

FAT 255

B

Untersuchung des
Rollwiderstands von
Nutzfahrzeugreifen auf
echten Fahrbahnen

Ψ

Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen

Forschungsstelle:
IPW automotive GmbH
Hannover

Autoren:
Dr.-Ing. Otto Bode
Dipl.-Ing. Matthias Bode

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Formelzeichenverzeichnis	7
Vorwort.....	9
1 Einleitung	10
2 Stand der Technik	11
2.1 Bedeutung.....	11
2.2 Entstehung Rollwiderstand	13
2.3 Rollwiderstandskoeffizient.....	15
2.4 Prüfmethoden	15
2.5 Offenlegung und Grenzwerte	17
2.6 Aussagekraft.....	18
3 Vorgehensweise.....	20
3.1 Outdoor-Messmethode ‘Rollwiderstand auf echter Fahrbahn‘	20
3.2 Messtechnik.....	23
3.3 Versuchsprogramm	26
4 Ergebnisse	29
4.1 Einrollphase.....	29
4.2 Produktstreuung	31
4.3 Einflussfaktoren	31
4.3.1 Profilhöhe	33
4.3.2 Fahrgeschwindigkeit.....	34
4.3.3 Fülldruck.....	37
4.3.4 Radlast	40
4.3.5 Nässe.....	41
4.3.6 Fahrbahntextur	44
4.3.7 Fahrbahnkrümmung.....	47
4.3.8 Temperatur(en)	50
4.3.9 Fahrbahnnachgiebigkeit.....	55
4.3.10 Reifenbauart.....	58
4.3.11 Spurgeometrie.....	59
4.4 Gegenüberstellung ‘Indoor vs. Outdoor‘	62

5	Resümee	67
	Literaturverzeichnis	70
	Anhang	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Beitrag von Luft- und Fahrzeug-Rollwiderstand bei gleichförmiger Fahrt auf ebener Straße (windarm).....	11
Abbildung 2.2:	Aufteilung der Kraftstoffenergie eines 40to Sattelzuges bei konstant 85 km/h in der Ebene (windfrei) / entwickelt aus [14].....	12
Abbildung 2.3:	Verformungen am belasteten Reifen [2].....	14
Abbildung 2.4:	Trommelprüfstand mit Prüfreifen [Michelin].....	16
Abbildung 2.5:	EU-Label [8].....	17
Abbildung 2.6:	‘Round-Robin-Test Trommel Indoor Prüfstände‘ [4]	19
Abbildung 3.1:	Koppelkraftmessung als Fahrwiderstandsindikator des Anhängers.....	20
Abbildung 3.2:	Outdoor-Prüfverfahren ‘Koppelkraftmessung‘	21
Abbildung 3.3:	Auszug 'Strategiepapier' - Rahmenbedingungen & Anweisungen	22
Abbildung 3.4:	Prüfprozedur ‘Outdoor‘ – Störgröße ‘Fahrbahnsteigung‘	23
Abbildung 3.5:	Messgrößen im Fahrversuch.....	24
Abbildung 3.6:	Fülldruckregelung.....	24
Abbildung 3.7:	Aufbau ‘IPW-Deichselkraftsensor‘	25
Abbildung 3.8:	Untersuchungskonzept 2011.....	26
Abbildung 3.9:	Versuchsprogramm 2011.....	27
Abbildung 3.10:	Autobahnneubau bei ‘Forstinning‘	27
Abbildung 4.1:	Zeitverhalten Fahrwiderstand u. Temperaturen / (15km/h).....	30
Abbildung 4.2:	Prüfstandsergebnisse Trailerreifen ‘A‘ und ‘B‘	31
Abbildung 4.3:	Entwicklung Reifenrollwiderstand [16] (Continental)	32
Abbildung 4.4:	Gegenüberstellung Vollprofil vs. Restprofil (Prüfstand Michelin)	33
Abbildung 4.5:	Vollprofil (16mm) vs. Restprofil (4mm) im Fahrversuch ermittelt	34
Abbildung 4.6:	Geschwindigkeitsabhängigkeit (Prüfstandsmessungen).....	35
Abbildung 4.7:	Beispiele unterschiedlicher geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsverläufe (verschiedene Produkte).....	36
Abbildung 4.8:	Fülldruck- u. Temperaturentwicklung (15km/h)	37
Abbildung 4.9:	Einfederungskurven Michelin Trailerreifen (Ebene).....	38
Abbildung 4.10:	Fülldruckabhängigkeit des Reifen-Rollwiderstands.....	39
Abbildung 4.11:	Radlastabhängigkeit des Reifen-Rollwiderstands	41
Abbildung 4.12:	Einfluss von Nässe auf unterschiedlichen Fahrbahnbelägen.....	43
Abbildung 4.13:	Textureinfluss	44
Abbildung 4.14:	Texturklassifizierung [11]	45
Abbildung 4.15:	Korrelation zwischen MPD und f_{RW} [Zöller, BASt].....	45
Abbildung 4.16:	Einfluss Fahrbahnkrümmung auf Rollwiderstand (PKW) [7].....	47

Abbildung 4.17:	Fahrbahnkrümmungseinfluss – Reifenkategorie C3	48
Abbildung 4.18:	Wissensstand Temperatureinfluss – Korrekturfestlegung (u.a. ISO)	50
Abbildung 4.19:	Rollwiderstandsmessungen (kalt) in Klettwitz, Februar 2013	52
Abbildung 4.20:	Rollwiderstandsmessung in Klettwitz, August 2012.....	53
Abbildung 4.21:	Temperaturabhängigkeit Rollwiderstand ‘Outdoor‘	54
Abbildung 4.22:	Steifigkeitsmodul vs. Temperatur der “Asphalt-Deckschicht“ [13]	55
Abbildung 4.23:	Rollwiderstandsergebnisse auf unterschiedlichen Untergründen (Forstinning).....	56
Abbildung 4.24:	Umkehreffekt Rollwiderstand bei hohen Asphalttemperaturen ...	57
Abbildung 4.25:	Rollwiderstand Indoor und Outdoor - Gegenüberstellung Zwillingstreifen vs. “Wide-Base Reifen“	58
Abbildung 4.26:	Zusammenhang von Spurwinkel und Spurrwiderstand	60
Abbildung 4.27:	Manipulierte Spurgeometrie - Fahrwiderstandsänderung	61
Abbildung 4.28:	Reifen-Rollwiderstand im Realbetrieb - Zielgleichung ‘Straße‘ ...	62

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Bedeutung	Einheit
c_R	Reifen-Rollwiderstandskoeffizient, auf Trommelprüfstand nach ISO	[-]
c_R^*	Reifen-Rollwiderstandskoeffizient, auf Trommelprüfstand <u>abweichend</u> zu ISO	[-]
c_α	Reifen-Schräglaufsteifigkeit (cornering stiffness)	[N/°]
F_B	Beschleunigungskraft	[N]
F_D	Deichselzugkraft	[N]
F_H	Hangabtriebskraft	[N]
F_L	Luftwiderstandskraft	[N]
F_R	Reifen-Rollwiderstandskraft, auf Trommelprüfstand nach ISO	[N]
F_R^*	Reifen-Rollwiderstandskraft, auf Trommelprüfstand <u>abweichend</u> zu ISO	[N]
F_{R_ISO}	identisch F_R	[N]
F_{Rad}	Radwiderstand	[N]
F_{Rschw}	Schwallwiderstand	[N]
F_{RW}	Rad-Rollwiderstandskraft (<i>rolling resistance wheel</i>) “outdoor”	[N]
f_{RW}	Rad-Rollwiderstandskoeffizient (<i>rolling resistance wheel</i>) “outdoor”	[-]
F_S	Spurwiderstand	[N]
F_Z	Radlast	[N]
F_{Z_ISO}	Radlast auf Trommelprüfstand nach ISO	[N]
K	Normierungsfaktor Trommeldurchmesser	[-]
MPD	Mittlere Profitiefe	[mm]
p	Fülldruck Reifen	[bar]

Zeichen	Bedeutung	Einheit
p_{ISO}	Fülldruck Reifen auf Trommelprüfstand nach ISO	[bar]
t_{amb}	Raumtemperatur	[°C]
F_{R_real}	Realer Reifenrollwiderstand auf echter Fahrbahn	[N]
T_{Boden}	Fahrbahntemperatur	[°C]
$T_{Gürtelkante}$	Gürtelkantentemperatur (Mittelwert 4 Reifen)	[°C]
T_{HL}	Reifeninnenschultertemperatur Anhänger hinten links	[°C]
T_{HR}	Reifeninnenschultertemperatur Anhänger hinten rechts	[°C]
T_{Luft}	Umgebungslufttemperatur (locale Wetterstation)	[°C]
T_{VL}	Reifeninnenschultertemperatur Anhänger vorne links	[°C]
α	Spurwinkel	[°]

Verwendete Abkürzungen

BAST	- Bundesanstalt für Straßenwesen
C3-tyres	- Reifen der Kategorie ‘heavy duty trucks‘
CO ₂	- Kohlenstoffdioxid
DMS	- Dehnmesstreifen Applikation
DOT	- Reifenidentifikationsnummer
FAT	- Forschungsvereinigung Automobiltechnik
IFFSTAR	- Institut français des sciences et technologies des transports
IPW	- IPW automotive GmbH, Hannover
STABW	- Standardabweichung
Wide base Reifen	- Breitreifen (Supersingle)

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die experimentellen Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt "Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen", durchgeführt im Zeitraum 2010-2012 in Form eines Gemeinschaftsprojektes von FAT und BAST. Für die fachliche Begleitung zuständig waren der FAT Arbeitskreis AK-4, Obmann Hr. B. Lange (Continental), und für die BAST, Herr Dr.-Ing. K.-P. Glaeser, Sektionsleiter im Referat L. In enger Abstimmung mit dem Auftragnehmer IPW automotive GmbH, Hannover, wurde gemeinsam intensiv das Ziel verfolgt, zuverlässige Antworten auf die Frage nach dem auf ebenen Fahrbahndecken in Wirklichkeit auftretenden Reifenrollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen zu gewinnen.

1 Einleitung

Der Anteil des Straßengüterverkehrs hat in Europa ständig zugenommen, allein in den letzten 2 Jahrzehnten um 80%. Auch für die nächste Dekade ist mit weiterem Wachstum zu rechnen, die Prognosen hierfür liegen bei 20%.

Dieser Zunahme des Güterverkehrs auf der Straße stehen heute zunehmend verschärfte Umwelanforderungen gegenüber, die im Kern zwei Ziele verfolgen: Eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs und damit eine Verminderung von Schadstoffemissionen.

Im Bemühen darum, die zunehmende Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen einzudämmen, ist das Abkommen von Kyoto (1997) ein bemerkenswerter Eckpunkt; denn seither ist die Politik weltweit gezwungen, sich mit diesem Thema verantwortungsbewusster auseinanderzusetzen. Vor diesem Hintergrund sind seitdem in allen wesentlichen Weltmärkten langfristige CO₂-Einsparziele in Form von Flottengrenzwerten für Pkw gesetzlich festgelegt worden. In Gang gesetzt ist damit eine Diskussion, bei der nun auch das schwere Nutzfahrzeug im Fokus einer kritischen Betrachtung steht.

Um eine zielorientierte, herstellerübergreifende und vorwettbewerbliche Untersuchung möglicher Kraftstoffeinsparpotenziale zukünftiger Nutzfahrzeuge zu ermöglichen, ist von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) das Projekt "Potenzialanalyse eines energieeffizienten Lastzugs" angelegt worden. An diesem Projekt sind verschiedene FAT-Arbeitskreise mit unterschiedlichen Schwerpunktthemen beteiligt. Der Arbeitskreis 4 hat sich dem Komplex "Reifenrollwiderstand" zugewandt und in 2010 zusammen mit der Bundesanstalt für Straßenwesen die hier berichtete Rollwiderstandsuntersuchung initiiert.

2 Stand der Technik

2.1 Bedeutung

Nach aktuellem Wissensstand entfallen bei einem beladenen 40t-Lastzug im europäischen Fernverkehrseinsatz ca. **16%** des Kraftstoffverbrauchs auf den Fahrzeug-Rollwiderstand [1]. Die Reifen tragen zu den äußeren Fahrwiderstandskräften etwa einen Anteil von **30 %** bei. Eine Quote, die natürlich vom Einsatzprofil (Topologie, Beladung, Verkehrsfluss, Fahrweise etc.) und auch Windbedingungen abhängig ist.

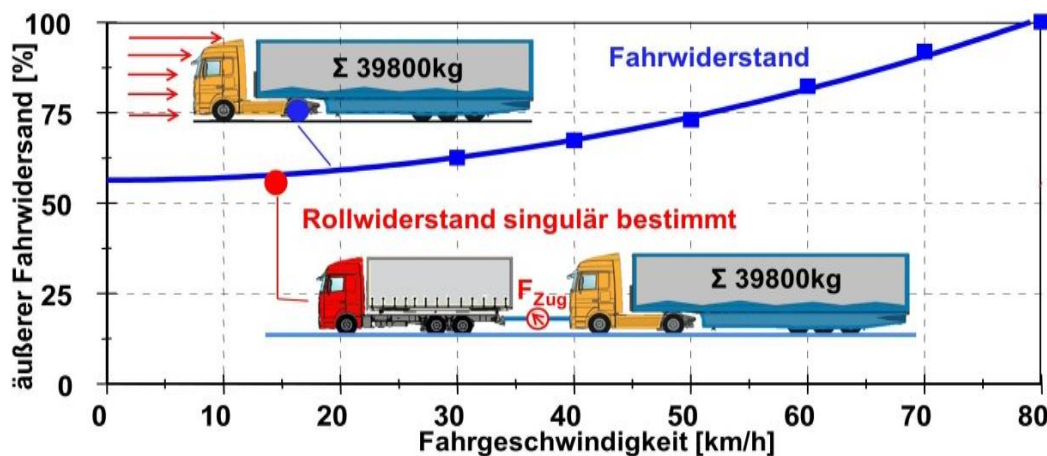


Abbildung 2.1: Beitrag von Luft- und Fahrzeug-Rollwiderstand bei gleichförmiger Fahrt auf ebener Straße (windarm)

Fällt der dargestellte Zusammenhang im Ergebnis deutlich anders aus, wenn als Referenzfall eine stationäre Fahrt auf ebenem Terrain als weniger komplexer Zustand herangezogen wird? Unter Vernachlässigung von Wind bestimmt in dieser Situation allein die Fahrgeschwindigkeit den zu überwindenden Luftwiderstand, während das Fahrzeuggewicht den Rollwiderstand prägt. Basierend auf diesen Rahmenbedingungen lässt sich am Beispiel einer von IPW gemessenen Fahrwiderstandskurve eines schweren Sattelzuges (**Abbildung 2.1**) leicht ablesen, dass bei einer Fahrgeschwindigkeit von konstant 15 km/h die äußeren Fahrwiderstandskräfte auf etwa 55% der bei 80km/h wirksamen zurückgehen. Der reine Rollwiderstand des Zuges konnte separat ermittelt werden, allerdings nur in einem einzelnen, bei niedriger Fahrgeschwindigkeit angesiedelten Betriebspunkt bei 15km/h. Offen bleibt die Frage, welchen Anteil hat der Rollwiderstand

