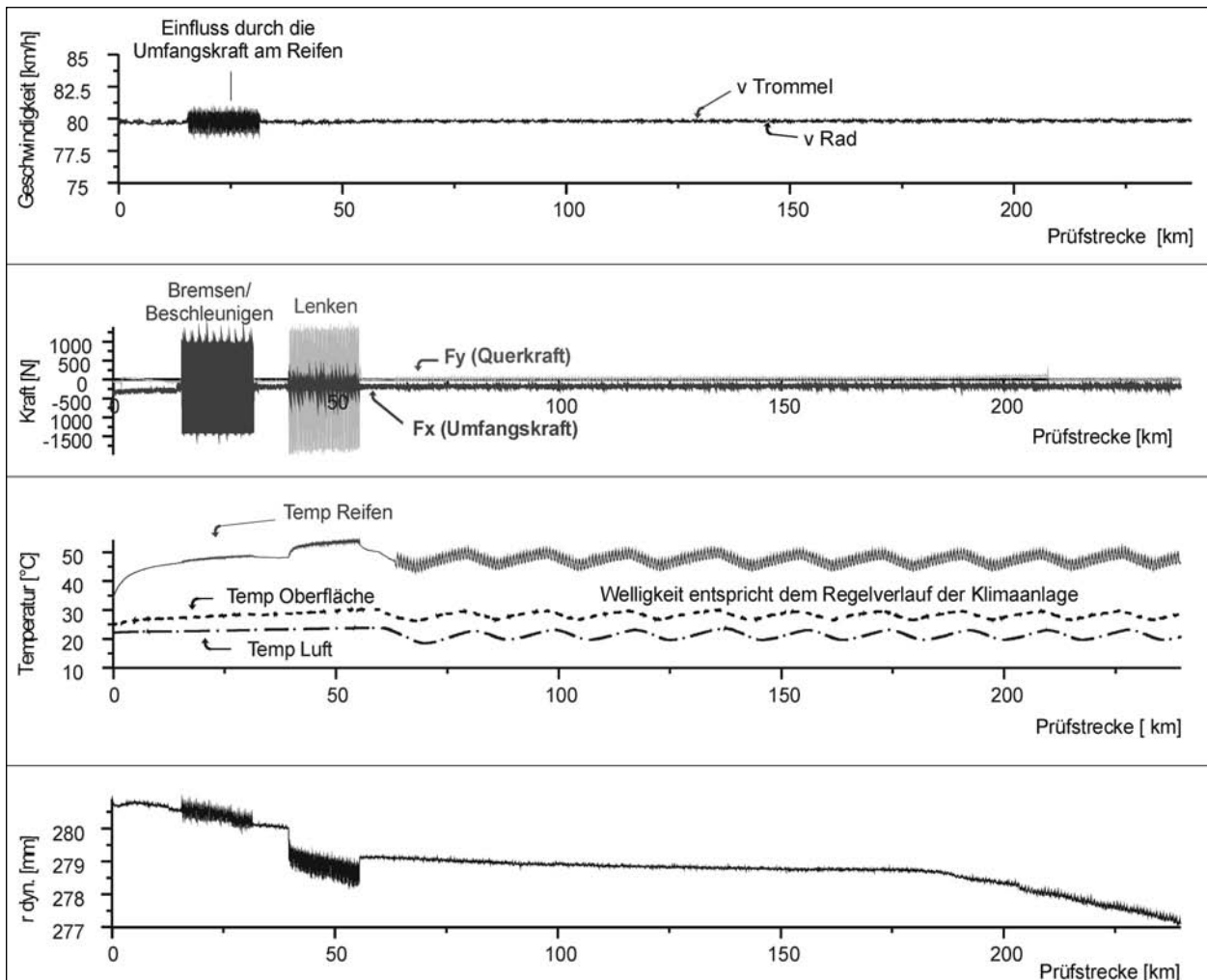


Bild 4.23: Aufgezeichnete Messdaten beim Lauf des Reifens F, der Versuch endete nach der Gesamtstrecke von 240 km

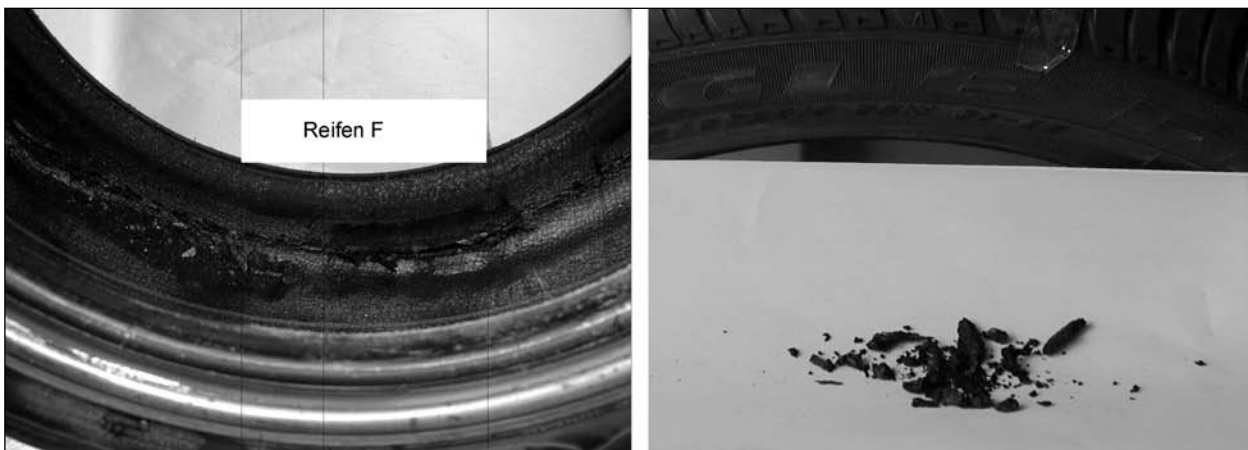


Bild 4.24: Innenansicht des Reifens F und ausgebrochenes Material

180 km veränderte sich der dynamische Reifenhalmmesser nur um 2 mm. Danach verlief diese Verringerung schneller und die Querkraft F_y stieg leicht an. Dieser Anstieg normalisierte sich abrupt nach 210 km mit einer plötzlichen Veränderung des Schräglaufwinkels um $0,1^\circ$ (s. Bild 4.22).

Nach dem Versuch wies der montierte Reifen keine Beschädigung auf. Nach der Demontage des Reifens wurde in der Lauffläche die Knickkante in der Seitenwand sichtbar, in deren Bereich erste Materialausbrüche zu sehen waren. Die Menge war sehr gering (s. dazu Bild 4.24). Weiterhin wurden im Reifeninnern oberflächliche Risse festgestellt, die von dem Wulst radial zur Lauffläche liefen.

4.5 Bewertung der Prüfungen

Nach Informationen aus der Reifenindustrie werden dort die Laufleistungen von Reifen mit Notlaufeigenschaften im realen Fahrbetrieb ermittelt. Da die Prüfvorgaben der verschiedenen Reifenfirmen der BAST nicht zur Verfügung standen, wurde eine BAST-eigene Prüfprozedur entwickelt, mit der alle Reifen nach dem gleichen Verfahren geprüft werden konnten.

Die Prüfprozedur der BAST führte bei zwei Reifentypen zu einem vorzeitigen Abbruch der Prüfung. Ein weiterer Reifentyp fiel kurz nach Erreichen der zugesagten Laufleistung aus. Die drei restlichen Reifen absolvierten sogar die erweiterte Prüfstrecke, die der dreifachen Distanz der vom Hersteller angegebenen Strecke entsprach. Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Beim Vergleich der Zahlenwerte in der Tabelle ist zu beachten, dass die Reifen unterschiedliche Tragfähigkeitsindizes aufweisen und daher mit unter-

schiedlich hohen Radlasten und Umfangskräften belastet wurden. Die unterschiedlich hohen Radlasten bewirkten an den drucklosen Reifen unterschiedlich hohe Rollwiderstände³, die außer von den niedrigeren Radlasten auch von der individuellen Walkarbeit bestimmt wurden.