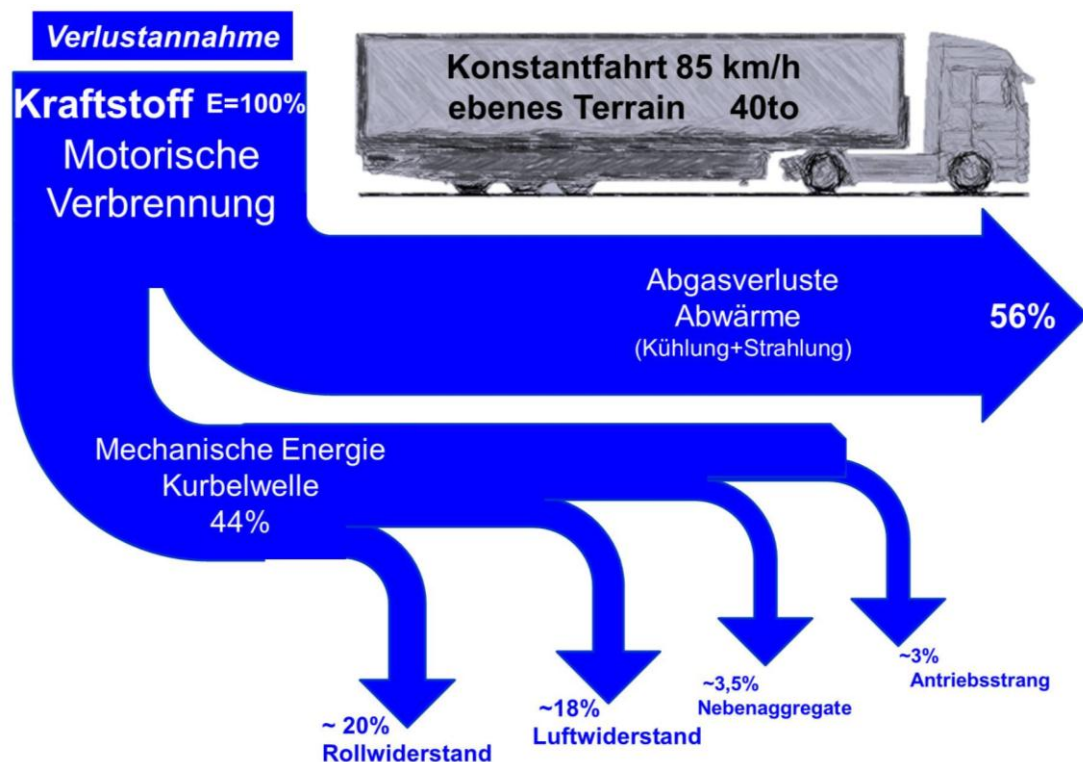


Abbildung 2.2: Aufteilung der Kraftstoffenergie eines 40to Sattelzuges bei konstant 85 km/h in der Ebene (windfrei) / entwickelt aus [14]

bei höherer Fahrgeschwindigkeit? Nicht der Widerstand, sondern der vom Rollwiderstand generierte Verbrauchsanteil bei 85 km/h Fahrgeschwindigkeit wird in dem in **Abbildung 2.2** vorgestellten Flussdiagramm veranschaulicht. Ausgehend davon, dass beim Diesel-Prozess näherungsweise etwa 44% der im Kraftstoff verfügbaren Energiemenge als mechanische Energie an der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors bereitstehen, wovon dann auch noch Triebstrang- und Nebenaggregatbedarfe in Abzug gebracht werden müssen, verbleiben für die Abdeckung des Luftwiderstandes ca. 18% der eingespeisten Kraftstoffenergie, während etwa **20%** auf den Fahrzeug-Rollwiderstand entfallen. Als Hinweis sei ergänzt, dass dieser Verbrauchsanteil natürlich im Falle einer Teilbeladung bzw. bei Leerfahrt auf einem niedrigeren Level angesiedelt ist, da hierbei der aerodynamische Widerstand überwiegt.

Fazit der Betrachtung des beladenen 40t-Zuges: Im realen Einsatzfall ‘Fernverkehr’ liegt der Rollwiderstands-Verbrauchsanteil niedriger als in der untersuchten Fahrsituation ‘Konstantfahrt auf ebenem Terrain (windfrei)’.

Als grobe Abschätzung für das Kraftstoffsparpotenzial durch Rollwiderstandsoptimierung lässt sich für den realitätsnahen Betriebsfall ‘Fernverkehr - Zustand Vollbeladung’ formulieren:

Ein um 10 % verbesserter Reifen-Rollwiderstand kann ca. 2% Kraftstoffeinsparung ermöglichen, dementsprechend vermindert sich auch die CO₂ Emission des Verbrennungsmotors. Diese Relation (energy ratio) von 10:2 bezeichnet keine feste Quote.

2.2 Entstehung Rollwiderstand

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Begriff ‘Rollwiderstand‘ differenziert angewendet, da nicht immer allein der pure Reifen-Rollwiderstand als Urheber für den beim Abrollen eines Rades zu überwindenden Bewegungswiderstand in Frage kommt. Vielmehr leisten alle in bekannter Weise von Fahrwerksbauteilen geführten Räder weitere der Bewegung entgegengesetzte Widerstände, welche in der klassischen Lehre als Radwiderstand zusammengefasst werden. Darin enthalten sind neben dem

- *Reifen-Rollwiderstand (international: Tire Rolling Resistance TRR oder auch nur RR)*

Nebeneffekte aus:

- *Spurgeometrie*
- *Lagerreibung*
- *Radventilation (Luftverwirbelung)*
- *Bremsenschleifen ff.*

Die aus diesen bekannten Nebeneffekten resultierenden Widerstände bilden gemeinsam mit dem überlagerten Reifen-Rollwiderstand – der ebenfalls eine Kraft bezeichnet – einen grundlegenden Teil des bei der Fortbewegung eines Fahrzeugs einwirkenden äußeren Fahrwiderstands. Für diese spezifische Komponente ist der Begriff ‘*Rollwiderstand*‘ nicht immer hinreichend verwechslungssicher, verwendet werden sollte die präzisere Bezeichnung ‘*Fahrzeug-Rollwiderstand*‘; dieser Terminus beschreibt im Folgenden die Summe des Radwiderstands aller beteiligten Fahrzeugräder beim Abrollen auf *unnachgiebig* fester, im Normalfall trockener Fahrbahn.

Wodurch entsteht Reifen-Rollwiderstand?

Es ist eine Grundeigenschaft des elastischen Luftreifens, dass der Torus seine gleichmäßige runde Form verliert, sobald er belastet wird. Vorrangig wird die lastabhängige Verformung im unteren Kreissektor nahe der Bodenkontaktzone sichtbar, so insbesondere an der Ausprägung des Reifenlatsches. Aber nicht nur dieser auf den ersten Blick erkennbar beanspruchte Reifensektor (**Abbildung 2.3**), sondern auch die nicht im direkten Fahrbahnkontakt stehenden Gebiete unterhalb des Reifenzenits reagieren mit Formänderungen gegenüber dem lastfreien Zustand. An Lauffläche, Seitenwand und Schulter tritt dieses Verhalten als äußere Konturänderung in Erscheinung, aber natürlich rea-

gieren auch die verdeckten Reifenkonstruktionsteile inner- und außerhalb der Karkasse bei Lastübernahme mit Formänderungen.

Der Bewegungswiderstand, den das belastete Rad beim Abrollvorgang der Bewegungsrichtung entgegensetzt, ist die Folge eines fortwährenden Energieverlustes. Dieser fällt beim Abrollen durch Verrichtung der anfallenden Verformungsarbeit (Biegen, Stauchen, Scheren) an. Bei diesem Prozess findet ständig eine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme statt, die das Reifenmaterial und die eingeschlossene Gasfüllung aufheizt, die aber auch im gegenseitigen Austausch teilweise an die Umgebung abgeführt wird; so auch unmittelbar über die Kontaktfläche zur Fahrbahn. Umgekehrt ist ein Wärmeeintrag, z.B. von der Fahrbahn zum Reifen, unter bestimmten Umständen (Temperaturgefälle) ebenfalls möglich.

Auf Grund der viskoelastischen Eigenschaften der beteiligten Materialien werden Verformungen des Reifens zwar zurückgebildet, jedoch müssen die unvermeidlichen hystereseebedingten Energieverluste permanent von außen gedeckt werden. Dieser Sachverhalt begründet schließlich die Rollwiderstandskraft.

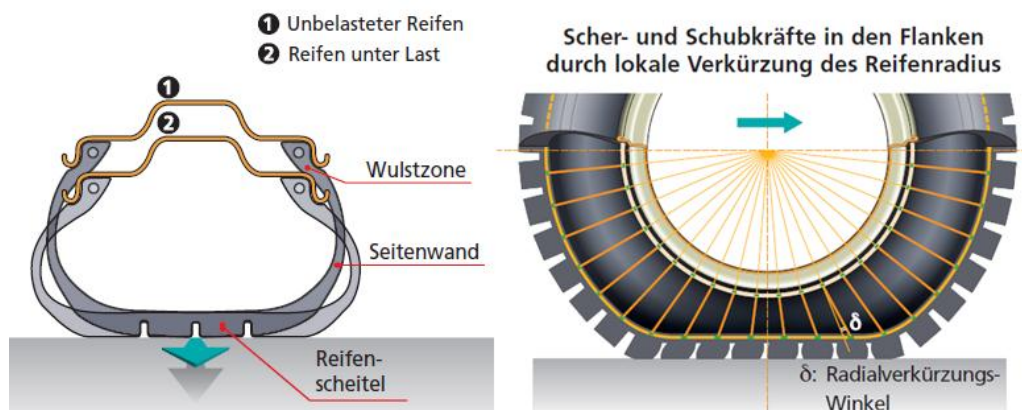


Abbildung 2.3: Verformungen am belasteten Reifen [2]

Neben dem dominierenden Verlustanteil durch Walkarbeit – vor allem in der bodennahen Reifenregion erzeugt – gibt es auch kleine Verlustkomponenten, die durch Schlupfbewegungen hervorgerufen werden. Einer dieser Nebeneffekte ist als 'Scheuern' im Bereich des Wulst-Felgensitzes bekannt, der allerdings nur eine marginale Bedeutung hat. Vielmehr spielen dissipative Wechselwirkungen zwischen Reifenprofil und Fahrbahn eine Rolle. Das auch als Mikroschlupf bezeichnete Verlustphänomen beeinflusst den Rollwiderstand allerdings in untergeordnetem Maße, denn mindestens 95 % der Verluste sind allein auf den Walkprozess zurückzuführen; bilanziert ohne Aeroeffekte. Da jedoch die Bewegungen und Verformungen der im direkten Fahrbahnkontakt stehenden Profilblöcke von der Textur der Fahrbahnoberfläche und damit auch Adhäsions- und

Kraftschlusseigenheiten mit beeinflusst sind, unterliegt der gesamte Reifenrollwiderstand grundsätzlich auch dieser peripheren Einwirkung in nicht immer vernachlässigbarem Maße.

2.3 Rollwiderstandskoeffizient

Die zuvor beschriebene Reifeneigenschaft 'Rollwiderstand' beinhaltet zwar ursächlich einen wegabhängigen Energieverlust, sie bezeichnet jedoch daraus folgend eine messbare Kraftwirkung (F_R), die sich wie nachfolgend in Kap. 2.4 dargestellt mittels standardisierter Prüfverfahren weltweit bestimmen lässt. Dieser physikalische Widerstand ist der Bewegung des Rades entgegen gerichtet, wobei die Höhe der Radlast (F_Z) den Widerstandswert maßgeblich bestimmt. Diese Abhängigkeit von F_R eignet sich hervorragend für eine Normierung, welche in Form von

$$c_R = \frac{F_R}{F_Z} \quad (2.1)$$

als Rollwiderstandskoeffizient c_R bezeichnet wird. Im internationalen SI-Einheiten-System als dimensionslose Größe eindeutig definiert, lassen sich für die Angabe von c_R auch die daraus resultierenden Prozent- und Promillewerte verwenden. Beide Maßstäbe sind in der Fachwelt etabliert - daneben findet jedoch teilweise immer noch die nicht zeitgemäße alte Einheit kg/t Verwendung (zugeschnittene Größengleichung).

2.4 Prüfmethoden

Angaben zum Rollwiderstand von Reifen basieren im Normalfall auf verbindlichen Prüfergebnissen, die unter den Bedingungen eines spezifizierten Prüfverfahrens entstanden sind. Zu den etablierten Verfahren gehören 'Indoor'-Messungen auf speziellen Trommelprüfanlagen, reguliert in Standards, wie z.B. spezifiziert nach ISO 28580 [3].

In dieser Regelung sind 2 Verfahrensweisen deklariert:

a) *Ausrollversuch*

b) *Prüftrieb mit $v=constant$.*

Für die überwiegend anzutreffende Variante b) stehen drei Messprinzipien zur freien Auswahl: Kraft-, Drehmoment- und Leistungsmessung. In jedem Fall rollt der geführte Prüfreifen *ohne Schräglauf und ohne Radsturz* unter definierter Belastung auf einer Endlosfahrbahn, die als Außentrommel mit einem Mindestdurchmesser von 1,7 m spezifiziert ist. Unabhängig von der Reifengröße gilt diese Dimension gleichermaßen für Pkw- als auch für Bus- und Lkw-Reifen. Da sich bekanntermaßen das Verhältnis der Krümmungsradien zwischen den Kontaktpartnern Trommel/Reifen im Reifen-

Rollwiderstand niederschlägt, wird ein einheitlicher Bezug auf den def. Referenzwert von 2 m Rollendurchmesser mittels einer Korrekturformel nachträglich hergestellt.

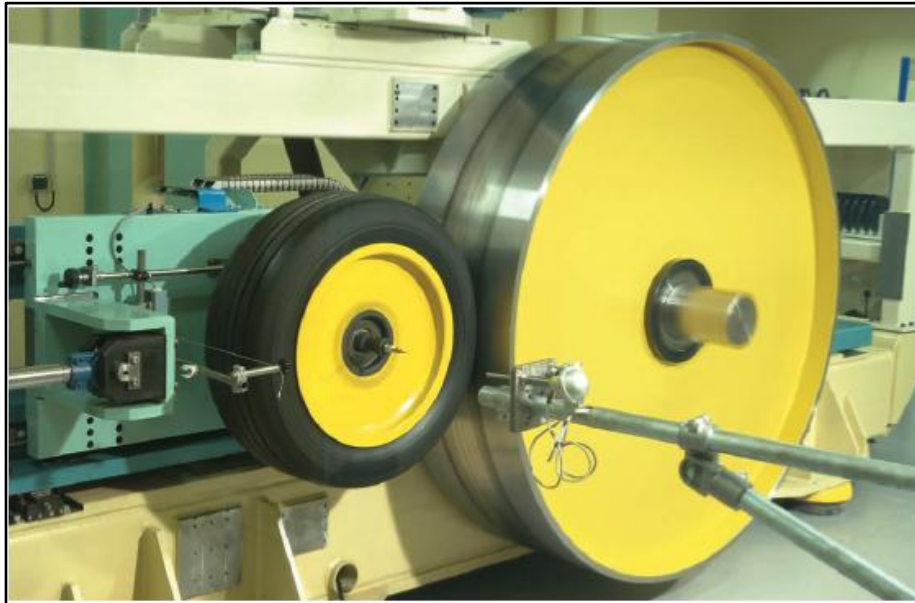


Abbildung 2.4: Trommelprüfstand mit Prüfreifen [Michelin]

$$K = \sqrt{\frac{\frac{R_1}{R_2} * (R_2 + r_T)}{(R_1 + r_T)}} \quad (2.2)$$

Im Gegensatz zu ‘Outdoor‘-Messverfahren bietet allein die ‘Indoor‘-Methode die grundlegenden Voraussetzungen, um unter stabilen und vor allem definierten Umgebungsbedingungen zu prüfen. Die Lufttemperatur der Umgebung ist in ISO 28580 mit 25°C spezifiziert, Abweichungen von diesem Referenzwert werden mit ±5°C toleriert und nachträglich in definierter Weise in das Messresultat eingerechnet.

$$F_{r25} = F_r * [1 + K * (t_{amb} - 25)] \quad (2.3)$$

Mit einer vorangestellten Warmlaufphase von 3 Stunden Dauer soll erreicht werden, dass der große Nutzfahrzeugreifen sein individuelles thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung auf jeden Fall erreicht hat; denn nur dann liegt der Rollwiderstand auf einem konstanten Niveau.

Zwar schließt die Norm raue Laufflächen nicht generell aus, jedoch sollte die Stahl-trommel eine glatte Oberfläche aufweisen, ansonsten muss diese Abweichung im Prüfergebnis extra vermerkt werden.

Der sogenannte Ventilationswiderstand des rotierenden Rades geht in das am Ende stehende Prüfergebnis nicht ein, da dieser Effekt - ebenso wie andere parasitäre Verluste - durch Maßnahmen innerhalb des Versuchsprozesses gezielt unterdrückt wird.

Innerhalb der Norm ist nur eine Geschwindigkeits- und auch Laststufe für den Reifentest vorgesehen (single point). Für Reifen mit einem Lastindex $LI < 121$ sind 80 km/h festgelegt. Oberhalb von $LI = 121$ ist ein Wert von 60 km/h vorgesehen; jedoch nur, wenn der Speedindex SI die Klasse 'J' nicht überschreitet.

Als Prüflast ist für Lkw- und Busreifen eine Radlast von 85% der maximalen Tragfähigkeit definiert – wobei diese Quote nicht vom Trommeldurchmesser abhängig ist!

Der einzustellende Fülldruck leitet sich aus dem der maximalen Tragfähigkeit fest zugeordneten Druckwert ab, der als 'Kaltdruck' direkt übernommen wird.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass alle üblichen Verfahren, so wie die hier auszugswise vorgestellte Methode nach ISO 28580, gezielt darauf festgelegt sind, den Rollwiderstand nur für den Fall des thermisch stabilen Gleichgewichts *im stationären Betriebszustand* zu überprüfen. Transiente Wirkmechanismen und zeitveränderliche Zustände werden so (absichtlich) ausgeschlossen.

2.5 Offenlegung und Grenzwerte

Die Prüfung nach ISO 28580 wird auch dazu verwendet, die erforderlichen quantitativen Feststellungen zum Rollwiderstand von Reifen zu treffen, welche im Rahmen der

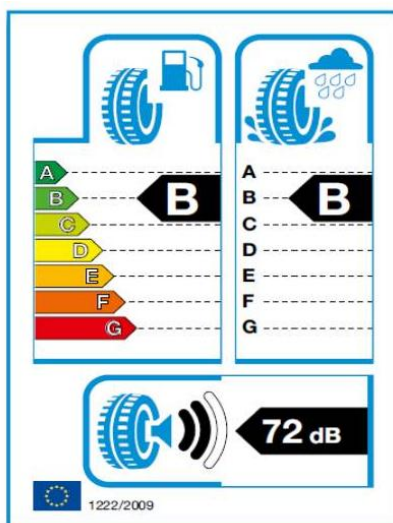


Abbildung 2.5: EU-Label [8]

vom Europäischen Parlament verabschiedeten standardisierten Kennzeichnungsverordnung EC 1222/2009 [8] seit November 2012 verlangt werden. Hierbei handelt es sich nicht um gesetzlich verankerte Grenzwerte, sondern um eine reine Verbraucherinformation; dies gilt es unbedingt zu unterscheiden.

Eine der 3 definierten Bewertungskategorien spiegelt den Reifen-Rollwiderstand wider – siehe linke Labelhälfte in **Abbildung 2.5**. Zum leichteren Verständnis ist diese Größe in der Öffentlichkeit mit dem Begriff 'Kraftstoffeffizienz' belegt, was die dargestellte Zapfsäule symbolisch zum

Ausdruck bringt.

Ohne den Laien mit Zahlenwerten zu verwirren, ist auf dem Label das ermittelte, an dieser Stelle unsichtbare Rollwiderstandsergebnis in Klassen von A bis F einsortiert. Hinweis: Die Klasse G ist im Fall von **C3-Reifen** (Nutzfahrzeug) unbesetzt. Eine Einstufung in 'A' erfordert ein $c_R \leq 4,0 \%$, während alle Reifen mit einem $c_R \geq 8,1 \%$ mit 'F' klassifiziert werden. Zur Ergänzung sei noch die Spannweite der Klasse 'B' hinzugefügt: $4,1 \leq c_R \leq 5,0 \%$.

Bei Einführung der 2. Grenzwertstufe für den Rollwiderstand von C1-, C2- und C3-Reifen, welche auf November 2016 datiert ist, wird das Label bezüglich der Kategorie C3 bereits bei Stufe 'D' enden. Grund dafür: Der zukünftige Grenzwert, der dann verbindlich für das in der EU auf den Markt gebrachte, neu homologierte Produkt sein wird, soll statt dem bisherigen $c_R \leq 8,0 \%$ bei nur noch $c_R < 6,5 \%$ angesiedelt werden.

2.6 Aussagekraft

Auf Basis des standardisierten Verfahrens nach ISO 28580 steht ein Zahlenwert für eine verbindliche Quantifizierung des Reifen-Rollwiderstands zur Verfügung, der sich allerdings nur auf einen fixen Betriebspunkt des im Fokus stehenden Objektes bezieht – festgelegt durch Geschwindigkeit, Radlast, Fülldruck und Umgebungstemperatur; ermittelt auf einer gekrümmten, unnachgiebigen, glatten Fahrbahn. Wenn auch die Rollwiderstandsermittlung nach einem festen Prüfablauf mit geregelten Vorgaben erfolgt, so ist damit nicht sichergestellt, dass die Wiederholung einer Reifenprüfung auf einem konzeptionell anderen Prüfstand auf identische Werte führt. Selbst bei technischer Baugleichheit besteht keine Gewähr hierfür. Diese praktische Erfahrung ist in der Vergangenheit bei sogenannten Round-Robin-Tests [4] wiederholt gewonnen worden, siehe hierzu beispielhaft **Abbildung 2.6**, weshalb man diesem für ein 'Labeling' problematischen Unsicherheitsaspekt auch besondere Beachtung schenken mußte. Durch geeignete Abgleichmaßnahmen zwischen den Prüflaboren mit eigens eingeführten Prozessen zur Feststellung des Status-quo und Maßnahmen zur individuellen Korrektur der Ergebnisse einzelner Prüfeinrichtungen sind Ergebnisstreunungen, wie die in **Abbildung 2.6** exemplarisch gezeigten, voraussichtlich in Zukunft weitgehend ausgeschlossen. In diesem Zusammenhang sind zwei in der entsprechenden EU-Regelung (1222/2009) verwendete Begriffe anzuführen: 'Candidate Labor' u. 'Reference Labor'. Auch 'Alignment' ist ein diese Bemühungen widerspiegelndes Schlagwort geworden. Dahinter steckt insgesamt der Anspruch, eindeutige, übertragbare Reifen-Rollwiderstandsergebnisse mit geringster Unsicherheit erzeugen und hinterlegen zu können. Für die Reifenkategorie C3 ist die Genauigkeit mit $-1,63\% < G < 1,86\%$ spezifiziert. Bei der großen Breite an Prüflaboren ist

diese systematische, offenliegende und von Seiten der EU geregelte Vorgehensweise eine unverzichtbare vertrauensbildende Maßnahme.

Abschließender Hinweis: In der Regulierung UN/ECE-R117-02 ist eine zugelassene Produktionstoleranz von 0,3N/kN definiert.

Die kurz angesprochenen Verfahrensunsicherheiten und auch Nivellierungsanstrengungen bei den Prüfeinrichtungen stehen NICHT im Fokus der hier berichteten Untersuchung. Die treibende Motivation war und ist allein in der beabsichtigten Klärung einer im Kontext der CO₂-Thematik stehenden, aktuell besonders stark interessierenden Frage begründet: Wie hoch sind bei großen Nutzfahrzeugreifen die Differenzen zwischen den tatsächlich auf der Strasse wirksamen Reifen-Rollwiderständen gegenüber den im Labor auf einer gekrümmten, glatten Stahltrommel normkonform gemessenen?

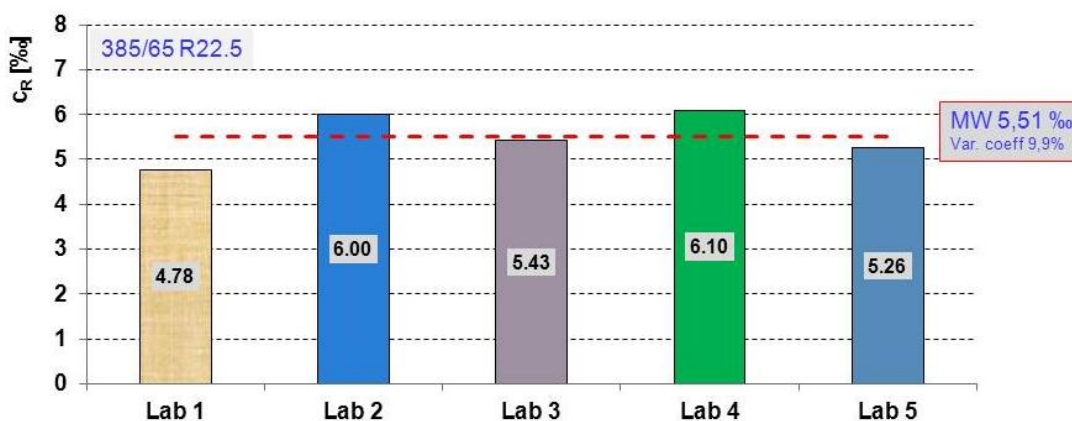


Abbildung 2.6: ‘Round-Robin-Test - Trommel-Prüfstände‘[4]

3 Vorgehensweise

Das besondere Interesse an einer Feststellung des Reifenrollwiderstandes auf echten Straßen lässt sich über Jahrzehnte hinweg an der Veröffentlichung einiger bemerkenswerter Spezialfahrzeuge verfolgen [5]. Viele der hiermit in der Kategorie ‘Pkw-Reifen‘ gewonnenen praktischen Erfahrungen sind publiziert worden, aber auch die Stärken und Schwächen einzelner Lösungsvarianten sind auf diese Weise dem kritischen Betrachter näher gerückt. Diesen und eigenen Erkenntnissen folgend, ist bei IPW in 2009 ein Rollwiderstandsmessanhänger mit Spurverstellmöglichkeit für Pkw-Reifen entstanden [6]. Dessen bewährte Funktion und Zuverlässigkeit hatte dazu angeregt, das benutzte Messverfahren auf einen Lkw-Gliederzug mit 18t-Anhänger umzusetzen.

3.1 Outdoor-Messmethode ‘Rollwiderstand auf echter Fahrbahn‘

Die aktuelle Ausführung des Kraftmessgliedes geht aus **Abbildung 3.1** hervor. Es ist zwischen Koppelmaul und Deichselkopf eines Wechselbrückenzugs installiert. Besondere Merkmale sind die spielfreie mechanische Anbindung, Robustheit und eine hohe Messempfindlichkeit bei minimaler Signaldrift.



Abbildung 3.1: Koppelkraftmessung als Fahrwiderstandsindikator des Anhängers

In hoher Auflösung wird die Fahrtrichtungskomponente der Koppelkraft gemessen, die im weiteren Verlauf als Deichselkraft F_D bezeichnet wird. F_D beinhaltet die Summe der am Anhänger wirksamen Fahrwiderstände, welche aus 4 Teilwiderständen besteht:

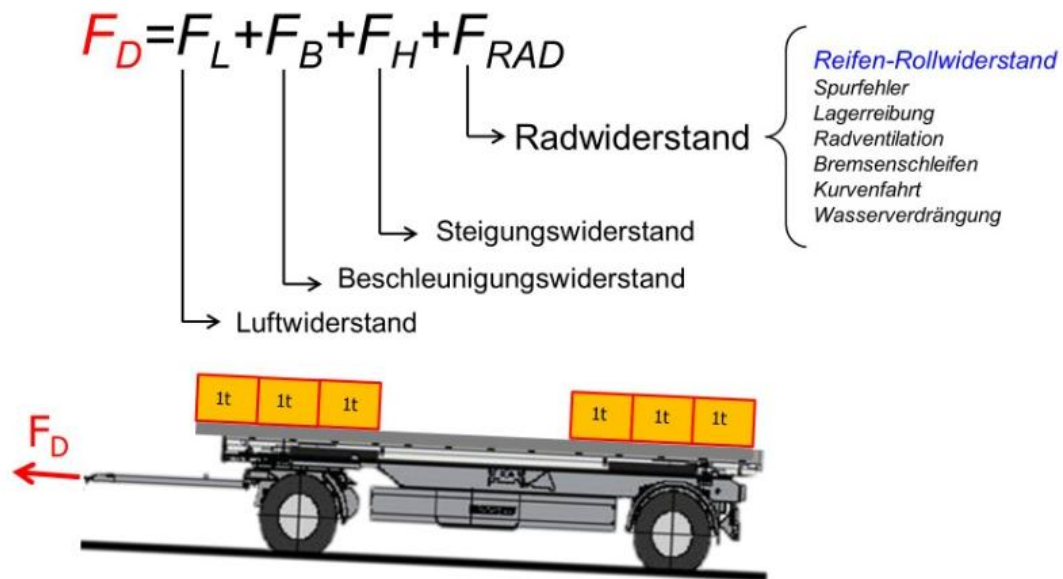


Abbildung 3.2: Outdoor-Prüfverfahren ‘Koppelkraftmessung‘

- Luftwiderstand F_L
- Beschleunigungswiderstand F_B
- Steigungswiderstand F_H
- Radwiderstand F_{RAD}

Eingeschlossen im Radwiderstand ist der zu identifizierende Reifen-Rollwiderstand, der von Nebenwiderständen überlagert wird, **Abbildung 3.2**. Ihr störendes Auftreten ist möglich, wenn Effekte wie

- Spurfehler
- Lagerreibung
- Radventilation
- Bremsenschleifen
- Kurvenfahrt
- Wasserverdrängung (Fahrbahn nass)
- Fahrbahnverformung

nicht ausgeschlossen werden. Die Auflistung der möglicherweise beteiligten Widerstandskomponenten soll verdeutlichen, dass die Messgliedeignung zwar eine fundamentale Voraussetzung für eine erfolgreiche Erfassung des Fahrwiderstandes ist, dass aber

der gesuchte Reifen-Rollwiderstand der 4 Räder letztlich nur in Kombination mit einer ausgeklügelten Versuchsdurchführung zielführend separiert werden kann.

Die diesbezüglich zu erfüllenden Rahmenbedingungen bzw. Streckenvoraussetzungen sind in einer Strategieanweisung verankert, die auszugsweise in **Abbildung 3.3** wiedergegeben ist. Drei Notwendigkeiten seien an dieser Stelle hervorgehoben:

- *Konstanz der Fahrgeschwindigkeit*
- *Kompensation von Hangabtriebskräften*
- *Minimierung aerodynamischer Störeinflüsse.*

Die Versuche werden mit einer niedrigen Fahrgeschwindigkeit von nur 15 km/h durchgeführt, um in Kombination mit niedriger Anhängerhöhe und großer frontaler Abschattung durch den Kastenaufbau des Zugfahrzeugs einen zu vernachlässigenden aerodynamischen Fahrwiderstand zu generieren. Das ist jedoch nur zutreffend, wenn überlagerte Windstörungen durch Böen und Anströmungen mit mehr als unbedeutenden Fahrwiderstandseinfluss vermieden werden.