So erreichten die prozentualen Anteile des Rollwiderstandes beim Reifen A lediglich 7,2 % der Radlast am Beginn der Prüfung und 5,0 % nach der Zusatzbelastung. Beim Reifen C, der in diesem Test die geringste Notlaufeignung aufwies, betrug der Rollwiderstand durchgehend 9,3 %. Bei den meisten Reifen verringerte sich der Rollwiderstand während der Belastung. Gründe dafür könnten die Erwärmung des Reifens und die damit einhergehende leichtere Deformation (Walken) des Reifens sein.

Die Zusatzprüfung „Beschleunigen und Bremsen“ stellte für die Reifen eine moderate Belastung dar, abgesehen von dem Reifen C, bei dem während dieser zusätzlichen Belastung erste Ausfallerscheinungen auftraten.

Die vorgegebene Umfangskraft wurde von den Reifen mit unterschiedlichen Anteilen an Querkräften auf die Fahrbahn übertragen. Es kann angenommen werden, dass die auftretenden Querkräfte durch das Walken des Reifens, das nicht symmetrisch über die Reifenaufstandsfläche erfolgt, entstehen.

Während des wechselnden Schräglauf des Reifens, bei dem höhere Kraftspitzen erreicht werden als beim Beschleunigen oder Bremsen, verbleibt die Umfangskraft auf dem Niveau des Rollwiderstandes.

³ Die hier gemessenen Rollwiderstände sind nicht entsprechend der ISO 8767 ermittelt worden

Reifentyp/ bezeichnung	Notlaufdistanz [km]		Radlast F_z [N]	Rollwiderstand* drucklos [N] Zu Beginn/nach Zusatzbelastung		Umfangskräfte F_x [N] Beschleun./Bremsen SOLL IST**		Seitenkräfte F_y [N] Lenkwinkel $\pm 2^\circ$		Beschädigung/ Bemerkung
	SOLL (erweitert)	IST								
Reifen A	200 (600)	600	5.300	-380 (7,2 %)	-270 (5,0 %)	1.590 1.560	-1.590 -1.540	960	-1.060	Bis auf oberflächliche Risse im Innenring keine Beschädigungen; Kräfte am Rad konstant, große Laufruhe, kein Abrieb oder Ausbrüche
Reifen B	150 (450)	115	5.415	-450 (8,3 %)	-405 (7,5 %)	1.625 1.610	-1.625 -1.570	1.540	-2.400	Starke Beschädigungen am Reifen, Risse in der Seitenwand, bis 105 km sind die Kräfte am Rad und das Abrollverhalten konstant, Ausbrüche kugelig 5 mm, Stücke 1-2 cm ²
Reifen C	150 (450)	66	4.826	-450 (9,3 %)	-450 (9,3 %)	1.448 1.700	-1.448 -1.490	---	---	Stärkste Beschädigungen, Längs- und Querrisse in den Seitenwänden, Durchtrennung der Seitenwand in Wulstnähe, mangelnde Laufruhe, bei Belastung in Umfangsrichtung treten relativ hohe Seitenkräfte auf, Ausbrüche in 2-3-cm ² -Stücken
Reifen D	80 (240)	84	5.415	-445 (8,2 %)	-445 (8,2 %)	1.625 1.745	-1.625 -1.735	1.750	-1.930	Starke Beschädigung der Seitenwand, an einer Stelle wurde die Seitenwand durchtrennt, konstante Kraftübertragung und hohe Laufruhe bis zum Durchtrennen der Flanke nach 81 km, wenige große Ausbrüche
Reifen E	150 (450)	450	5.101	-410 (8,0 %)	-340 (6,7 %)	1.530 1.680	-1.530 -1.640	1.880	-2.580	Deutliche Knickfalte in der Seitenwand, im Reifeninnern deutliche Laufspur des Felgenhorns mit erheblichem Gumbiabrieb, hauptsächlich feinkörniger Abrieb mit einigen kleinen ausgebrochenen Stücken, bis 370 km konstante Kraftübertragung und Laufruhe
Reifen F	80 (240)	240	3.728	-305 (8,2 %)	-190 (5,1 %)	1.118 1.225	-1.118 -1.098	1.270	1.920	Keine Beschädigung der Außenkontour, im Innern beginnende Ausbrüche, kenntlich durch Risse vom Wulst in Richtung Lauffläche, bis 180 km konstante Kraftübertragung, laufruhig

* Rollwiderstand nicht entsprechend ISO 8767 ermittelt
** gemittelter maximaler Messwert
+ (-) Rollwiderstandskraft

Tab. 4.3: Übersicht über die Prüfergebnisse der sechs Reifen mit Notlaufeignung

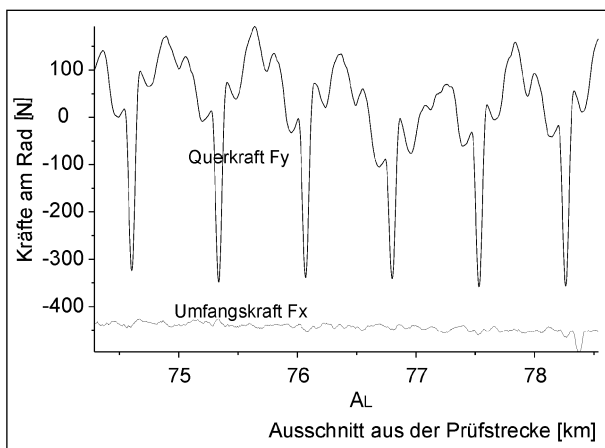


Bild 4.25: Messung der Kräfte in Längs- und Querrichtung am Reifen D nach einer Schädigung des Reifens

Während des parallelen Versetzens des Reifens auf der Fahrbahn (Spurwechsel) pendeln bei einem intakten Reifen die Querkraft um 0 N und die Umfangskraft um den Rollwiderstand. Bei einem defekten Reifen werden höhere Querkräfte gemessen, die wie bei dem Bremsen oder Beschleunigen des Reifens durch unsymmetrisches Abrollen des Reifens entstehen. Kräfte in Längs- und Querrichtung in einem Abschnitt der Prüfstrecke, nach einer Beschädigung des Reifens D, zeigt Bild 4.25.

Die Schädigungen an den selbsttragenden Reifen werden durch das Zusammenfallen der Seitenwand und das Abrollen der Felgenhörner auf der gefalteten Seitenwand verursacht. Bei diesem Abrollen durchdringen die Felgenhörner zum Teil die Seitenwand, verändern so das Abrollen des drucklosen Reifens und damit die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn und führen so zum Verlust der Fahrstabilität.

4.6 Schlussbetrachtung

Wie auf Grund der aufwändigen Konstruktion zu erwarten war, absolvierte das Notlaufsystem (Reifen A) den drucklosen Betrieb am überzeugendsten, weil bei diesem System kein Bauteil eine „unnormale“ Belastung erfährt und auch die Temperaturerhöhung des Reifens geringer war als bei den selbsttragenden Reifen. Als „unnormale“ Belastung ist das Abrollen des Felgenhorns auf der gefalteten Reifenseitenwand zu verstehen. Das bedeutet für den Reifen zusätzliche Belastungen durch die vermehrte Walkarbeit infolge der Knickung der Seitenwand und eine zusätzliche Druckbelastung der Seitenwand durch das Felgenhorn. Je nach Verhalten des Reifenwulstes kann

dieses Abrollen zu einem Durchtrennen der Seitenwand führen. In jedem Fall führen die Belastungen zu starken lokalen Temperaturerhöhungen, die zum Anschmelzen von Reifenmaterial führen können.

Wie die Ergebnisse dieser Prüfung zeigen, war die absolvierte Laufleistung verglichen mit der vom Hersteller angegebenen Laufleistung bei zwei von sechs Reifen zu gering.

5 Reifendruckkontrollsysteme

5.1 Allgemeines

Viele Fahrer kontrollieren den Reifendruck an ihrem Fahrzeug zu selten. Ein zu niedrig eingestellter Reifendruck führt zu einem Walken des Reifens. Dadurch kann der Kraftstoffverbrauch erhöht, der Bremsweg verlängert, die Fahrstabilität des Fahrzeugs beeinträchtigt und die Lebensdauer des Reifens verkürzt werden. Auch ein zu hoch eingestellter Luftdruck kann negative Auswirkungen haben. Infolge von Wartungsmängeln kann es langfristig zur völligen Zerstörung des Reifens (Reifenplatzen oder Abspringen des Reifens von der Felge) kommen. Weitere Ursachen von Reifenpannen können eindringende Fremdkörper, Schäden nach Überfahren eines Hindernisses, überaltete Reifen, abgefahrene Profile, Materialfehler, Schäden durch Überladung des Fahrzeugs oder falsche bzw. ungünstige Reifen-Fahrzeug-Kombinationen sein [70].

Da man bei Run-Flat-Reifen einen Druckverlust auf Grund der Reifeneigenschaften weit weniger gut bemerkt als beim Standardreifen, ist hier besonderer Bedarf für Reifendruckkontrollsysteme (RDKS) zu sehen.

Bereits 1960 wurden Systeme vorgestellt, die den Fahrer bei einem Druckverlust im Reifen warnen sollen, um mögliche Unfälle durch Reifenschäden zu vermeiden. Diese ersten Systeme waren jedoch noch sehr fehlerbehaftet. Erst seit Mitte der neunziger Jahre kamen Reifendruckkontrollsysteme serienmäßig zum Einsatz. International hat sich hierfür die Bezeichnung Tire Pressure Monitoring Systems (TPMS) durchgesetzt, daher wird im Folgenden auf diese Bezeichnung zurückgegriffen. Man unterscheidet indirekt und direkt messende Systeme (s. Kapitel 5.2, 5.3). Noch in der Entwicklung befinden sich zurzeit Systeme, die über eine bloße Überwachungs- bzw. Warnfunktion hinausgehen und den Reifendruck im Pannenfall durch aktive Eingriffe stabilisieren (s. Kapitel 5.5).

Nach einer Unfallserie auf Grund fehlerhafter Reifen wurde in den USA die gesetzliche Einführung von TPMS gefordert. Ab September 2005 sollen 50 % aller in den USA neu zugelassenen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge mit entsprechenden Systemen ausgestattet werden, ab September 2007 ist der Einbau in alle Neufahrzeuge verpflichtend. Es wird nicht vorgeschrieben, welche Systeme eingebaut werden müssen, es werden jedoch Mindestanforderungen gestellt. Danach muss ein Druckverlust von 25 % bezogen auf den Sollwert innerhalb einer Zeit von 10 Minuten erkannt werden und alle Reifen müssen gleichzeitig und unabhängig voneinander überwacht werden [71]. Da die festgelegten Anforderungen auch von Importfahrzeugen erfüllt werden müssen, hat die Gesetzeslage in den USA Rückwirkungen auf alle Fahrzeughersteller. (Aus Deutschland werden jährlich etwa 600.000 Fahrzeuge nach Nordamerika exportiert [72]). In Europa gibt es noch keine Regelungen zu TPMS, eine ISO-Gruppe erarbeitet jedoch zurzeit einen Entwurf für eine entsprechende Norm.

Im Folgenden werden verschiedene Prinzipien der Reifendruckkontrolle sowie ihre Vor- und Nachteile dargestellt.

5.2 Indirekte Systeme

Im Falle eines Druckverlustes verringert sich der Abrollumfang des Reifens. Dadurch erhöht sich die Raddrehzahl. Indirekte TPMS greifen diese Information auf, um einen Druckverlust über Differenzdrehzahlen zu detektieren und den Fahrer gegebenenfalls zu warnen. Voraussetzung hierfür ist, dass das Fahrzeug über ein ABS oder andere fahrdynamische Systeme verfügt, die die Raddrehzahlen zur Verfügung stellen.

Vorteile indirekter TPMS

- Die Systeme sind einfach und robust.
- Die Systeme sind kostengünstig, da sie ohne zusätzliche Sensoren oder Batterien auskommen.
- Es gibt nahezu keine Verschleißteile.
- Ein Reifen- bzw. Radwechsel erfordert keine besondere Sorgfalt. Das System kann in diesem Fall vom Fahrer durch Knopfdruck oder per Menüeingabe neu kalibriert werden.

Nachteile indirekter TPMS

- Es wird kein Absolutdruck gemessen.
- Bei geringem Minderdruck erfolgt keine Warnung. Ein Druckverlust wird erst bei Abweichungen von 25-30 % des Sollwertes erkannt.
- Es erfolgt keine Temperaturmessung im Reifen.
- Ein gleichmäßiger Druckverlust in allen Reifen, z. B. durch Diffusion, wird nicht erkannt.
- Es kann häufiger zu Falschmeldungen kommen. Zum einen können beispielsweise bei scharfen Kurvenfahrten oder winterlichen Straßenverhältnissen Fehlalarme durch Drehzahlunterschiede ausgelöst werden [73, 74]. Zum anderen wird ein Druckverlust bei breiten Niederquerschnittsreifen unter Umständen erst spät bemerkt, da sich in diesem Fall der Abrollumfang nur geringfügig verändert.
- Ein Druckverlust kann nur im Fahrbetrieb erkannt werden.
- Die Systeme sind praktisch nicht nachrüstbar, da sie eng mit der jeweiligen Fahrzeugelektronik verknüpft sind.

Bei indirekten TPMS der ersten Generation kann vom System nur erkannt werden, wenn ein Reifen Druck verliert. Damit können diese Systeme die Anforderungen der US-Gesetzgebung nicht erfüllen. Inzwischen gibt es jedoch Weiterentwicklungen, die neben den Raddrehzahlen weitere fahrdynamische Einflussgrößen berücksichtigen (z. B. Querbesehleunigung, Radmomente, Gierrate ...) [75]. Dadurch haben sich auch die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit dieser Systeme verbessert und es ist möglich, einen Druckverlust an allen Reifen unabhängig voneinander zu erkennen [76]. Es ist daher damit zu rechnen, dass künftig auch indirekte TPMS in der Lage sind, die US-Normen zu erfüllen. Noch im Entwicklungsstadium befinden sich Überlegungen, den Reifendruck in Abhängigkeit von Veränderungen der Resonanzfrequenz des Rad-Reifensystems zu berechnen. Dies geschieht durch Messung der Drehschwingungen, die der Radrotation als Störung überlagert sind [73].

Auf Grund des günstigen Preis-Leistungsverhältnisses werden indirekte TPMS bevorzugt in Volumenmodelle eingebaut. Sofern der Fahrer den Reifendruck weiterhin regelmäßig überprüft, um Diffusionsverluste auszugleichen, ist ein indirektes TPMS ausreichend, denn einem völligen Druckver-

lust bei einem einzelnen Reifen geht in etwa 72 % der Fälle ein schleichender voraus [77], der von einem indirekten TPMS erkannt werden kann. Kommt es zum Platzen des Reifens, so bietet auch ein genaueres oder schnelleres System keine Vorteile. Nach Einschätzung eines Reifenherstellers werden in Kombination mit Run-Flat-Reifen überwiegend indirekte TPMS eingesetzt [78].

5.3 Direkte Systeme

Bei den direkten TPMS sind in jedem Rad Sensoren angebracht, die Druck, Temperatur und teilweise auch Beschleunigung des Reifens messen. Diese Daten werden über Funk an einen Empfänger übertragen und auf einem Monitor im Innenraum angezeigt. Die Sensoren müssen Temperaturen zwischen -40 °C und $+120\text{ °C}$ sowie Beschleunigungen bis zu 2.000 g standhalten. Sie sind entweder mit einem Stahlband auf der Felge befestigt oder sie sitzen im Inneren des Rades am Reifenventil.

Vorteile direkter TPMS

- Der Fahrer braucht den Reifendruck nicht mehr zu überprüfen (Komfortgewinn).
- Es können auch geringfügige Druckabweichungen erkannt werden.
- Die einzelnen Reifen werden unabhängig voneinander überwacht.
- Es wird auch die Reifentemperatur erfasst.
- Veränderungen von Druck oder Temperatur können schnell erfasst werden.

Nachteile direkter TPMS

- Die Systeme sind relativ teuer, da in jedem Reifen (Sommerreifen, Winterreifen, falls gewünscht, auch im Reservereifen) Sensoren untergebracht werden müssen.
- Der Reifenwechsel erfordert besondere Aufmerksamkeit: Bei der Demontage des Reifens muss darauf geachtet werden, dass die Sensoren nicht beschädigt werden. Bei Verwendung von Montagepaste, Reinigungs- oder Lösungsmitteln, Reifendichtmitteln oder Hochdruckreinigern können ebenfalls Schäden an den Sensoren entstehen. Wird ein Sensor bei der Montage des Reifens nicht ordnungsgemäß befestigt

oder beschädigt, so kann dies zur Zerstörung des Reifens von innen heraus führen.