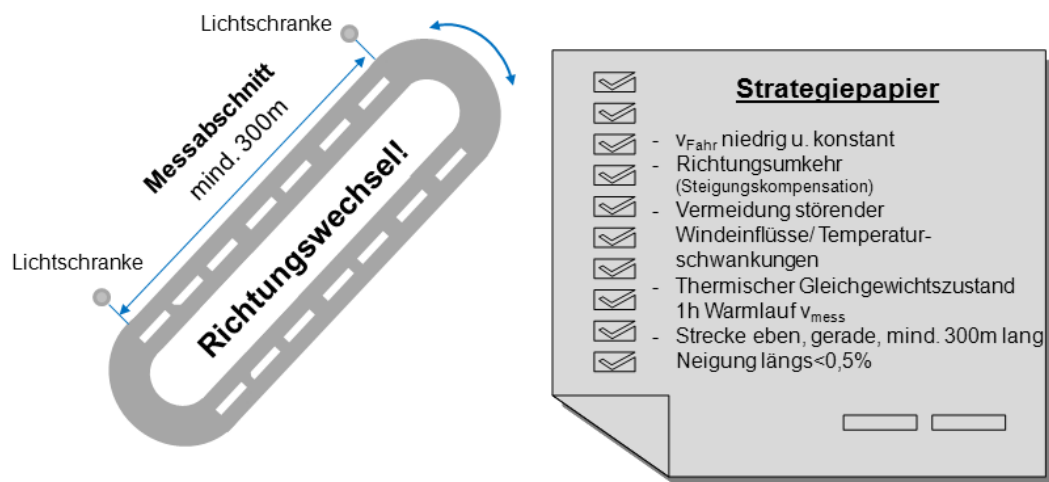


Abbildung 3.3: Auszug 'Strategiepapier' - Rahmenbedingungen & Anweisungen

Unerwünschte Trägheitskräfte lassen sich durch Realisierung einer gleichförmigen Fahrt ausschließen, was manuell jedoch bestenfalls nur über kurze Abschnitte gelingen kann. Um diesem Idealzustand möglichst nahezukommen, übernimmt eine geeignete Geschwindigkeitsregelanlage diese Aufgabe.

Mit dem in **Abbildung 3.3** skizzierten Rundkurs, der in beiden Richtungen befahrbar ist, soll darauf hingewiesen werden, dass ein zuverlässiges Endergebnis grundsätzlich auf mindestens zwei Teilergebnissen von gegenläufigen Fahrten auf ein- und demselben Fahrbahnabschnitt basiert (Paarbildung!). Mit dieser Prozedur kann ein nicht konstantes Höhenprofil der Messstrecke so ausgeglichen werden, dass die Hangabtriebskraft den unbedingt anzustrebenden Paarmittelwert 'null' erreicht (**Abbildung 3.4**). Mehrere Wiederholmessungen ermöglichen eine Kontrolle der Ergebnisstabilität, sowohl der Einzelversuche als auch der Paarmittelwerte, zudem sichern sie das resultierende Ergebnis statistisch ab.

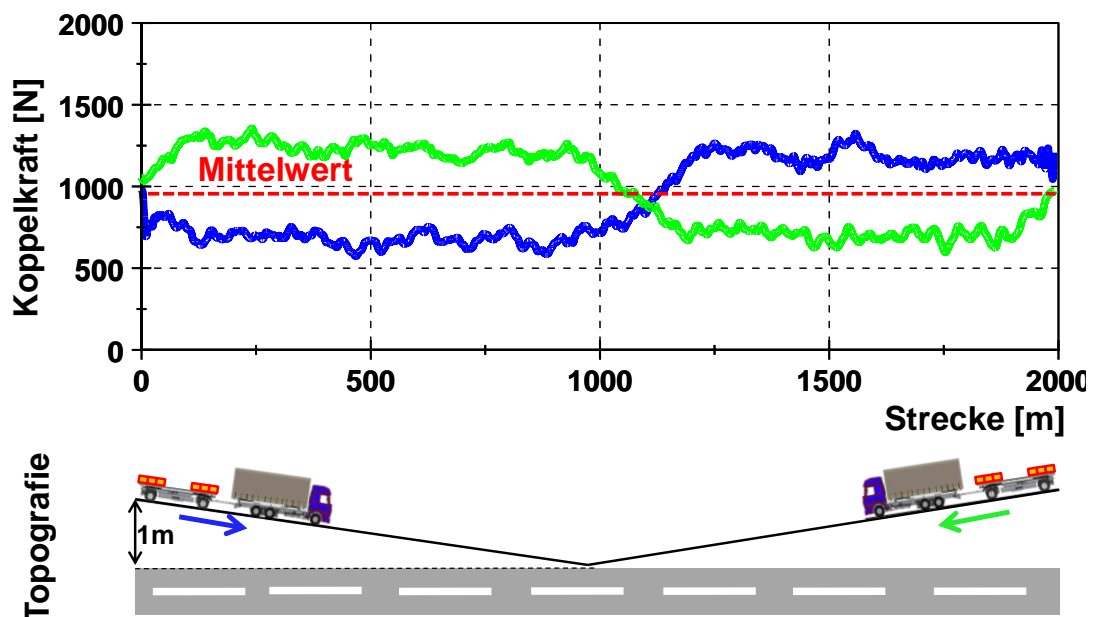


Abbildung 3.4: Prüfprozedur 'Outdoor' – Störgröße 'Fahrbahnsteigung'

3.2 Messtechnik

Neben der im Zentrum des Interesses stehenden Deichselkraft werden weitere Meßsignale von einem im Fahrerhaus installierten mobilen Datenacquisitionssystem aufgezeichnet. Der begleitende Versuchsingenieur kann sich diese Größen über einen Monitor direkt anzeigen lassen, wobei Berechnungsschritte und Zwischenkontrollen unmittelbar online erfolgen.

Von den in **Abbildung 3.5** aufgeführten Temperaturmeßstellen ist insbesondere die Sensierung der Reifenkerntemperatur erwähnenswert. Die Continental AG, Hannover, hatte auf Wunsch an zwei ihrer bereitgestellten Reifen jeweils vier Thermoelemente in der Nähe der Gürtelkante unter Röntgenbeobachtung eingefügt, deren Signale vom drehenden Rad fortlaufend telemetrisch abgegriffen wurden.

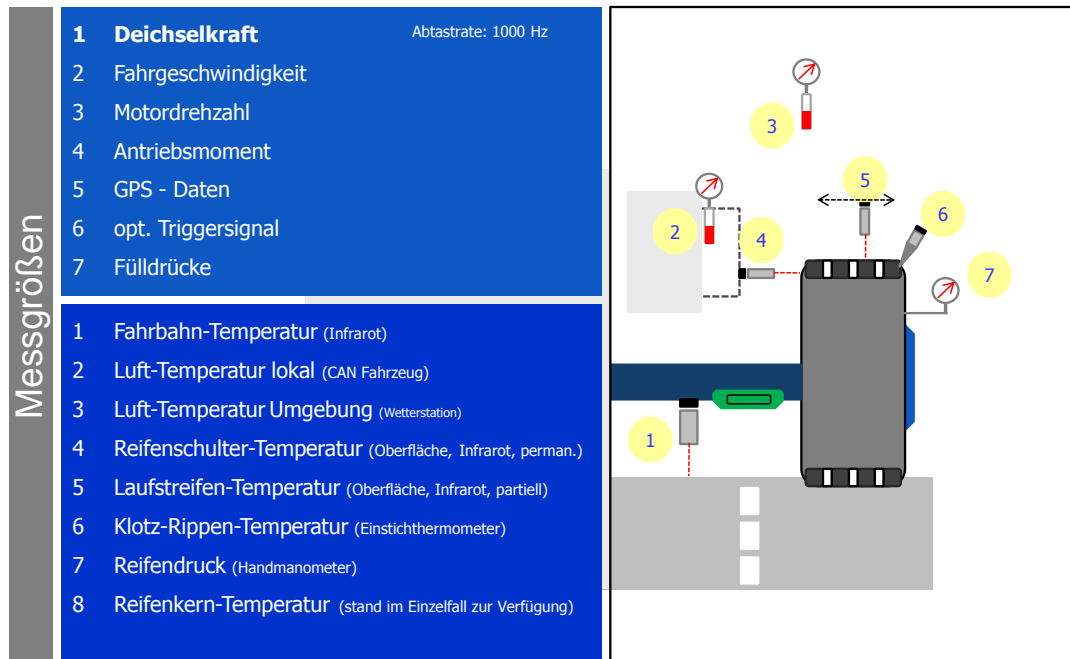


Abbildung 3.5: Messgrößen im Fahrversuch

Für eine Sensierung des Reifendrucks während der Radrotation standen zwei unterschiedliche Einrichtungen zur Verfügung: a) Funksensorik und b) Luftdrehübertrager. Der in der pneumatischen Verbindungsleitung des Luftdrehübertragers integrierte



Abbildung 3.6: Fülldruckregelung

Drucksensor ist ein heute übliches hochgenaues Messinstrument, dennoch wurde der weniger präzisen Funksensorik zumeist der Vorzug gegeben, da einfacher handhabbar. Die bewährte von IPW entwickelte Eigenbau-Luftdrehübertragertechnik (**Abbildung 3.6**) arbeitet zuverlässig mit in der Tat geringsten Leckageverlusten, vor allem aber wartet diese Lösung mit einem extrem geringen Schleifmoment zwischen Stator und Rotor auf. Diese technische Variante kam an allen 4 Rädern des Anhängers in ausgewähl-

ten Fällen zum Einsatz, wo Bedarf an einem ‘Einfrieren‘ des Fülldrucks in Form eines von außen geregelten Konstantdrucks bestand.

Da nicht an jedem Versuchsort eine Wetterstation vorhanden ist, wurde bei jeder Messfahrt eine hochwertige mobile Wetterstation mit Temperatur- und Windaufzeichnung mitgeführt und an geeigneter Stelle aufgestellt.

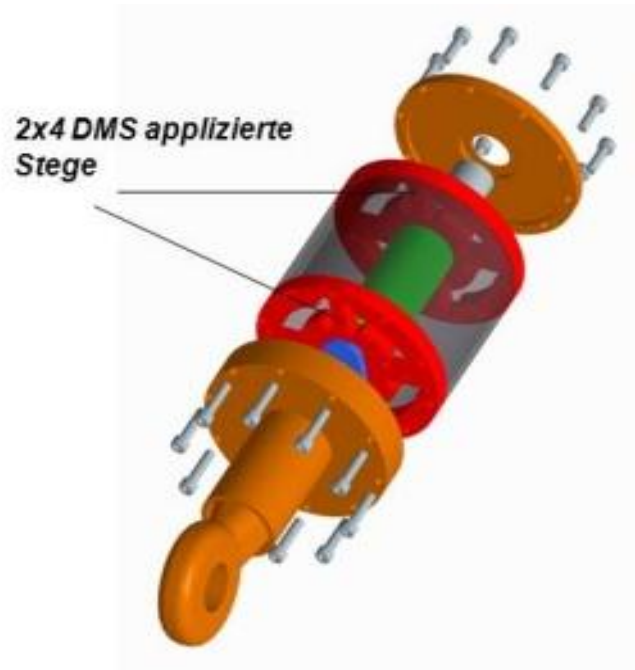


Abbildung 3.7: Aufbau ‘IPW-Deichselkraftsensor‘

Dieses Kapitel darf nicht enden, ohne noch einige Informationen zu dem im Eigenbau entstandenen Deichselkraft-Messglied zu geben (**Abbildung 3.7**). Der einaxiale Kraftsensor (Zug/Druck) basiert auf einer temperaturkompensierten DMS-Applikation, deren Funktion unter Verwendung eines Klimaschranks erprobt wurde und sich im Temperaturgebiet $-10^{\circ}\text{C} < T < 65^{\circ}\text{C}$ als thermisch außerordentlich stabil erwiesen hat. Die Bruchlast liegt bei 200 kN, der kalibrierte Arbeitsbereich bei 2,5 kN. Die typische Grundgenauigkeit ist besser als 0,5% V.E. in diesem Bereich.

3.3 Versuchsprogramm

Im Mittelpunkt stand zu Beginn der Untersuchung allein die Reifendimension 385/65 R22.5. Acht neue Fernverkehr-Trailerreifen mit dem typischen Rillenprofil waren als Versuchsobjekte seitens Michelin bereitgestellt, hiervon vier Stück mit Vollprofil und vier auf ein Restprofil von 4 mm Höhe abgeraute. Allesamt Serienprodukte aus einer Herstellcharge. Wie in **Abbildung 3.8** angedeutet, wurden die Reifen sowohl auf verschiedenen Prüfständen als auch im Fahrversuch ‘outdoor‘ auf echten Fahrbahnen untersucht.



Abbildung 3.8: Untersuchungskonzept 2011

In der Versuchskampagne 2011 stand ebenfalls ein Trailerreifen gleicher Dimension im Blickfeld – nun ein Produkt des Herstellers Continental. Zudem wurden aber auch Reifen mit Blockprofil (Antriebsreifen) auf dem Messanhänger gefahren, **Abbildung 3.9**, in Zwillings- als auch in Supersingle-Ausführung. Eine weitere Darstellung zur Beschreibung der Reifenobjekte befindet sich im **Anhang**.

Für die ‘Outdoor‘-Rollwiderstandsmessungen wurden diverse Prüfgelände mit unterschiedlichen Fahrbahnbelägen und damit auch Texturrauheiten innerhalb Deutschlands und auch im Nachbarland Frankreich aufgesucht. Einen örtlichen Eindruck vom Befahren einer besonders interessierenden öffentlichen Strasse in Bayern, einer noch nicht für den Verkehr freigegebenen neuen Autobahnteilstrecke, zeigt **Abbildung 3.10**. Eine sehr breite Palette unterschiedlicher Fahrbahnbeläge bietet das IFFSTAR-Prüfgelände in der Nähe von Nantes, welches im Herbst 2011 für Messungen zur Verfügung stand. Beachten Sie gegebenenfalls die anschauliche Geländedarstellung in **Abbildung 4.13**.

Welche Aspekte waren der Antrieb dafür, diese verschiedenen Versuchsorte aufzusuchen? Was waren die inhaltlichen Schwerpunkte? Als Antwort auf die gestellten Fragen kann der in **Abbildung 3.9** dargestellte Auszug aus der Versuchsübersicht der in 2011 bearbeiteten Aufgaben einen ersten anschaulichen Überblick geben.

Versuchsprogramm 2011











Trailerreifen		Antriebsreifen	
385/65 R22.5		315/70 R22.5	
Michelin XTA2+ Energy		Zwilling	
Continental HTL2 Eco-Plus		Supersingle	
		Michelin XDN2 Grip	Michelin XDN2 Grip
A	Rauheit		A94...Forstinning I A94...Forstinning II
B	Einfluss Radlast/ Fülldruck		Klettwitz (Dekra)
C	Einfluss "Nässe"		Papenburg (ATP)
D	Umgebungstemperatur		Papenburg (ATP)
E	Sonderprogramm "Nantes"		Nantes (IFSTTAR)
F	Zwilling vs. Supersingle		Klettwitz (Dekra)

Abbildung 3.9: Versuchsprogramm 2011



Abbildung 3.10: Autobahneubaustrecke bei "Forstinning"

Die verschiedenen dort bezeichneten Gelände boten vor allem die Möglichkeit, unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen grundlegende Erfahrungen zur real vorhandenen Bandbreite von Rollwiderstandsergebnissen zu gewinnen. Die in der linken Bildhälfte vorgestellten Aspekte A-D bezeichnen diejenigen Einflussfaktoren, deren Hinterfragung in besonderer Weise einen wichtigen Teilschwerpunkt der Untersuchung ausmachte. Kern der Aufgabenstellung war allerdings der nicht aus **Abbildung 3.9** hervorgehende Resultatsvergleich der Verfahren ‘Outdoor- und Trommelmessung’.