- Derzeit gibt es bei den meisten Systemen noch Probleme mit den Batterien für die Energieversorgung der Sensoren. Da die Batterie häufig im Sensor integriert ist, muss bei einem Batterieausfall der komplette Sensor ausgetauscht werden.
- Es kann zu Fehlmeldungen kommen, wenn beispielsweise Wärme von den Bremsscheiben an die Reifen abgestrahlt wird oder die Felge und die Luft im Reifen unterschiedlich schnell erwärmt werden [79, 80].
- Es sind nicht alle Felgen für den Einsatz der Sensoren geeignet.

Bislang werden direkte TPMS auf Grund der höheren Kosten gegenüber indirekten TPMS bevorzugt in Fahrzeuge der Oberklasse eingebaut. Einige Systeme sind auch in der Nachrüstung erhältlich. Insbesondere bei Fahrzeugen der Oberklasse wird jedoch das dadurch erforderliche separate Display als störend empfunden.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher direkter TPMS. Bei den einfacheren Systemen werden die Daten in einem festen Zeittakt an den Empfänger gefunkt. Einige Systeme können nicht erkennen, welcher Reifen Druck verliert. Wenn eine Positions-erkennung erfolgt, kann es Probleme geben, wenn beispielsweise Vorder- und Hinterräder getauscht werden oder wenn Radsätze, die ebenfalls mit Sensoren bestückt sind, im Kofferraum transportiert werden. In diesen Fällen muss das System neu initialisiert werden. Dagegen gibt es komfortable Systeme, die beispielsweise den Abfragetakt geschwindigkeitsabhängig regeln, eine Druckabfrage bei stehendem Fahrzeug ermöglichen oder selbstlernende Funktionen beinhalten. Die nächsten Entwicklungsschritte gehen dahin, künftig ganz auf eine Batterie im Sensor zu verzichten, wobei die Energie dann von einem Transponder im Radhaus an den Drucksensor im Reifen geliefert wird. Weiterhin sollen auch bei direkten TPMS verstärkt fahrdynamische Einflussgrößen berücksichtigt werden. Umgekehrt ist geplant, Daten aus dem TPMS für Fahrdynamikregelungen zur Verfügung zu stellen. Diese könnten dann beispielsweise für eine erweiterte ESP-Regelung oder eine Rollover-Prävention genutzt werden.

Auch für Nutzfahrzeuge und Motorräder werden inzwischen direkte TPMS angeboten. Lkw-Fahrer

haben häufig Probleme, den Reifendruck zu überprüfen, wenn die Reifenventile, z. B. bei Zwillingsreifen, schlecht zugänglich sind. Während der Fahrt werden Reifenschäden unter Umständen vom Fahrer nicht sofort bemerkt, insbesondere bei defekten Reifen an Aufliegern oder Anhängern. Bei den Motorradfahrern liegt das Augenmerk vor allem auf den schweren Touren-Maschinen. Ein falscher Reifendruck führt hier zu einer starken Verschlechterung des Fahrverhaltens [81].

In der Entwicklung befinden sich zurzeit Sensoren, die in den Reifen implementiert werden. Diese Sensoren sollen nicht nur wie die bisherigen Systeme Luftdruck und Temperatur des Reifens erfassen, sondern sie sollen darüber hinaus detaillierte Informationen über Fahrbahnzustand und Reifenzustand liefern.

5.4 Kombinierte Systeme

Durch Kombination eines direkten TPMS mit einem indirekten TPMS lassen sich ohne hohe Zusatzkosten Vorteile erzielen:

- Wenn die Reifenerkennung durch das indirekte TPMS erfolgt, kann für die Bestimmung des Reifendrucks ein einfaches und damit kostengünstigeres direktes TPMS verwendet werden.
- Über das indirekte TPMS kann erkannt werden, ob das Fahrzeug fährt oder steht. Beim parkenden Fahrzeug könnte dann die Batterie im Sensor des direkten TPMS auf einen Energiesparmodus umgeschaltet werden.
- Wenn besonders hohe Sicherheitsanforderungen gestellt werden, kann ein indirektes TPMS als Rückfallebene für ein defektes Modul des direkten TPMS genutzt werden.

Eine Kombination aus direktem und indirektem TPMS wurde 2004 erstmalig bei einem Serienfahrzeug angeboten [82].

5.5 Automatische Reifendruckregelung

Die zuvor dargestellten TPMS können den Fahrer im Fall eines Druckverlustes lediglich warnen. In der Entwicklung befinden sich zurzeit Systeme, die darüber hinaus aktive Eingriffe vornehmen können, um den Reifendruck unter allen Bedingungen konstant zu halten. Unter den Begriffen „Automatische Reifenluftdruck-Regelanlage“ (ALR) [83] und „Tire Intelligent Pressure Management“ (TIPM) [71] wur-

den Systeme vorgestellt, die dem Reifen über eine spezielle Radnabe Druckluft zuführen, wenn ein TPMS einen Minderdruck registriert. Gleichzeitig wird der Fahrer gewarnt. Sollte im umgekehrten Fall der Reifendruck zu hoch werden, kann über ein Ventil kontrolliert Luft aus dem Reifen entweichen. Darüber hinaus kann der Reifendruck während der Fahrt vom Fahrer oder selbstständig angepasst werden, um beispielsweise unterschiedliche Straßenverhältnisse berücksichtigen zu können. Diese Technik hat sich bereits bei Wüstenrallyes oder in Militärfahrzeugen bewährt. Da die Systeme mit den vielen erforderlichen Komponenten (Kompressor, Druckbehälter, Versorgungsleitungen, Ventile ...) sehr aufwändig sind, ist mit hohen Mehrkosten zu rechnen. Diese Kosten könnten sich reduzieren, wenn der Kompressor genutzt würde, um auch andere Fahrzeugsysteme (Bremskraftverstärker, Heckklappe, Schiebedach ...) pneumatisch zu betreiben.

Ein ähnliches System wird auch für Motorräder angeboten: In den Speichen einer speziell konstruierten Felge befindet sich ein Druckluftspeicher mit einem Inhalt von 2,5 l, der mit einem Druck von 8-10 bar befüllt werden kann. Über ein Spezialventil wird der entsprechende Reifen im Falle eines Druckverlustes automatisch mit Luft versorgt. Im Normalbetrieb dient das System dazu, durch Diffusion bedingte Druckverluste auszugleichen und den Reifendruck damit konstant zu halten. Bei einem größeren Druckverlust steht das Luftvolumen aus der Felge zur Verfügung, um dem Fahrer mehr Zeit zu geben, das Motorrad sicher zum Stehen zu bringen [84].

6 Gesamtbetrachtung

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen der BAST lassen sich die im Folgenden aufgeführten Schlussfolgerungen ziehen. Diese betreffen sowohl die Tests zur Dauerhaltbarkeit im drucklosen Zustand, den Einfluss auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs als auch Aspekte zur Reifendruckkontrolle.

Von den sechs im Innentrommelprüfstand der BAST untersuchten Reifen musste die Prüfprozedur bei zwei Reifen vorzeitig, das heißt vor Erreichen der vom Hersteller angegebenen Notlaufstrecke, abgebrochen werden. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die von der BAST ge-

wählte Prüfprozedur mit starken Lenk- und Bremsvorgängen harte Anforderungen an die Notlauffähigkeiten der Reifen gestellt hat. Mit drei Reifen konnte jedoch sogar das Dreifache der vorgegebenen Notlaufstrecke absolviert werden. Dies zeigt zum einen, dass Reifen existieren, die auch strengen Prüfbedingungen genügen können, zum anderen, dass die Prüfbedingungen der BASt geeignet sind, Unterschiede in den Notlaufeigenschaften der Run-Flat-Reifen herauszuarbeiten. Bild 6.1 zeigt die erreichten Notlaufstrecken, wobei die Sollstrecken jeweils dem Wert 100 % zugeordnet wurden.

Der Reifen mit innen liegendem Stützring zeigte nahezu keine Schäden nach der Prüfung. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass dieses System mit dem Stützring gerade ein Bauteil aufweist, das allein für die Kraftübertragung der Radlast zuständig ist. Die selbsttragenden Reifen mit verstärkter Seitenwand wiesen in unterschiedlicher Ausprägung wesentlich größere Beschädigungen nach den Tests auf. So kam es zu Ausbrüchen von Reifenmaterial in unterschiedlicher Korngröße, der Reifenwulst beulte sich aus, die Seitenwände zeigten Risse und Knickfalten. Teilweise wurde die Seitenwand sogar durchtrennt. Im Verlauf der Prüfung änderten sich die Laufruhe bzw. das Abrollverhalten der Reifen mit der gefahrenen Strecke sowie auch der Rollwiderstand der Reifen. Das sukzessi-

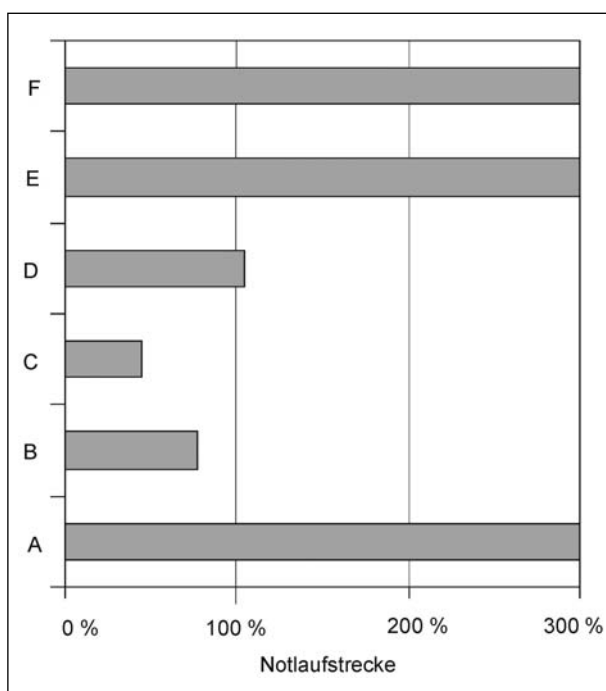


Bild 6.1: Im Vergleich zur Sollstrecke (100 %) erreichte Fahrstrecken der im Innentrommelprüfstand der BASt getesteten Run-Flat-Reifen

ve Versagen der Reifentragstruktur ließ sich an Änderungen des dynamischen Radhalbmessers feststellen, sodass man sagen kann, dass dieser Wert eine geeignete Messgröße für die Beurteilung der Einbüßung der Notlaufeigenschaften darstellt.

Insgesamt zeigten sich also große Unterschiede in der Notlaufstrecke und in den Schädigungen der Reifen. Diese Unterschiede sind gegebenenfalls auch darauf zurückzuführen, welche Auslegung der Reifenhersteller für sein Produkt vorgesehen hat. Dies kann insbesondere daher der Fall sein, weil zwischen den Auslegungsgrößen Zielkonflikte bestehen. Unter Umständen besteht konstruktionsbedingt ein Zielkonflikt zwischen der Notlaufstrecke auf der einen Seite, die ein Run-Flat-Reifen im drucklosen Zustand mit bestimmter Geschwindigkeit und Belastung zurücklegen können soll, und auf der anderen Seite den Komforteigenschaften, die ein Run-Flat-Reifen bei Solldruck bietet, sowie der Krafteinleitung in Komponenten des Fahrwerks. Die Reifen sollten daher in Bezug auf ihre Eigenschaften, hier insbesondere Notlaufstrecke und maximal fahrbare Geschwindigkeit im drucklosen Zustand, klassifiziert und geprüft werden.

Die Tatsache, dass es Run-Flat-Reifen mit stark unterschiedlichen Eigenschaften gibt, verdeutlicht, dass eine Kennzeichnung der Reifen mit der Notlaufstrecke unbedingt erforderlich ist. Diese sollte jedoch so gewählt sein, dass genügend Sicherheitsreserve vorhanden ist, um die angegebene Strecke auch wirklich erreichen zu können. Eine Kennzeichnung würde es den Herstellern dann erlauben, Run-Flat-Reifen mit unterschiedlichsten Eigenschaften im Notlaufbetrieb für verschiedene Zwecke (von der Fahrt bis zur nächsten Werkstatt zur Fortsetzung der Urlaubsfahrt zum Zielort) zu konzipieren und dies gegenüber dem Nutzer darzustellen.

In Bezug auf die fahrdynamischen Eigenschaften der Run-Flat-Reifen sowohl im druckbehafteten als auch drucklosen Zustand lassen sich nahezu ausschließlich positive Aussagen treffen. Im normalen Zustand unterscheiden sich die Fahreigenschaften mit Run-Flat-Reifen nur unwesentlich von denen mit Standardreifen. Bei einigen Reifen, insbesondere älteren Modellen, waren leichte Komforteinbußen hinzunehmen.

Für den Fall eines Druckverlustes lässt sich feststellen, dass Run-Flat-Reifen einen deutlichen Sicherheitsgewinn darstellen. Die Fahreigenschaften

und das Handling verändern sich trotz Luftverlusts nur unwesentlich, solange die Fahrmanöver nicht zu extrem, das heißt nahe am Grenzbereich, sind. Fast alle Versuche ließen sich mit Standardreifen ohne Luft überhaupt nicht absolvieren, wogegen dies bei allen Run-Flat-Reifen möglich war. Mit Run-Flat-Reifen waren auch hohe Querschleunigungen mit drucklosen Reifen noch möglich. Eine Fahrdynamikregelung kann zusätzlich dazu beitragen, das Fahrverhalten im drucklosen Zustand abzusichern, u. a. indem kritische Situationen durch Einbremsen des Fahrzeugs erst gar nicht zugelassen werden.

Sicherheitsgewinne durch die Verwendung von Run-Flat-Reifen können sich vor allem aus folgenden Gründen ergeben:

Unfälle auf Grund plötzlich eintretenden Luftdruckverlustes können mit Hilfe von Run-Flat-Reifen verhindert werden. Der Run-Flat-Reifen springt in der Regel auch nicht von der Felge, wenn die Luft entweicht, sodass die Manövrierfähigkeit und Spurstabilität bei Run-Flat-Reifen im Gegensatz zu Standardreifen erhalten bleiben. Run-Flat-Reifen ermöglichen darüber hinaus die Weiterfahrt aus einer Gefahrenzone, ohne dass das Rad sofort im fließenden Verkehr gewechselt werden muss, sodass Unfälle auf Grund eines im Verkehrsgeschehen liegenden gebliebenen Fahrzeugs vermieden werden. Hier werden sowohl die Insassen des Pannenfahrzeugs als auch andere Verkehrsteilnehmer geschützt.

Als Folgerung ist die Nutzung von Run-Flat-Reifen allein aus Sicherheitsaspekten heraus auf jeden Fall zu empfehlen. Zusätzlich gibt es jedoch weitere Vorteile, die für Run-Flat-Reifen sprechen: Es stellt einen deutlichen Komfortgewinn dar, wenn ein defekter Reifen nicht unmittelbar, sondern erst in der Werkstatt oder zu Hause gewechselt werden muss. Das Entfallen des Reserverades und der damit verbundene Volumengewinn bieten dem Autofahrer entweder weiteren wertvollen Stauraum oder dem Automobildesigner zusätzlichen Spielraum insbesondere beim Package. Der Einfluss auf die Fahrzeuggesamtmasse ist dagegen minimal, Gleiches gilt für die Einsparung an Kraftstoff bzw. CO₂-Emissionen.

Einige Besonderheiten bei der Nutzung von Run-Flat-Reifen sollen jedoch nicht unerwähnt bleiben:

Für den Fahrer ist ein leichter Druckverlust im Run-Flat-Reifen kaum erkennbar. Selbst null bar Über-

druck im Reifen sind nicht unbedingt zu bemerken, wenn die Fahrstrecke nur leichte Kurven aufweist. Erst bei höherer Querbeanspruchung, etwa in einer Autobahnausfahrt, werden der Luftdruckabfall und damit die reduzierte Kraftübertragung deutlich spürbar. Die Versuche der BAST haben gezeigt, dass bei hohen Querschleunigungen und vorgeschädigtem Reifen ein Abwurf von der Felge erfolgen kann. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass sowohl die Notlaufstrecke als auch die dafür vorgesehene Maximalgeschwindigkeit überschritten wird. In allen Fällen kann es zu kritischen Fahrsituationen kommen. Der Reifen kann die Lauffläche verlieren oder an der Seitenwand aufreißen. Aus diesen Gründen ist es unerlässlich, dass der Fahrer bei Run-Flat-Reifen mittels Reifendrucküberwachung über den aktuellen Zustand seiner Reifen informiert wird.