4 Ergebnisse

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungsergebnisse beinhalten sowohl Rollwiderstandsprüfungen auf Trommelanlagen mit Durchmessern von 2,0 m und auch 2,7 m als auch die besonders im Blickfeld stehenden 18t-Anhänger-Messungen mit dem vorgestellten Gliederzug. Ebenso wie auf der Trommel gehört zum Versuchsablauf einer ‘Outdoor’-Messreihe zwangsläufig eine sorgfältige, hinreichend andauernde Vorkonditionierung der Objekte, die allerdings in der natürlichen Umgebung unter den jeweils herrschenden Witterungsbedingungen kaum steuerbar abläuft. Eine Auswahl von geeigneten Wetterlagen ist zwar kurzfristig zumeist gut möglich, jedoch sind Temperaturänderungen von Luft und Boden, Intensitätsänderungen der Sonnenstrahlung, Abschattungswechsel, sich ändernde Windverhältnisse und auch der variable Bedeckungsgrad der Wolken im Tagesverlauf einer Testaktion nicht konstante, zudem leider unbeeinflussbare Parameter. Da von diesen äußeren Rahmenbedingungen der Wärmehaushalt bzw. die Erwärmung des Reifenmaterials abhängig ist, unterliegt der erzeugte Rollwiderstand grundsätzlich der Variabilität der Umweltbedingungen. Ein Störpotenzial, welches ein elementares Manko der hohen Realitätsnähe der ‘Outdoor’-Methode ist und sich nicht beseitigen lässt; auch nicht durch größte Sorgfalt bei der Testdurchführung.

4.1 Einrollphase

Entsprechend der Prüfstandsprozedur müssen die an den Radaufnahmen des Messanhängers montierten Prüflinge vor den eigentlichen Messläufen über eine definierte Warmlaufphase thermisch konditioniert werden; wobei als erste Maßnahme, nach 12h Ruhezeit bei Umgebungstemperatur, der Fülldruck auf den im Kaltzustand vorgesehene Wert einzustellen ist. Der auf 15km/h festgelegte Betriebspunkt aller Messungen verlangt ein Warmfahren mit genau dieser Fahrgeschwindigkeit, da sich nur so das auf einem produktspezifischen Temperaturlevel angesiedelte stationäre Temperaturgleichgewicht zwischen Reifen und Umgebung einstellen kann. Störungen, wie Brems-, Beschleunigungs- und Wendemanöver, würden Verfälschungen auslösen. Voraussetzung ist deshalb in der Warmlaufphase ein monotoneres Fahren mit ebenfalls konstant 15km/h auf einem für diese Aufgabe geeigneten Prüfgelände.

Die Erfahrungen zeigen, dass der angestrebte stationäre Zustand bei dieser niedrigen Fahrgeschwindigkeit unter weitgehend konstanten Umgebungsbedingungen bereits nach einer Stunde Warmfahrt vorliegt. Die allmähliche, stetige Absenkung des Fahrwiderstands bei gleichzeitig tageszeitbedingtem Anstieg der Luft- und auch Bodentempe-

raturen dokumentieren die beispielhaften Messgrößenverläufe in **Abbildung 4.1**. Die Fahrwiderstandskraft (Deichselkraft) geht kontinuierlich auf einen Stationärwert zurück, wobei der Kraftbetrag auf der Zeitachse schließlich nur noch in geringem Maße um den Mittelwert streut. In der Messgröße ‘*Deichselkraft*’ sind die Radwiderstände aller vier Räder summarisch zusammengefasst. Enthalten darin ist zusätzlich auch ein beteiligter unbekannter, aber sehr kleiner Luftwiderstandsanteil, dessen Betrag sich nach den gewonnenen Erfahrungen ohne Windeinfluss auf circa 15 bis 20 N beläuft. Der genaue Wert ist nicht in jedem Einzelfall ermittelbar. Auf Grund des niedrigen Anteils wird diese Ungenauigkeit als kleinster Fehler definiert und uneingeschränkt im Reifen-Rollwiderstandsergebnis toleriert.

Hinweis: Der gezackte Verlauf der Bodentemperatur ist auf Unterschiede zwischen den beiden Bahnen bei Hin-/Rückfahrt zurückzuführen.

Der festgestellte Mittelwert der Deichselkraft wird unmittelbar mit der vorab kontrollierten Gewichtskraft des Anhängers ins Verhältnis gesetzt, woraus sich unter hier zulässiger Vernachlässigung der als unbedeutend eingestuften Rad-Nebenwiderstände ein Durchschnittswert für den Rollwiderstandsbeiwert der beteiligten 4 Reifen ergibt. Die offensichtlich geringe Streuung der Paarmittelwerte bestätigt sich in einer relativen Standardabweichung von in der Regel weniger als 1,5%.

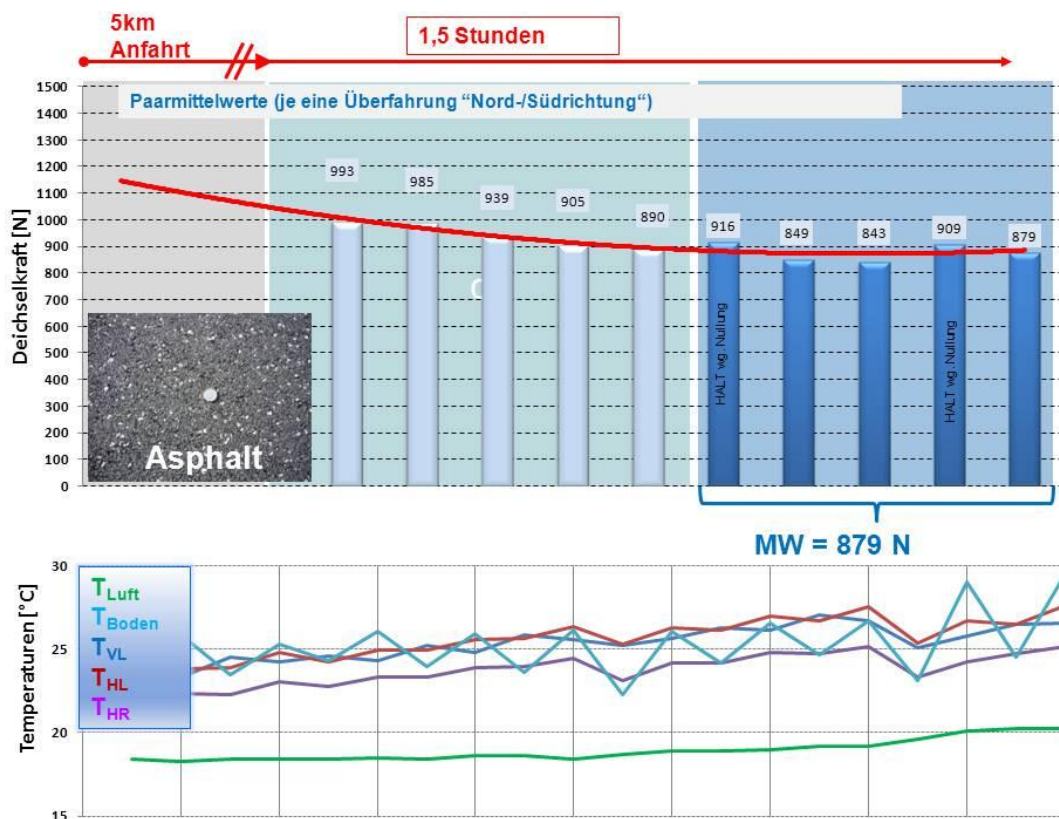


Abbildung 4.1: Zeitverhalten Fahrwiderstand u. Temperaturen / (15km/h)

4.2 Produktstreuung

Dass bei der ‘‘Deichselkraftmessmethode‘‘ auf Grund der überlagerten Rollwiderstände von gleich vier Radpositionen ein höheres Zugkraftniveau besteht, ist ein messtechnischer Vorteil. Er ist nutzbar, da die individuellen Unterschiede zwischen einzelnen Exemplaren einer Produktionscharge sehr gering ausfallen. Diese bekannte Aussage wird durch die in **Abbildung 4.2** vorgestellten Feststellungen bestätigt, welche auf den Prüfergebnissen von 2 unterschiedlichen Reifensätzen der Dimension 385/65 R22.5 basieren. Hierbei handelt es sich um Neureifen mit Rippenprofil.

Das individuelle Ergebnis der 4er Stichprobe variiert mit weniger als 0,32% um den Mittelwert. Es ist ein typisches Resultat für die Bandbreite des Rollwiderstandskoeffizienten, wenn Reifen aus einer Produktionscharge untersucht werden. Als Erkennungsmerkmal wurde die DOT-Beschriftung benutzt. Nicht nachgegangen wurde der Frage, welche Verschiebungen auftreten, wenn Ergebnisse von Reifen auseinanderliegender Produktionszeiträume verglichen werden. Hingewiesen sei an dieser Stelle auf den festgestellten Rückgang des Rollwiderstands in Folge des Einrollens (1000km).

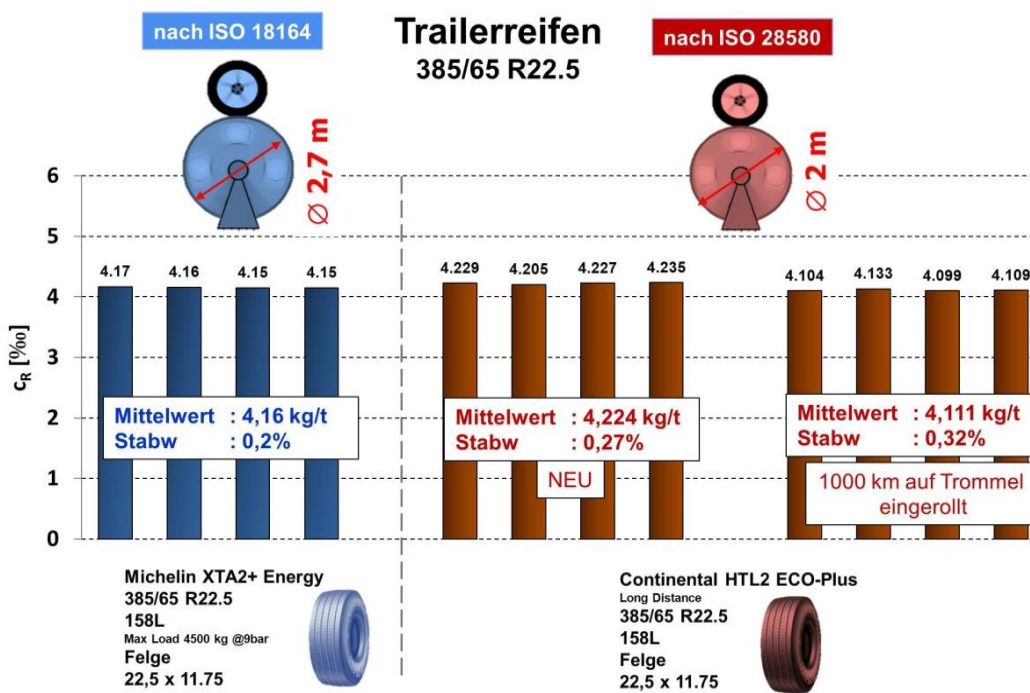


Abbildung 4.2: Prüfstandsergebnisse Trailerreifen ‘A’ und ‘B’

4.3 Einflussfaktoren

Die Abhängigkeit des Reifen-Rollwiderstands von einer Vielzahl von äußeren und auch inneren Einflussfaktoren ist keine neue Feststellung. Immer motiviert, den Reifen zu optimieren, werden seit mehr als 20 Jahren sehr intensive Anstrengungen unternommen,

Rollwiderstandsverluste zu verringern, was durchaus schon in bemerkenswerter Weise gelungen ist (**Abbildung 4.3**). Ein wesentlicher Teil der erzielten Fortschritte steht vor dem Hintergrund zunehmend verbesserter Kenntnisse der Reifenentwickler in Bezug auf einen zielführenden konstruktiven Aufbau und einen ausgeklügelten Materialeinsatz, alles eng vernetzt im Rahmen eines grundsätzlich notwendigen Kompromisses zwischen Anforderungen auf den Gebieten Laufleistung, Nassgriff, Lärm und Rollwiderstand.

Für das fertige Reifenprodukt kann seine besondere Effizienz unter Beweis gestellt werden, z.B. durch eine günstige Einstufung auf dem Label. Wie aber steht es um den Rollwiderstand des Reifens unter hiervon abweichenden Betriebsbedingungen? Es soll in den folgenden Unterrubriken versucht werden, mit den in diesem Projekt gesammelten praktischen Erfahrungen einige wesentliche Parameter zu beleuchten.

Entwicklung des Rollwiderstandsbeiwerts von 1990 bis 2015

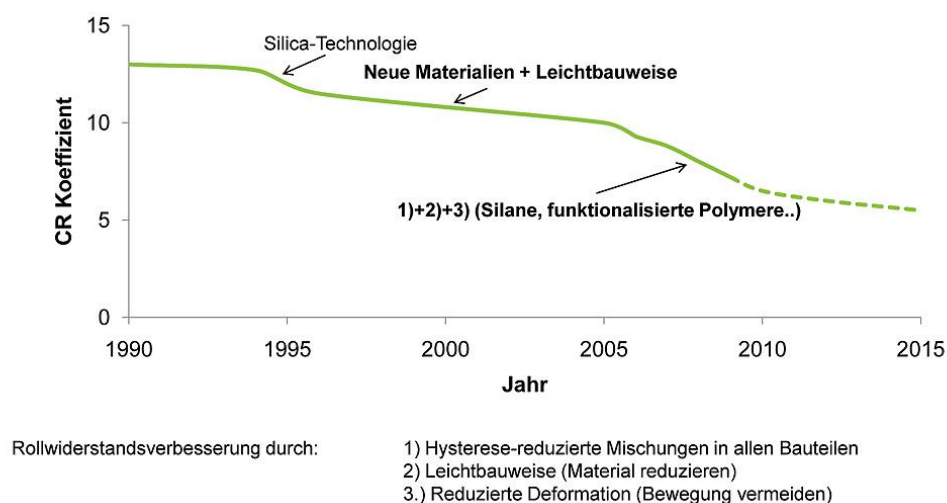


Abbildung 4.3: Entwicklung Reifenrollwiderstand [16] (Continental)

4.3.1 Profilhöhe

Die in Bild **Abbildung 4.4** gezeigte Ergebnisgegenüberstellung von 2 Reifengruppen, a) Vollprofil und b) Reifen mit geringer Restprofilhöhe bestätigt die bekannte Konstrukteurs-These, dass eine verringerte Materialmenge die verformungsbedingten Energieverluste beim Abrollen mindert.

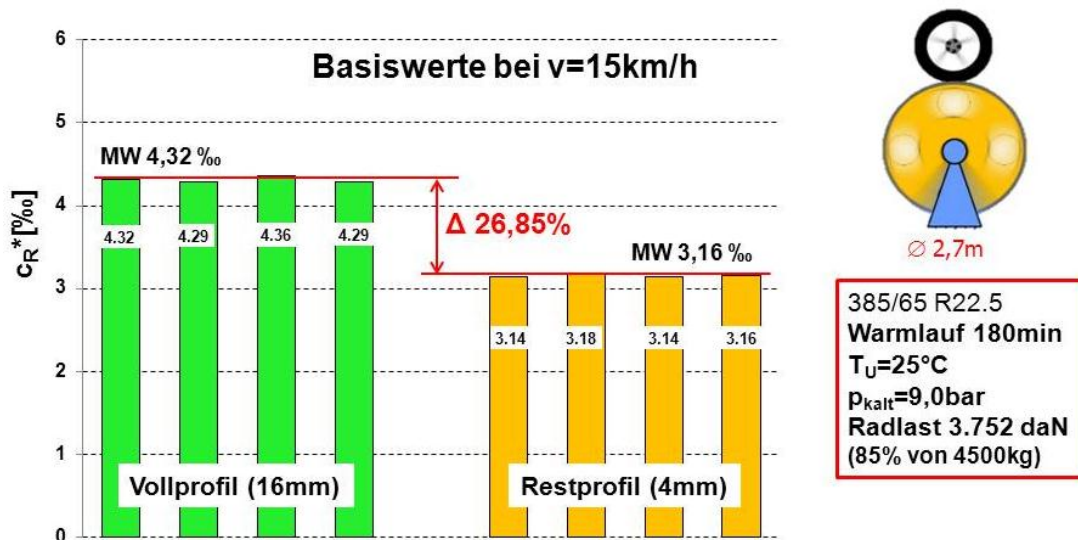


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung Vollprofil vs. Restprofil (Prüfstand Michelin)

Es ist offensichtlich, dass sich mit abnehmender Profilhöhe der Rollwiderstand verringert. Bei diesem Produkt hat ein Delta von 12 mm Profiltiefe zu einer drastischen Verbesserung des Rollwiderstandskoeffizienten von ca. 27% geführt.

Folgerichtig lässt sich aus damit einhergehenden niedrigeren Warmwerten des Fülldrucks ein geringeres Wärmeaufkommen ableiten: Absenkung von 9,38 bar auf 9,28 bar. Im Falle einer höheren Fahrgeschwindigkeit von 60km/h war eine Differenz von 0,3 bar festzustellen.

Bei Messungen auf echter Fahrbahn konnte die auf der Trommelanlage festgestellte Rollwiderstandsreduzierung von knapp 27% fast identisch mit 25,6% hervorragend nachgestellt werden (**Abbildung 4.5**). Die Schwankungen der Einzelwerte innerhalb der Versuchsreihen begründen sich in nicht konstanten Umgebungsbedingungen.

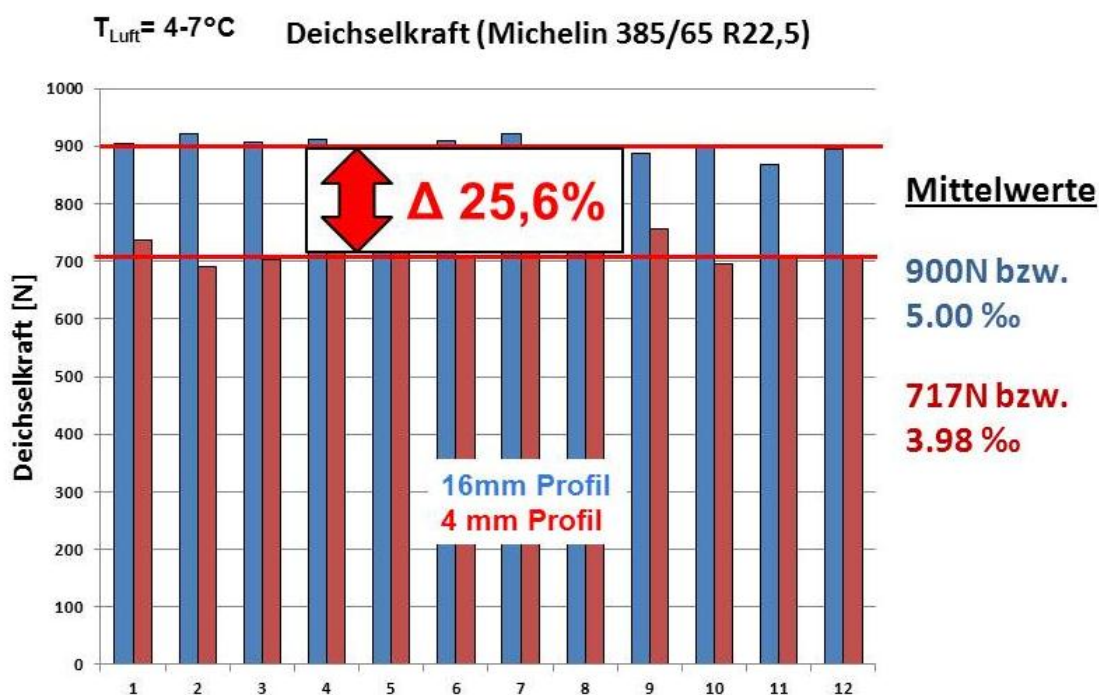


Abbildung 4.5: Vollprofil (16mm) vs. Restprofil (4mm) im Fahrversuch ermittelt

4.3.2 Fahrgeschwindigkeit

Anders als bei Pkw-Reifen, von denen die Eigenschaft bekannt ist, dass bei steigender Fahrgeschwindigkeit eine progressive Rollwiderstandszunahme einsetzt, ist die diesbezügliche Charakteristik großer Nutzfahrzeugreifen davon abweichend.

Im Geschwindigkeitsfenster von bis zu 100 km/h wird das Verhalten in einigen Publikationen durchaus unterschiedlich und sogar gegenteilig beschrieben: Tendenz konstant, steigend und auch fallend, alle 3 Varianten scheinen möglich zu sein. Dabei ist leider nicht immer erkennbar, ob hierbei tatsächlich der sich quadratisch über der Geschwindigkeitsachse entwickelnde Lüfterwiderstand in der Widerstandsbilanz eliminiert wurde; so wie es die 'reine' Definition vorsieht.

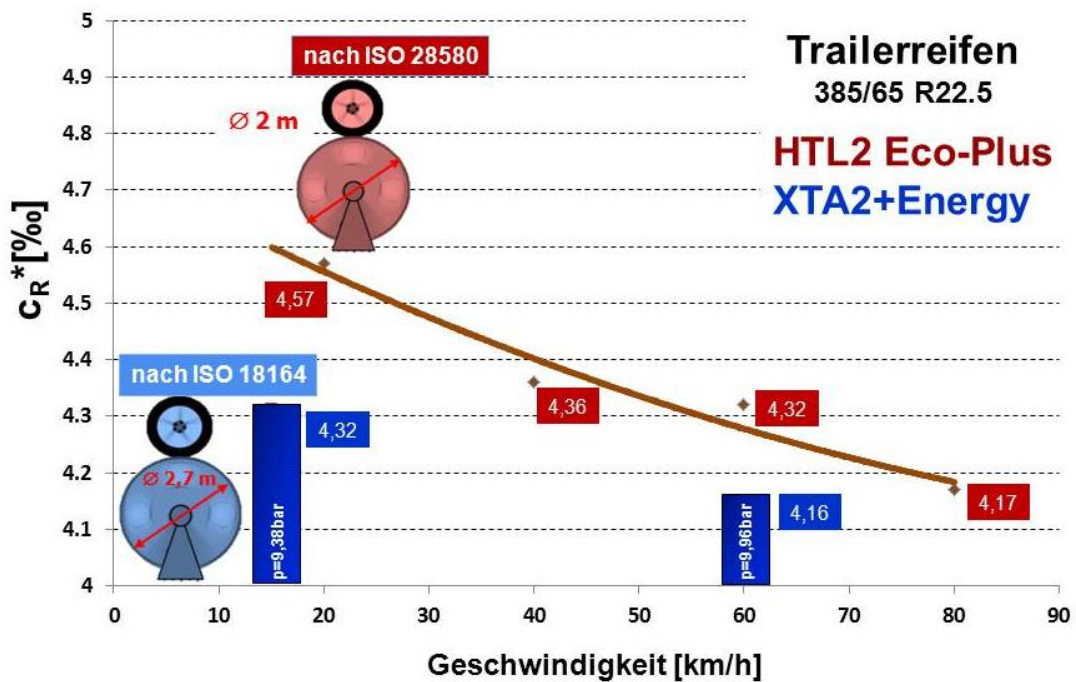


Abbildung 4.6: Geschwindigkeitsabhängigkeit von c_R^* (Prüfstandsmessungen)

Da die in diesem Projekt benutzte Outdoor-Versuchsmethode aus physikalischen Gründen grundsätzlich keine Fahrgeschwindigkeitsvariation zulässt, werden im Folgenden in einem Parallelzweig gewonnene Prüfstandsergebnisse zur Erläuterung dieser wichtigen Abhängigkeit herangezogen. Beide als Trailerreifen bekannte Produkte der Dimension 385/65 R22.5 lassen eindeutig einen fallenden Trend erkennen, **Abbildung 4.6**. Die Tests wurden unabhängig voneinander auf verschiedenen Prüfanlagen (Michelin, Continental) vorgenommen. Allerdings sind die ermittelten Gradienten unterschiedlich, was bei einem Vergleich der beiden Zustände 15 versus 60 km/h deutlich hervortritt, siehe untere Tabelle.

Dim. 385/65 R22.5 Reifentyp	Koeffizient c_R^* v: 15 km/h	Koeffizient c_R^* v: 60 km/h	Delta Rollwiderstand
XTA2+Energy	4,32	4,16	-3,7 %
HTL2 Eco-Plus	4,6	4,32	-6,1 %

Sicher ist, dass ein linearer Zusammenhang nicht von vornherein über die gesamte Breite von 0...100 km/h angenommen werden kann, wie es auch im approximierten Kurvenverlauf (**Abbildung 4.6**) zum Ausdruck kommt. Der festgestellte Trend ‘ c_R fallend‘

bei Geschwindigkeitssteigerung begründet sich durch abnehmende Hystereseverluste (pro Wegeinheit) bei gleichzeitigem Anstieg des Fülldrucks. Die Energieverluste pro Zeiteinheit nehmen rapide zu, es fällt mehr Wärme an, der Gasdruck steigt, die Einfederung geht zurück ... so lässt sich das Szenario stark vereinfacht für den stationären Zustand beschreiben. Dementsprechend ist für das geschlossene Gasvolumen des Reifens die hier notierte Druckzunahme von 9,38 auf 9,96 bar zu beobachten gewesen - jeweils im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung stehend. Erst in der besonderen Situation eines geregelten Konstantdrucks verändert sich der Rollwiderstand über der Fahrgeschwindigkeit nicht mehr in der Art und Weise des hier deutlich fallenden Trends, sondern er verharrt dann eher auf weitgehend konstantem Niveau.

Auf Basis der nur geringen Fallzahl mit nur 2 Trailerreifen-Produkten kann selbstverständlich nicht die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reifen-Rollwiderstands sich bei LKW- und Busreifen in eben dieser Charakteristik einzig und allein darstellt. Allein schon die Typvarianten Rillen- und Klotzprofil verlangen diesbezüglich eine getrennte Aufmerksamkeit. Einzelne Beispiele (**Abbildung 4.7**) für eine leicht ansteigende [9] und auch bauchig ausgeprägte Abhängigkeit sind bekannt. Es handelt sich generell um eine produktspezifische Eigenschaft, was nicht zuletzt auch an verschieden ausgeprägten Betriebstemperaturen liegt.

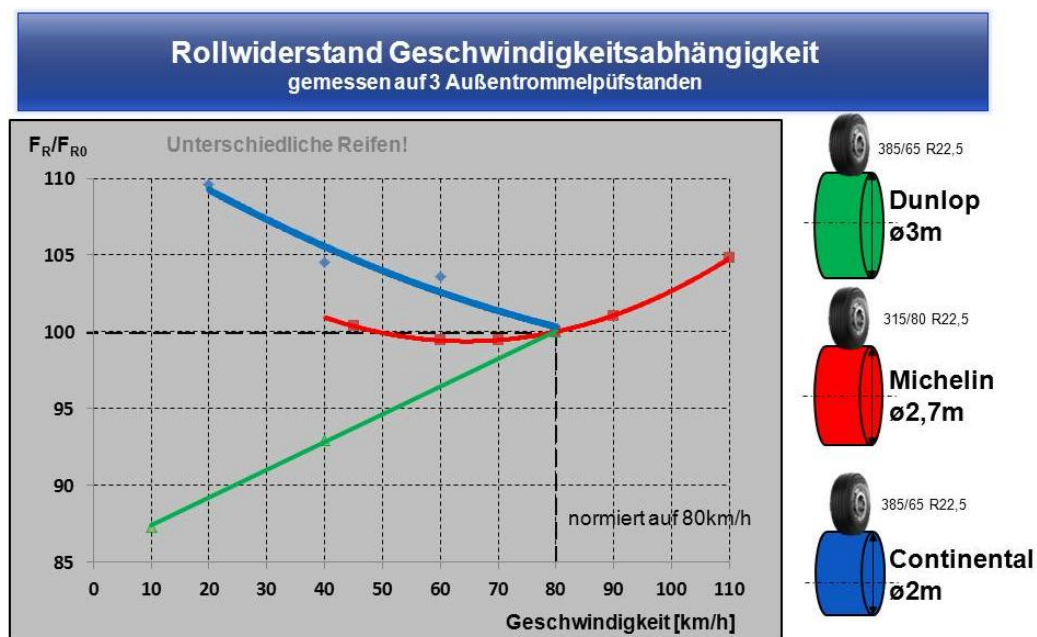


Abbildung 4.7: Beispiele unterschiedlicher geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsverläufe (verschiedene Produkte und Labore)

4.3.3 Fülldruck

Es gehört zu den praktischen Erfahrungen des Kraftfahrzeugführers, dass sich ein Unterschreiten des Nominaldrucks langfristig ungünstig auf die Reifenhaltbarkeit auswirkt, zudem darüberhinaus einen gesteigerten Kraftstoffverbrauch zur Folge hat, dessen Ursache der höhere Rollwiderstand ist. Dieser hängt in hohem Maße vom kalt eingestellten Luftdruck ab, welcher sich im Betrieb durch Erwärmung erhöht.

Auch bereits bei einer niedrigen Fahrgeschwindigkeit von nur 15 km/h führen die schon zuvor beschriebenen inneren Wechselwirkungen zu einer messbaren, deutlichen Reifenerwärmung. Wie sich die thermische Situation im Verlauf der Vorkonditionierungsphase auf echter Fahrbahn entwickelt, das zeigen die Verläufe mehrere Signale von Sensoren, die am Messanhänger und im Reifen selbst installiert waren (**Abbildung 4.8**). Schon ein kurzer Stopp genügt, um die Kerntemperatur, innen an der Gürtelkante gemessen, unmittelbar kurzzeitig zu reduzieren. Merkmal: Wärmeproduktion eingestellt, Wärmeverteilung umgestellt! Ohne Halt wäre die Temperatur stetig auf bis zu 46°C angestiegen. Weniger empfindlich auf die am Ende der Fahrt leicht rückgängige Bodentemperatur reagiert erwartungsgemäß der kontinuierlich gestiegene Fülldruck. Dessen Zunahme von 9 bar (kalt) auf über 9,5 bar (warm) liegt geringfügig oberhalb des auf dem Prüfstand mit 9,4 bar festgestellten stationären Wertes.