Auf dem Markt befinden sich derzeit Reifendruckkontrollsysteme, die nach zwei verschiedenen Prinzipien arbeiten. Bei den direkten Systemen werden Druck und Temperatur jedes Reifens unmittelbar erfasst. Bei den indirekten Systemen wird über die Raddrehzahlen durch Vergleich zwischen den Rädern eine Druckabweichung errechnet. Hauptvorteile der indirekten Systeme sind ihre Robustheit und die Tatsache, dass keine zusätzlichen Teile am oder im Reifen erforderlich sind, die bei der Reifenmontage zerstört werden können oder ausgewechselt werden müssen. Wesentlicher Vorteil der direkten Systeme ist ihre Genauigkeit. Für Run-Flat-Reifen ist das verwendete Messprinzip von untergeordneter Bedeutung. Wichtig ist nur, dass der Reifendruck erfasst wird, um einen Druckverlust festzustellen.

6.2 Empfehlungen

6.2.1 Für Nutzer von Run-Flat-Reifen

Wichtigster Punkt für den Nutzer von Run-Flat-Reifen ist die gleichzeitige Verwendung einer Reifendruckkontrolle. Nur so ist sichergestellt, dass ein Druckverlust überhaupt bemerkt wird und der Fahrer seine Geschwindigkeit reduziert und sich der begrenzten Restfahrstrecke bewusst ist. (Dagegen erzwingt das Vorhandensein einer Reifendruckkontrolle keinesfalls die Verwendung von Run-Flat-Reifen.)

Drucklos gefahrene Reifen sollten unbedingt ersetzt werden, da diese trotz Notlaufeigenschaften im Notlaufbetrieb Schaden nehmen. Z. B. können

aus der Seitenwand Gummiteile herausbrechen, sodass die Stützfunktion der Seitenwand nicht mehr gegeben ist. Eventuell können sich sogar die Laufflächen der Reifen ablösen. Die Verantwortung, den Reifen nach einer gewissen Strecke im drucklosen Zustand auszutauschen und nicht wieder zu befüllen, liegt in erster Linie beim Nutzer selbst, in zweiter Linie bei der gegebenenfalls aufgesuchten Werkstatt.

Für den Notlaufbetrieb ist eine vorsichtige Fahrweise angebracht. Notlaufstrecke und -geschwindigkeit sollten nicht überschritten werden. Kurvenfahrten mit höheren Querschleunigungen sollten vermieden werden, um ein Abwerfen des Reifens von der Felge zu verhindern.

Nutzer von Run-Flat-Reifen sollten sich entweder in der Bedienungsanleitung des Fahrzeugs (beim Neufahrzeug) oder über die Reifenbeschriftung darüber informieren, welche Notlaufeigenschaften ihr Reifen besitzt, da diese über die für die verschiedenen Fahrzeuge angebotenen Run-Flat-Reifen stark variieren.

Beim Reifenwechsel ist darauf zu achten, ob die neuen Reifen ebenfalls Run-Flat-Eigenschaften aufweisen. Ist dies der Fall, so muss das Reifendruckkontrollsystem weiterhin funktionieren. Haben die neuen Reifen keine Notlaufeigenschaften, so ist an das Reserverad bzw. das Reparaturkit zu denken.

Beim Wechsel von Reifen oder Rädern ist weiterhin darauf zu achten, ob das Reifendruckkontrollsystem neu kalibriert werden muss, da sich die Reifenpositionen geändert haben oder neue Sensoren zum Einsatz kommen.

Solange Reifendimension und Lastindex stimmen, können Run-Flat-Reifen durch solche eines anderen Herstellers ersetzt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Eigenschaften hinsichtlich Notlaufstrecke, Notlaufgeschwindigkeit oder Komfort andere sein können, da Reifen häufig auf bestimmte Fahrzeugtypen hin abgestimmt sind.

6.2.2 Für die Gesetzgebung

Zurzeit existieren für Run-Flat-Reifen weder eine ECE-Regelung noch eine EG-Richtlinie. Selbstverständlich müssen auch die Run-Flat-Reifen die Anforderungen erfüllen, die an Standardreifen gestellt werden. Es gibt jedoch Vorschläge, die Definitionen von Run-Flat-Reifen und Run-Flat-Systemen in die

ECE-Regelung 30 aufzunehmen und ein entsprechendes, auf den Reifen aufzubringendes Symbol für die Notlaufeigenschaft festzulegen [63]. Darüber hinaus wird ein Testverfahren für die Prüfung der Notlaufeigenschaften vorgeschlagen. Im drucklosen Zustand soll der Reifen mit 80 km/h betrieben werden. Hat sich der Abstand zwischen Reifenaufgabe und Felgenkante nach Absolvieren der Notlaufstrecke nicht wesentlich verringert und hat sich die Lauffläche nicht gelöst, so soll der Test als erfolgreich absolviert gewertet werden [64].

Vor dem Hintergrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche sollten aus Sicht der BASt in Bezug auf Run-Flat-Reifen folgende Punkte festgelegt werden:

Da der Fahrer bei der Verwendung von Run-Flat-Reifen einen Druckverlust ggf. nicht bemerkt, ist die gleichzeitige Verwendung eines Reifendruckkontrollgerätes, das den Fahrer vor Druckverlust warnt, dringend zu empfehlen. Damit soll ausgeschlossen werden, dass die Fahrt bei drucklosem Reifen ohne Anpassung des Fahrstils fortgesetzt wird oder die Notlaufstrecke überschritten wird.

Darüber hinaus kann eine Reifendruckkontrolle generell für alle Reifen empfohlen werden. Diese hilft zwar nicht bei plötzlichem Druckverlust, aber in Fällen mit schleichendem Druckverlust wäre der Fahrer gewarnt, sodass dadurch entstehende gefährliche Situationen vermieden würden. Dies ist insbesondere deshalb bei Standardreifen wichtig, da diese gerade keine Notlaufeigenschaften aufweisen.

Es sollte weiterhin erlaubt sein, sowohl Run-Flat-Reifen als auch Standardreifen an einem Fahrzeug gleichzeitig zu montieren, solange eine Druckkontrolle gegeben ist und die Reifendimensionen bzw. Lastindices stimmen. Gleichzeitig sollte dann aber Reserverad oder Reifenreparaturset vorhanden sein.

Ein Run-Flat-Reifen sollte nur als ein solcher zugelassen werden, wenn er bestimmte Eigenschaften aufweist. Dazu gehören Notlaufgeschwindigkeit und Notlaufstrecke. Die Wahl beider Größen sollte dem Hersteller überlassen werden, um die technische Entwicklung von Reifen für verschiedene Einsatzzwecke nicht einzuschränken.

Die entsprechenden Reifeneigenschaften sollten im drucklosen Zustand getestet werden. Dazu sollte die Notlaufstrecke mit angegebener Notlaufgeschwindigkeit im Prüfstand zurückgelegt werden,

wobei der Reifen mit 80 % seiner Radlast beaufschlagt wird. Die Notlaufstrecke sollte möglichst nicht allein aus konstanter Geradeausfahrt bestehen, sondern auch Bremsungen, Beschleunigungen und Kurvenfahrten beinhalten. Als zusätzliches Prüfkriterium könnte später, sollten sich kritische Fälle im Verkehr zeigen, die maximale Querbesehleunigung herangezogen werden, bis zu der der Reifen garantiert nicht von der Felge abgeworfen wird.

Die Run-Flat-Reifen sollten so beschriftet sein, dass man sie als solche erkennt und sowohl Notlaufstrecke als auch Notlaufgeschwindigkeit abgelesen werden können. Ein Hinweis zu angepasster Fahrweise in Bezug auf Kurvenfahrten wäre hilfreich. Entsprechende Bestimmungen sollten in ECE-Regelung 30 aufgenommen werden.

7 Zusammenfassung

Run-Flat-Reifen stellen eine sicherheitsrelevante Komponente am Fahrzeug dar. Im Gegensatz zu Standardreifen bieten sie die Eigenschaft, auch im drucklosen Zustand noch eine gewisse Wegstrecke mit dem Fahrzeug zurücklegen zu können.

In der vorliegenden Untersuchung wurden verschiedene Run-Flat-Reifen auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Zum einen wurde die Dauerhaltbarkeit der Reifen getestet. Die zugehörigen Messungen wurden im Innentrommelprüfstand der BASt durchgeführt. Zum anderen wurden die fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs, das mit Run-Flat-Reifen ausgerüstet war, auf der Versuchsfläche der BASt untersucht. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde weiterhin das im Zusammenhang mit Run-Flat-Reifen stehende Thema Reifendruckkontrolle behandelt.

Die Versuche zur Dauerhaltbarkeit der Reifen haben gezeigt, dass große Unterschiede bezüglich der erreichbaren Notlaufstrecke der Run-Flat-Reifen bestehen. Unter den Prüfbedingungen der BASt, die auch Phasen mit Verzögerungen und Schräglauf enthielten, wurden teilweise die von den Herstellern vorgegebenen Strecken nicht erreicht, teilweise jedoch auch weit überschritten.

In Bezug auf den Einfluss von Run-Flat-Reifen auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs ist festzustellen, dass die Run-Flat-Reifen im druckbehafteten Zustand Standardreifen in nichts nachstehen. Im drucklosen Zustand bieten sie

noch gutes Fahrverhalten, wenn mit Standardreifen an eine Weiterfahrt nicht mehr zu denken ist. In Bezug auf die Fahrdynamik lassen sich bei den Run-Flat-Reifen untereinander kaum Unterschiede ausmachen. Das gilt auch für den Vergleich von Reifen mit verstärkter Seitenwand und Reifen mit innerem Stützring.

Insgesamt stellen Run-Flat-Reifen einen deutlichen Sicherheitsgewinn gegenüber Standardreifen für den Fall eines Luftverlustes eines Reifens dar. Es hat sich herausgestellt, dass eine Druckkontrolle bei der Verwendung von Run-Flat-Reifen dringend zu empfehlen ist, da sonst ein Druckverlust eventuell nicht bemerkt wird. Dafür kommen sowohl direkte als auch indirekte Reifendruckkontrollsysteme in Frage.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass eine Prüfprozedur für neue Typen von Run-Flat-Reifen erforderlich ist, um die erforderlichen Notlaufeigenschaften zu garantieren. Mit Hilfe von Seitenwandbeschriftungen am Reifen sollte der Nutzer auf Notlaufstrecke und -geschwindigkeit hingewiesen werden.

8 Literatur

- [1] „Der Space Master rollt nach vorn“, Gummi Bereifung 04/2002, S. 25
- [2] „Pannelaufsysteme kurz vor Markteinführung“, Continental Pressemitteilung, Januar 1999
- [3] „Qualitätsbeweis“, Gummi Bereifung 09/2003, S. 48
- [4] „Notlaufsysteme von Continental“, NEUE ReifenZeitung 1/2003, S. 50
- [5] BRV Trends & Facts 5/2004, S. 43-44
- [6] „BMW mit Dunlop-Sicherheitstechnologie“, NEUE ReifenZeitung 8/2003, S. 30
- [7] „Meilensteine der Reifentechnik“, www.dunlop.de, 28.02.02
- [8] NEUE ReifenZeitung 4/2003, S. 109
- [9] „Runflats sind nicht mehr aufzuhalten“, NEUE ReifenZeitung 9/2002 S. 48-57
- [10] „Einzelgänger“, mot-Spezial „Reifen“, S. 95-102
- [11] „Montage auf Standard-Räder“, Gummi Bereifung 06/2002, S. 62-63

- [12] NEUE ReifenZeitung 8/2003, S. 91
- [13] Goodyear Presse „Goodyear EMT (Extended Mobility Technology) weltweit die Nummer 1“, www.goodyear.de, 20.02.2002
- [14] „Keine Lust mehr auf Reserveräder“, Automobilwoche 5, März 2002, S. 22
- [15] „Bridgestone RFT-Reifen exklusiv auf BMW 6er Reihe“, NEUE ReifenZeitung 10/2003, S. 41
- [16] „Bridgestone mit Run Flats beim 5er“, NEUE ReifenZeitung 9/2003, S. 50
- [17] „Sicherheit pur“, Gummi Bereifung 09/2003, S. 58
- [18] ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) 7/8, S. 581
- [19] „Aktuelle News aus der Reifenbranche: www.gummibereifung.de“, 07/2003, S. 7
- [20] Sonderausgabe von ATZ und MTZ: Audi A8, 2002, S. 79-82
- [21] „PAX-System beim neuen A6“, NEUE ReifenZeitung 3/2004 S. 6
- [22] „E-Klasse steht auf Goodyear-Notlaufreifen“, NEUE ReifenZeitung 11/2003, S. 4
- [23] „Goodyear im Zeichen von RunOnFlat“, NEUE ReifenZeitung 4/2005, S. 92
- [24] „Continental-Winterreifen mit Notlaufeigenschaften“, NEUE ReifenZeitung 11/2003, S. 46
- [25] „Reifen mit Notlaufeigenschaften im Winter“, NEUE ReifenZeitung 11/2003, S. 47
- [26] „Dunlop-Runflat-Winterreifen in weiteren Größen“, NEUE ReifenZeitung 10/2003, S. 51
- [27] „Erstmals PAX-Reifen mit Winterprofil“, Gummi Bereifung 01/2004, S. 26-27
- [28] „Dunlop-Auftritt beim Genfer Automobilsalon vom Thema Notlaufreifen dominiert“, NEUE ReifenZeitung 4/2002 S. 112-113
- [29] ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 104 (2002) 3, S. 194
- [30] „Yokohama in Conti-/Bridgestone-Kooperation bei Notlaufreifentechnologie aufgenommen“, NEUE ReifenZeitung 10/2002, S. 8
- [31] „Michelin and Sumitomo Rubber Industries sign licensing agreement to widely promote PAX System, a new-generation mobility system“, Michelin Press Release, 5. Juli 2001
- [32] „Runflats – aus Poyurethan“, NEUE ReifenZeitung 11/2003, S. 60
- [33] NEUE ReifenZeitung 7/2003, S. 6
- [34] Produktinformation CellsTyre, 2002
- [35] „Um Lichtjahre voraus“, Gummi Bereifung 11/2002, S. 22
- [36] „Mercedes-Benz Actros mit Superbreitreifen: Bridgestones Konzept überzeugte“, NEUE ReifenZeitung 1/2004 S. 61
- [37] VDI-Nachrichten, 31.12.1999, S. 30
- [38] „Reserve ruht“, Auto Motor Sport 24, 1999, S.62-64
- [39] „Vier Räder sind genug“, Gummi Bereifung, Techniklexikon
- [40] Statistisches Bundesamt, Fachserie 8/Reihe 7, Verkehr, Verkehrsunfälle 2002, Wiesbaden, 2003
- [41] „Platz-Angst ade“, Auto Zeitung + KFT 22/2000, S. 78
- [42] Conti-Infoblatt „ContiSupportRing“
- [43] „Erstmals Pax-Reifen-System für ein Serienfahrzeug“, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 103 (2001) 5, S. 367
- [44] „Noch kein Standard bei Luftdruckwarnsystemen und Notlaufreifen in Sicht“, NEUE ReifenZeitung 4/2002 S. 106-110
- [45] NEUE ReifenZeitung 10/2002, S. 72
- [46] Conti-Infoblatt „Selbsttragender Reifen“
- [47] Dunlop-Informationsblatt „DSST“: „Dunlop Self Supporting Technology“, 2003
- [48] Dunlop Aktuelles „Neuer Mini mit Notlaufreifen von Dunlop“, www.dunlop.de, 20.02.2002
- [49] Dunlop-Informationsblatt „DSST“: „Dunlop Self Supporting Technology“, 2001
- [50] Krafthand, Heft 22, 1999, S. 34
- [51] Michlin-Informationsblatt „PAX System“
- [52] Goodyear-Informationsblatt „Eagle F1 EMT“