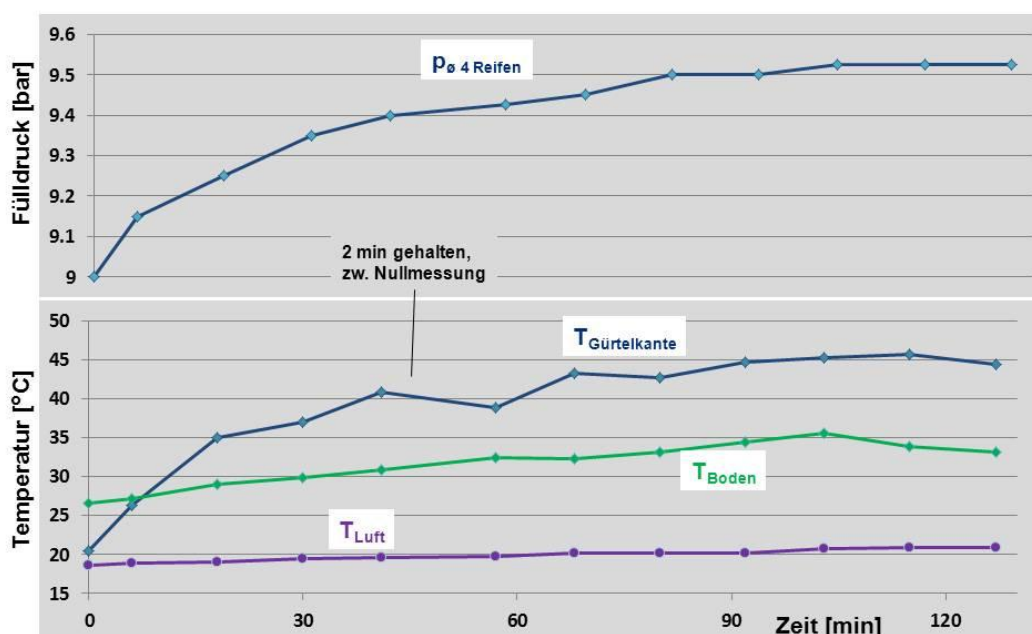


Abbildung 4.8: Fülldruck- u. Temperaturentwicklung (15km/h)

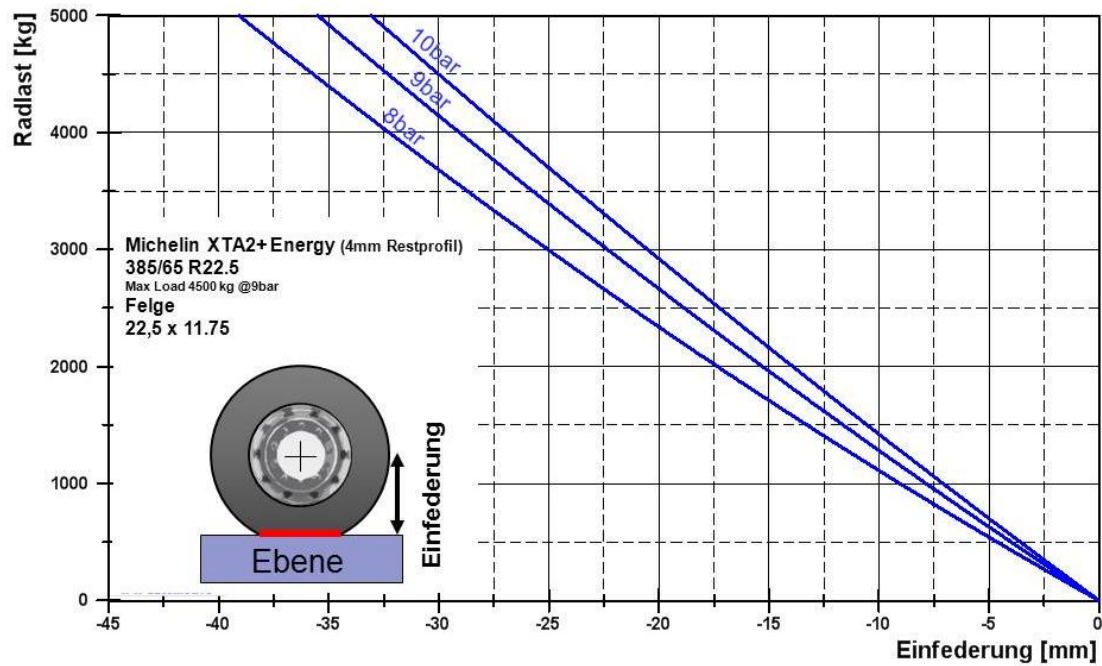


Abbildung 4.9: Einfederungskurven Michelin Trailerreifen (Ebene)

Die Reifeneinfederung ist grundsätzlich abhängig von der Radlast, wobei der Fülldruck diesen Zusammenhang erkennbar beeinflusst, siehe Beispiel in **Abbildung 4.9**. Weniger Fülldruck bei konstanter Last bedeutet eine stärkere Einfederung und demzufolge eine Zunahme an Walkarbeit beim Rollvorgang. Daraus resultiert ein höherer Wärmeumsatz, somit erfolgt auch ein Gasdruckanstieg. Was lösen diese Wechselbeziehungen in Bezug auf den stationären Rollwiderstand konkret aus?

Nach Angaben des Reifenherstellers Michelin [2] läßt sich der Zusammenhang zwischen Fülldruck, Radlast und Rollwiderstand mittels der nachstehenden empirischen Formel ausdrücken:

$$F_R = F_{R_ISO} * \left(\frac{p}{p_{ISO}}\right)^\alpha * \left(\frac{F_Z}{F_{Z_ISO}}\right)^\beta \quad (4.1)$$

Als Erfahrungswerte für die Exponenten ‘ α ’ und ‘ β ’ können im Fall von Lkw-Reifen die Zahlenwerte -0,2 (α) und 0,9 (β) empfohlen werden. Das Kürzel ISO weist auf den bei der Trommelmessung unter Normbedingungen - hier nach ISO 9948 (25°C, 80 km/h, 85% max. Load, max. p) - einzustellenden Wert der Größen p und F_Z hin. Mit F_Z ist die Radlast bezeichnet. Einen direkten Praxisbezug bekommt die in **Gleichung 4.1** vorgestellte empirische Abhängigkeit auf der Grundlage des in **Abbildung 4.10** punktuell gezeigten Zusammenhangs *Rollwiderstand vs. Fülldruck*.

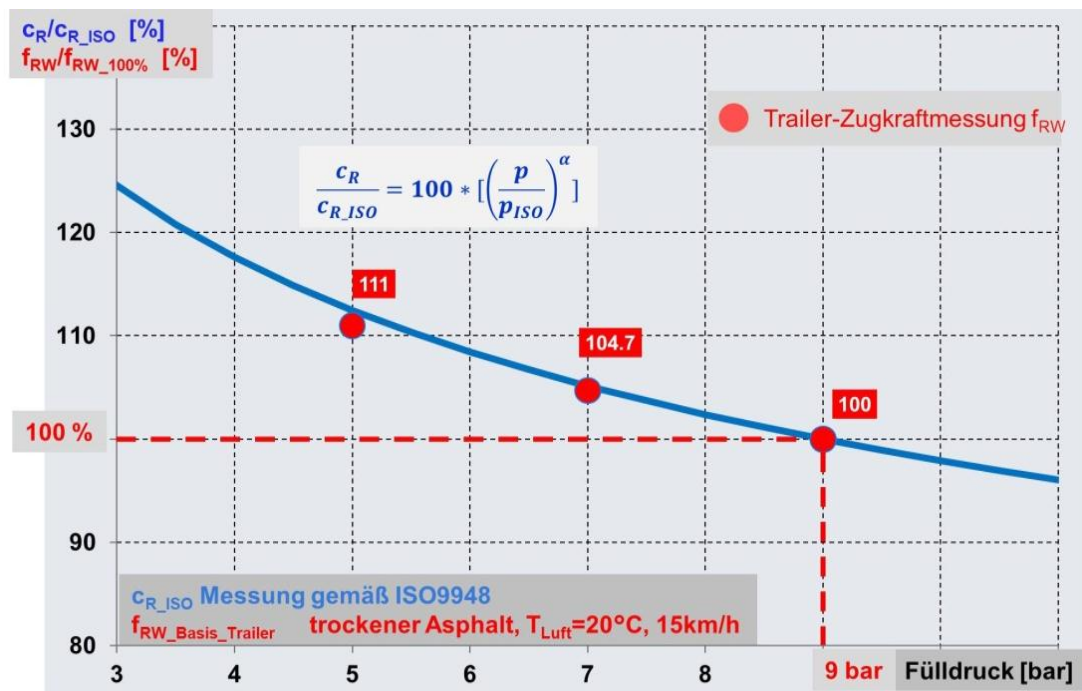


Abbildung 4.10: Fülldruckabhängigkeit des Reifen-Rollwiderstands

Der Rollwiderstand ist darin in dimensionsloser Form auf der Ordinate in Relation zum Ausgangswert aufgetragen. Die Basis bei 100% bildet der bei einem Fülldruck von 9bar erzielte Widerstand.

Anhand des geschlossenen Linienzuges ist erkennbar, dass es sich keinesfalls um einen linearen Zusammenhang zwischen erzeugtem Widerstand und Reifen-Kaltdruck handelt. Die Rollwiderstandsänderung wird umso größer, je weiter man sich in der Praxis vom ‘nominellen’ Fülldruck nach unten entfernt.

Die Outdoor-Messwerte fügen sich an dieser Stelle sehr gut in das Bild der Trommelmessungen ein, obwohl die Ergebnisse beider Methoden auf unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen (15 bzw. 80km/h) beruhen. Nur vor dem Hintergrund einer unbedeutenden Geschwindigkeitsabhängigkeit lässt sich diese Übereinstimmung erklären.

Es ist zu erwarten, dass der vorgestellte Einflusstrend grundsätzlich auch auf andere Reifen der hier betrachteten Kategorie übertragen werden kann – zumindest der qualitative Verlauf.

4.3.4 Radlast

Für die Höhe des Reifen-Rollwiderstands ist der Betrag der Radlast von ausschlaggebender Bedeutung. Eine Lastzunahme ist bekanntlich mit größerer Reifeneinfederung und demzufolge immer auch mit verstärkter Walkarbeit verbunden. Mit dem höheren Energieverlust steigt der Wärmeumsatz und analog hierzu auch der Gasdruck im Reifen. Dieser nützliche Teileffekt kann allerdings nicht verhindern, dass mit der Lastzunahme im stationären Betriebszustand generell ein steigender (absoluter) Rollwiderstand verknüpft ist.

Wie aber verändert sich der auf die Radlast bezogene Rollwiderstand, der Rollwiderstandskoeffizient c_R , in Abhängigkeit von der Radlast?

Zur Beantwortung dieser Frage kann die bereits vorgestellte empirische Beziehung (Gl. 4.1) hilfreich beitragen. Darin treten die beiden Quotienten ‘Fülldruck‘ und ‘Last‘ als Faktoren eines Produktes auf. Für den Fülldruckfaktor kann der Wert 1 angesetzt werden, weil sich der ‘ISO-Wert‘ und der ‘outdoor‘ eingestellte Nominaldruck von 9 bar für den Trailerreifen (385/65 R22.5) nicht unterscheiden. Die weitere Betrachtung des Lasteinflusses – auch in Abb. 4.11 - beruht auf diesem Wert für den kalt eingestellten Fülldruck.

Besondere Merkmale des in **Abbildung 4.11** wiedergegebenen relativierten Funktionsverlaufs sind die flache Form und der markierte Betriebspunkt bei einer Radlast von 85% der Reifentragfähigkeit und 100% Rollwiderstand. Ausgangsbasis für diesen Punkt ist die Lastspezifikation der standardisierten Prüfstandsmessung (ISO). Von diesem definierten Lastpunkt aus betrachtet, hätte eine als Beispielfall angenommene Laststeigerung auf die Marke von 100 % nur eine geringe Auswirkung auf den Rollwiderstandskoeffizienten: Die Änderung betrüge lediglich 1,6 %.

Einprägsamer ausgedrückt liegt für den Zusammenhang zwischen beiden Größen folgende Relation vor:

$$10 \% \text{ Radlasterhöhung} \Leftrightarrow 1 \% \text{ Verringerung des Rollwiderstandskoeffizienten}$$

Die offensichtlich sehr geringe Einflussrate von 10:1 bedeutet bei kritischer Betrachtung allerdings auch, dass sich der Outdoor-Versuch auf Grund seiner beschränkten Verfahrenstrennschärfe kaum dafür eignet, die verwendete empirische Kennung zu verifizieren.



Abbildung 4.11: Radlastabhängigkeit des Reifen-Rollwiderstands

Zum Vergleich von aktuellen Versuchsdaten und der auf Prüfstandsuntersuchungen basierenden Kennung sind in **Abbildung 4.11** auch Ergebnisse von den auf echter Fahrbahn mit dem Messanhänger in 3 Lastvarianten erzielten Rad-Rollwiderstandskoeffizienten vermerkt. Alle 3 Punkte liegen zwar oberhalb des Kurvenzuges, jedoch bestätigen die ‘Outdoor‘-Resultate eindeutig den Trend einer sehr geringen Lastabhängigkeit des Beiwertes. Hinweis: Als Bezugsbasis dient hier der 103%-Wert der Radlast; der Standardfall im getätigten Fahrversuch. Dementsprechend liegen die Punkte per Definition höher.

4.3.5 Nässe

Eine der Rahmenbedingungen von standardisierten Rollwiderstands-Meßmethoden ist auch im internationalen Rahmen die grundsätzlich trockene Fahrbahn. Außentrommelanlagen, wie z.B. im Verfahren nach ISO 28580 vorgesehen - Innentrommeleinrichtungen sind darin ausgeschlossen – ermöglichen keine Nässesimulation. Hierfür sind sie aus naheliegenden physikalischen Gründen ungeeignet.

Der auf einer bewässerten Fahrbahn rollende Reifen leistet eine Wasserverdrängung, die sich als Radnebenwiderstand zusätzlich in der Kraftbilanz niederschlägt. Zu den primären Einflussträgern zählen Wasserhöhe, Reifenbreite und Fahrgeschwindigkeit. Daneben gehören auch das Profildesign und die Profilhöhe dazu, was aus Studien zum Aufschwimmen von Reifen (Aquaplaning) bekannt ist.

Im Gegensatz zu diesem Phänomen stand im vorliegenden Projekt ein anderer Nässeaspekt im Vordergrund: Wasser auf der Fahrbahn als Trennmittel. Dass aber nicht zuletzt auch die Kühlwirkung den Rad-Rollwiderstand beeinflusst, ist unbedingt zu beachten.

$$F_{R_schw} = \frac{b}{100} * \left(\frac{v_R}{10}\right)^{1,6} \text{ (für Wassertiefe } 0,8\text{mm)} \quad (4.2)$$

F_{R_Schw} = Schwallwiderstand (N)

b = Reifenbreite (mm)

v_R = Geschwindigkeit (km/h)

Auf Grund der geringen Fahrgeschwindigkeit des Versuchsträgers (15 km/h) ist in Begleitung einer sehr geringen Wasserhöhe von $0,5 < h < 1,0$ mm die zu leistende Wasserverdrängung gering. Eine Abschätzung des Effektes für den 385er Trailerreifen mittels **Gl. 4.2** [15] führt unter Ansatz einer Wasserhöhe von 0,8 mm auf einen Schwallwiderstand von 7,5 N für das einzelne Rad. Allein diese viermal anzusetzende Fahrwiderstandskomponente erzeugt somit vermutlich ca. 30 N Deichselkraft am Anhänger, woraus sich bei einem Gewicht von 18,5 t rein rechnerisch ein f_{RW} -Anteil von 0,165 % ergibt. Dieser zusätzliche Teilbeitrag – nur auf angenässter Fahrbahn generiert – ist ein integraler Bestandteil des Rad-Rollwiderstands bei Nässe und wird im Folgenden ohne Abzug in den Koeffizienten wiedergegeben.

Der Einfluss von Nässe auf den Rollwiderstand wurde mit beiden Trailerreifenvarianten untersucht, ohne dass wesentliche Unterschiede anzumerken wären. Exemplarisch für das beobachtete Verhalten ist der aus **Abbildung 4.12** hervorgehende geringe Fülldruckabbau, nachdem von der trockenen Fahrbahn auf den kühleren Nassabschnitt gewechselt worden war. Ebenso wie im Zustand ‘trocken‘ die umgebungsbedingte Fülldruckveränderung von 9,4 bar auf 9,5 bar nur einen kaum messbaren Rollwiderstandsanstieg zur Folge hatte (Ergebnis nicht dargestellt), kann auch bei Umkehrung des Trends auf nasser Fahrbahn dieser Effekt sich nicht intensiver entfalten.

Die in den Säulen-Darstellungen der **Abbildung 4.12** gezeigten Anstiege von 8% auf einer Asphaltdecke und 6,5% auf Betondecke lassen sich insofern nicht über den Fülldruckunterschied begründen. Der Fahrwiderstandsanstieg wird auch nicht über die durch das Trennmittel Wasser beeinflusste Adhäsion erklärt, vielmehr wird – neben dem Schwallwiderstand – ein als Folge der niedrigeren Reifentemperatur verstärkter Hystereseverlust als Urheber hierfür angenommen. Leider liegen keine Temperaturwerte für die Gürtelkante vor, deshalb kann hilfsweise nur die außen sensierte Schultertemperatur den Temperaturrückgang darlegen: Etwa 5°C.