- [53] PLATTFUSS: Das fünfte Rad hat ausgedient“, Brückenbauer Nr. 02, 6. Januar 1998, www.brueckenbauer.ch, 08.02.2000
- [54] NEUE ReifenZeitung 12/2002, S. 71
- [55] „Reifen mit Notlaufeigenschaften“, Auto Motor Sport 8/2003, S. 14
- [56] Spiegel online: „Reifen aus der Retorte“, www.spiegel.de, 8. November 2001
- [57] „Kumho bringt drei neue Notlaufreifen auf den Markt“, NEUE ReifenZeitung 8/2003, S. 32
- [58] Sonderausgabe von ATZ und MTZ, BMW 6er, 2004, S. 78
- [59] GEBHARD, P., WILK, Th., KROLL, S.: Gesamtfahrzeugparameter und die Auswirkungen auf Fahrleistung und Verbrauch, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, Audi A2, 2000, S. 56-62
- [60] NEUE ReifenZeitung 10/2002, S. 67
- [61] BRUNNER, H., SCHUBERT, J.: Experimentelle Untersuchungen zum Reifen/Fahrbahn-Rollgeräusch moderner Reifenkonstruktionen, speziell von Leichtbau- und Run-Flat-Reifen, Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrzeugwesen und Verbrennungsmotoren, Februar 2003, S. 535-548
- [62] „BMW M3“, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) 10, S. 820
- [63] European Tyre and Rim Technical Organisation, Informal document No. 3, 53rd GRRF, 3-7 February 2003
- [64] Proposal for draft amendment to regulation no. 30, TRANS/WP.29/GRRF/2004/20, 7 July 2004
- [65] International Standard ISO 10392: „Road Vehicles with two axles – Determination of centre of gravity“
- [66] „Passenger Cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance“, Draft International Standard ISO 3888-2, International Organization for Standardization, 2000
- [67] ADAC: Pressemeldung 223/02 „ADAC testet „Run-Flat“-Reifen“, www.adac.de, 27.06.2002
- [68] ADAC: Motorwelt 7/2002 S. 13-16
- [69] „Auch ohne Luft ans Ziel“, test 7/2002, S. 80-81
- [70] REITHMAIER, W., SALZINGER, T.: Motor Vehicle Tyres And Related Aspects, TÜV Automotive, www.europe.eu.int
- [71] VOGT, D.: Die Reifenzukunft hat begonnen, NEUE ReifenZeitung, Februar 2005
- [72] VOGT, D.: Beru erhält Großauftrag in der Reifendruckkontrolle, NEUE ReifenZeitung, Dezember 2004
- [73] BOCHMANN, H., KESSLER, R., SCHULZE, G.: Stand und aktuelle Entwicklung bei Reifendruck-Kontrollsystemen, Automobiltechnische Zeitschrift, Februar 2005
- [74] FISCHER, M.: Tire Pressure Monitoring, Die Bibliothek der Technik, Vol. 243, 2003
- [75] VOGT, D.: Annäherung der Systeme, NEUE ReifenZeitung, August 2004
- [76] FORSSELL, U., NILSSON, J.: Functionality of Current and Future TPMS Technologies From a Safety Point of View, Tagung „tyre.wheel.tech“, TÜV SÜD, Dezember 2004
- [77] MARX, C.: „TÜV-Fachtagung „tyre.wheel.tech“, NEUE ReifenZeitung, Januar 2005
- [78] VOGT, D.: DSST-Wintertraining, NEUE ReifenZeitung, März 2005
- [79] WAGNER, D.: Tire-IQ-System, Automobiltechnische Zeitschrift, August 2004
- [80] GÖBEL, P.: Pustekuchen, Auto Motor Sport, August 2004
- [81] CM: Bike X-Pressure – Luftdruckkontrolle für Motorradreifen, NEUE ReifenZeitung, August 2003
- [82] CM: Continental liefert zahlreiche Komponenten für den neuen Astra, NEUE ReifenZeitung, April 2004
- [83] KUDLICZA, P.: Reifenpumpen bei voller Fahrt, Automobil Revue Nr. 15, April 2005
- [84] SWS (Safety Wheel System): Werbeprospekt der Firmen Pirelli und bremba

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

1993

- F 1: Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw
Faerber, Wobben € 12,50
- F 2: Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen
König, Werner, Schuller, Beier, Spann € 13,50
- F 3: Sicherheit von Motorradhelmen
Zellmer € 11,00
- F 4: Weiterentwicklung der Abgassonderuntersuchung
Teil 1: Vergleich der Ergebnisse aus Abgasuntersuchung und Typprüfverfahren
Richter, Michelmann
Teil 2: Praxiserprobung des vorgesehenen Prüfverfahrens für Fahrzeuge mit Katalysator
Albus € 13,50

1994

- F 5: Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz
Bamberg, Zellmer € 11,00
- F 6: Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport
Wobben, Zahn € 12,50
- F 7: Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttransmission von Pkw-Scheiben
Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe
P. Junge
Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe
Chmielarz, Siegl
Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben - Vergleichsstudie
Derkum € 14,00
- F 8: Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen
Otte, Schroeder, Eidam, Kraemer € 10,50
- F 9: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Straßenbedingungen
Schmieder, Bley, Spickermann, von Zettlmann € 11,00

1995

- F 10: Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern
Damasky € 12,50
- F 11: Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-Up-Displays
Mutschler € 16,50
- F 12: Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern
Zellmer, Schmid
Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern
Zellmer € 12,00
- F 13: Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen
Sander € 11,50

1996

- F 14: Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim Fußgängerunfall – Entwicklung eines Prüfverfahrens
Glaeser € 15,50
- F 15: Verkehrssicherheit von Fahrrädern
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Fahrrädern
Heinrich, von der Osten-Sacken
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch „Verkehrssicherheit von Fahrrädern“
Nicklisch € 22,50
- F 16: Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen
Sagerer, Wartenberg, Schmidt € 12,50
- F 17: Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen – Problemanalyse und Verfahrenskonzept
Grunow, Heuser, Krüger, Zangemeister € 17,50
- F 18: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS
Präckel € 14,50
- F 19: Schwingungsdämpferprüfung an Pkw im Rahmen der Hauptuntersuchung
Pullwitt € 11,50
- F 20: Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand
Sander € 13,00
- F 21: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe
Fach € 14,00

1997

- F 22: Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung
Bugsel, Albus, Sievert € 10,50
- F 23: Unfalldatenschreiber als Informationsquelle für die Unfallforschung in der Pre-Crash-Phase
Berg, Mayer € 19,50

1998

- F 24: Beurteilung der Sicherheitsaspekte eines neuartigen Zweiradkonzeptes
Kalliske, Albus, Faerber € 12,00
- F 25: Sicherheit des Transportes von Kindern auf Fahrrädern und in Fahrradanhängern
Kalliske, Wobben, Nee € 11,50

1999

- F 26: Entwicklung eines Testverfahrens für Antriebsschlupf-Regelsysteme
Schweers € 11,50
- F 27: Betriebslasten an Fahrrädern
Vötter, Groß, Esser, Born, Flamm, Rieck € 10,50
- F 28: Überprüfung elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen
Kohlstruck, Wallentowitz € 13,00

2000

- F 29: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Glaeser
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen
Aubel € 13,00

- F 30: Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit Breitreifen
Faber € 12,50
- F 31: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen
Otte € 12,50
- F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BASt – Einweihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am 4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00
- F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00

2001

- F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem Emissions-Mess-Fahrzeug
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00
- F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weilkes, Steinauer, Bölling, Richter, Gaupp € 19,00
- F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00
- F 37: Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50
- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50
- F 40: Prüfverfahren für Spritzschutzsysteme an Kraftfahrzeugen
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

2003

- F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00
- F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstiegssystems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00
- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall
Nett € 16,50
- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten
Steven € 12,50
- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit
Funke, Winner € 12,00
- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformationssystemen
Jahn, Oehme, Rösler, Krems € 13,50
- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 STVZO
Pullwitt, Redmann € 13,50

- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder
Berg, Rücker, Mattern, Kallieris € 18,00
- F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50
- F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50
- F 52: Intelligente Rückhaltesysteme
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00
- F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag
Klanner, Ambios, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00
- F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw
Niewöhner, Berg € 16,50

2004

- F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

2006

- F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die Verwendung asphärischer Außenspiegel € 17,00
- F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.