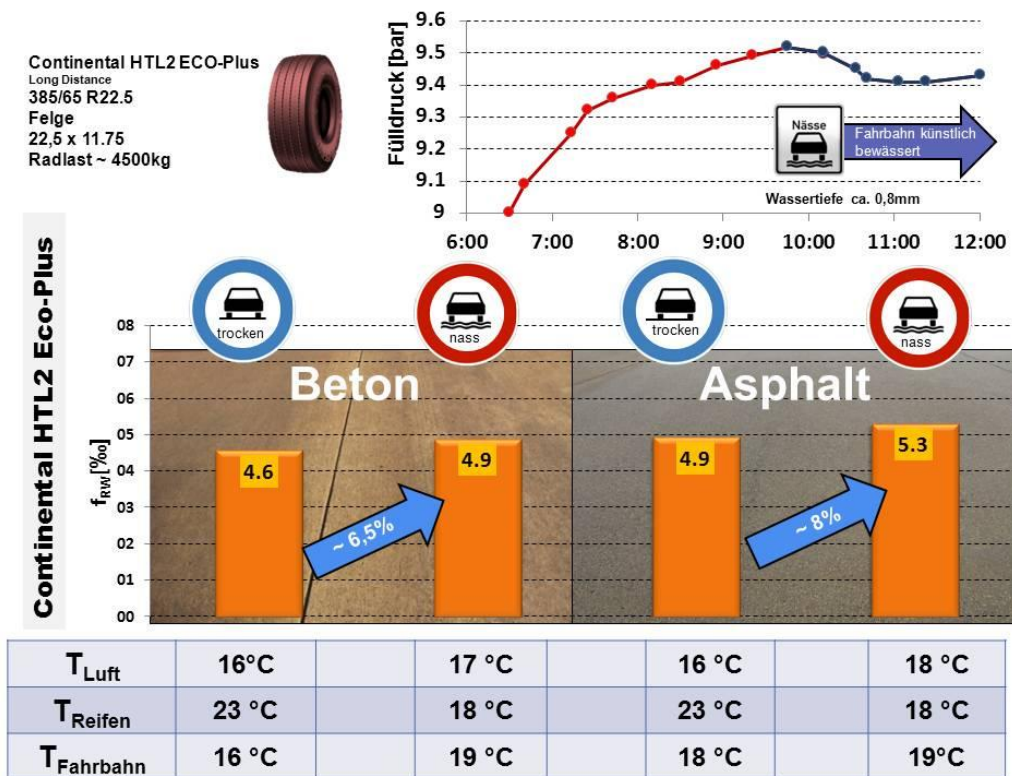


Abbildung 4.12: Einfluss von Nässe auf unterschiedlichen Fahrbahnbelägen

Unter Prüfstandsbedingungen würde eine entsprechende Raumtemperaturveränderung mit einer 3%-Korrektur belegt. Ein Anteil, der den Zuwachs von 6,5 % im Beispielfall 'Beton' (Abb. 4.12) schon sehr nahe kommt, wie in nachfolgender Bilanz sichtbar.

Basiswert Rad-Rollwiderstand 'trocken': 4,6 ‰

zzgl. Schwallwiderstand relativ: 0,165‰

zzgl. Temperaturmalus 3%: 0,138‰

Summenwert: 4,9‰

Für den demgegenüber um 1,5% höher ausgefallenen Anstieg des Fahrwiderstands auf einer weniger glatten Asphaltbahn kann aktuell noch keine triftige Begründung geliefert werden.

4.3.6 Fahrbahntextur

Es besteht ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen Fahrbahn-Makrorauigkeit und Reifen-Rollwiderstand. Diese elementare Eigenschaft wird durch Untersuchungen an Pkw-Reifen belegt, so auch kürzlich festgestellt an unterschiedlichen Varianten im internationalen Forschungsprojekt MIRIAM [http://miriam-co2.net/]. Offensichtlich hat der Reifenkontakt auf einer rauen Oberfläche einen vermehrten Energieverlust und damit höheren Bewegungswiderstand zur Folge.

Wie aber reagiert ein großer Nutzfahrzeugreifen auf Fahrbahnunebenheiten? Ist das Verhalten übertragbar? Dieser Rollwiderstandsaspekt stand in dem vorliegenden Projekt besonders im Fokus. Konzentriert auf den Trailerreifen der Dimension 385/65 R22.5 - mit typischem Rillenprofil - wurde einer Beantwortung dieser Frage exemplarisch nachgegangen, wofür insbesondere das Prüfgelände der IFSTTAR nahe Nantes mit seinen zahlreichen, verschiedenartigen Fahrbahnbelägen günstige Testvoraussetzungen bot.

Die Bandbreite der dort auf 9 Teilstrecken unter weitgehend ähnlichen Umgebungsbedingungen ermittelten Rollwiderstandskoeffizienten ist in **Abbildung 4.13** festgehalten. Das vordergründige Resümee dieser Versuchsreihe lautet: Erst bei auffällig rauer Fahrbahnoberfläche tritt ein signifikant höherer Rollwiderstand auf.

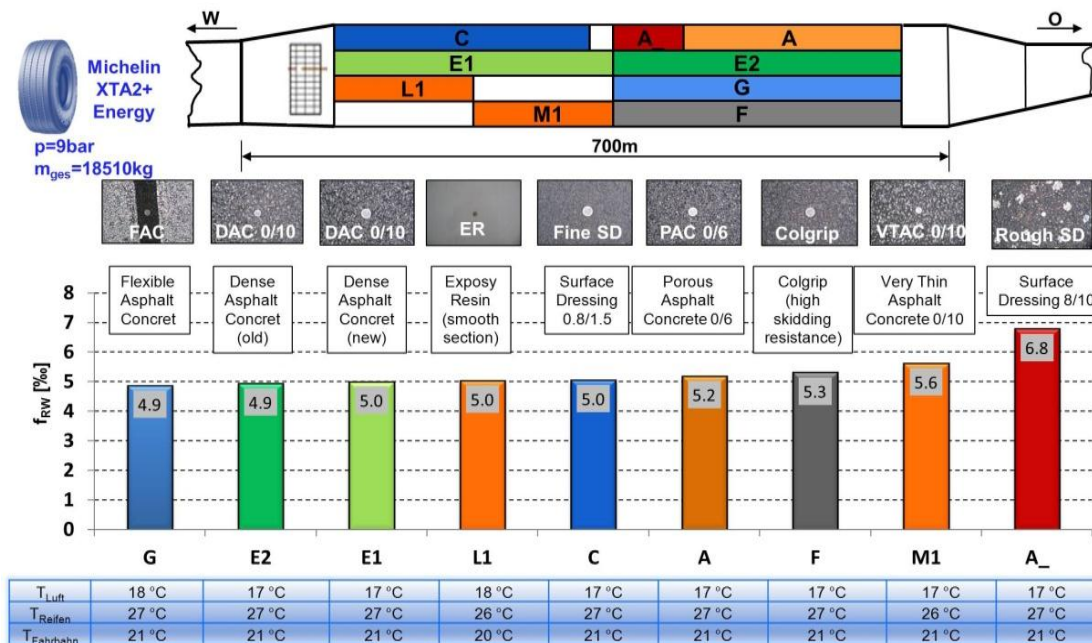


Abbildung 4.13: Textureinfluss

T_{Luft}	18 °C	17 °C	17 °C	18 °C	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C
T_{Reifen}	27 °C	27 °C	27 °C	26 °C	27 °C	27 °C	27 °C	26 °C	27 °C
T_{Fahrbahn}	21 °C	21 °C	21 °C	20 °C	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C

Wie **Abbildung 4.14** zeigt, gibt es für das Phänomen ‘Fahrbahntextur’ eine auch begrifflich definierte Einteilung in mehrere Kategorien. Technisches Unterscheidungsmerkmal ist dabei die Wellenlänge.

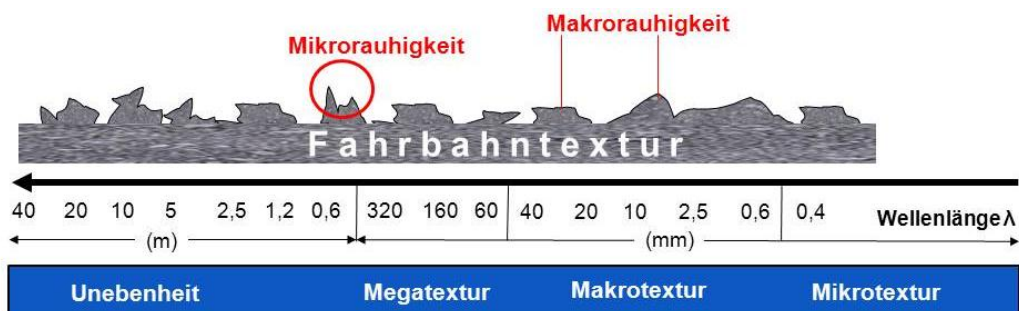


Abbildung 4.14: Texturklassifizierung [11]

Für eine Darstellung der Korrelation von Fahrbahntextur und Rollwiderstand stehen reale Unebenheitsprofile zur Verfügung, die mittels Laser-Profilometer mobil vor Ort aufgenommen wurden [**Abbildung 4.15**]. Neben einer Analyse der spektralen Zusammensetzung der großen Bandbreite überlagerter Texturwellenlängen, hat sich für spezifische Gegenüberstellungen insbesondere die sogenannte Mittlere Profiltiefe (MPD) als zentrale Texturkenngröße etabliert. Anders als beim Effektivwert berücksichtigt der heute üblicherweise dabei benutzte MPD-Wert (ISO 13473-5/2009) die am direkten Reifenkontakt tatsächlich beteiligte (obere) Zone in besserer Weise.

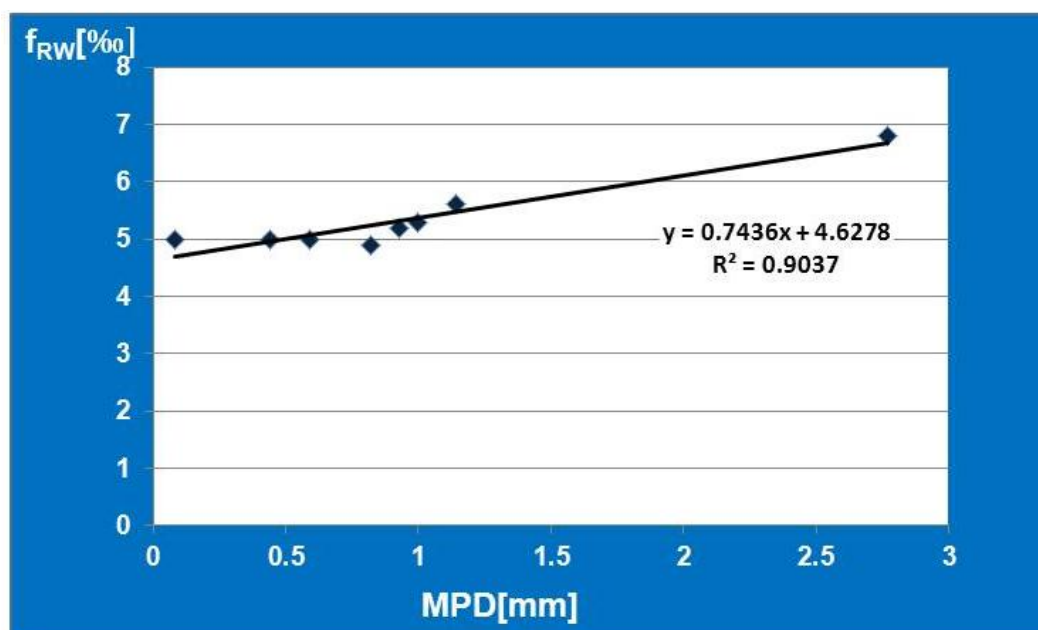


Abbildung 4.15: Korrelation zwischen MPD und f_{RW} [Zöller, BASt]

Die im aktuellen Fall festgestellte Korrelation zwischen den beiden Größen MPD und f_{RW} (**Abbildung 4.15**) zeigt den von Pkw-Reifenrollwiderstandsmessungen her bekannten Trend einer Rollwiderstandszunahme bei steigender Fahrbahnrauigkeit. Ob sich dieser exemplarische Zusammenhang allerdings über einen weiten Bereich tatsächlich in der hier beschriebenen Art und Weise (Regression mit Linearansatz!) darstellt, bleibt an dieser Stelle noch ungeklärt. Für eine eindeutige Bewertung mit entsprechend hoher statistischer Signifikanz reicht die zu geringe Zahl an ‘rauen’ Fahrbahnen mit MPD-Werten größer 1 mm nicht aus. Eine Verfügbarkeit hierfür in Frage kommender weiterer Fahrbahnen bestand in diesem Projektrahmen leider nicht.

Festzuhalten bleibt:

- I. *Ermittelte Tendenz: Je rauer die Oberfläche, desto höher der Rad-Rollwiderstand.*
- II. *Zwischen glattester und rauester Fahrbahn (IFSTTAR-Gelände) ein Anstieg von 40% für F_{RW}*
- III. *Makrotextur von geringerem Einflußgrad als Megatextur auf C3-Reifen-Rollwiderstand*
- IV. *Korrelation als lineare Regression mit großer Ähnlichkeit zu Pkw-Erkenntnissen [10]*

Zwar wurde zwischen der glattesten und rauesten Fahrbahnvariante eine gravierend hohe Fahrwiderstandsänderung von 40% registriert, jedoch bezeichnet ‘rau’ hier eine extreme Textur. Auf den ersten Blick scheint die Beeinflussung bei dieser Raddimension viel geringer als bei den kleineren Reifen der Kategorie Pkw zu sein. Im Vergleich zum Pkw-Reifen [12], wo eine MPD-Änderung von 0,5 auf 1,5 mm eine f_{RW} -Veränderung von ca. 1,8 Promille zur Folge hätte, ergäbe sich für das untersuchte C3-Exemplar ein Delta von nur 0,74 Promille. Bei einer Interpretation dieser unterschiedlich hohen Eckdaten muss allerdings berücksichtigt werden, dass das Grundniveau des Pkw-Reifenrollwiderstands etwa doppelt so hoch anzusetzen ist. Somit ist festzuhalten, dass sich, wie unter IV. notiert, die graduellen Auswirkungen – zumindest in diesem Fallbeispiel – durchaus ähneln:

PKW: 1,8 Promille / 10 Promille = 18% Änderung

LKW: 0,74 Promille / 5 Promille = 15% Änderung

Der graduelle Einfluß der Fahrbahntextur auf den Rad-Rollwiderstand ist vermutlich mit großen Reifen deutlich schwächer ausgeprägt.

4.3.7 Fahrbahnkrümmung

Wie bereits in Kapitel 2.4 Prüfmethode vorgestellt, sind für die anerkannte, standardisierte Rollwiderstandsprüfung auf einer Außentrommelanlage Werte für den Trommeldurchmesser spezifiziert. Nach ISO 28580 wird dabei für Lkw- und Busreifen ein Mindestwert von 1,7m definiert; übrigens identisch zu den Anforderungen bei Pkw-Reifen. Auch in der Regelung ISO 18164 – Messverfahren für Transporter, Lkw und Busse – ist dieser von US-Ausstattungen geprägte Wert als Mindestdurchmesser angegeben, allerdings ist zudem auch eine Obergrenze von 3m festgelegt.

Mit dem Wissen, dass der Krümmungsradius des Reifenkontaktpartners ‘Trommel‘ den Reifen-Rollwiderstand maßgeblich beeinflusst, wird im Sinne einer universellen Vergleichbarkeit das Prüfstandsergebnis auf einen spezifizierten Referenzdurchmesser bezogen, der z.B. in ISO 28580 mit 2m angegeben ist. International bekannt unter der Bezeichnung ‘drum diameter correction‘ wird zu diesem Zweck die zuvor unter (Gl. 2.2) angegebene Formel verwendet. Zwar als Korrekturformel bezeichnet, handelt es sich im physikalischen Sinne hierbei um ein Übertragungsglied, welches den Krümmungseinfluss auf den Rollwiderstand quantitativ als variablen Faktor beschreibt.

$$K_{Flat} = \sqrt{\frac{R_1}{R_1 + r_T}} \tag{4.3}$$

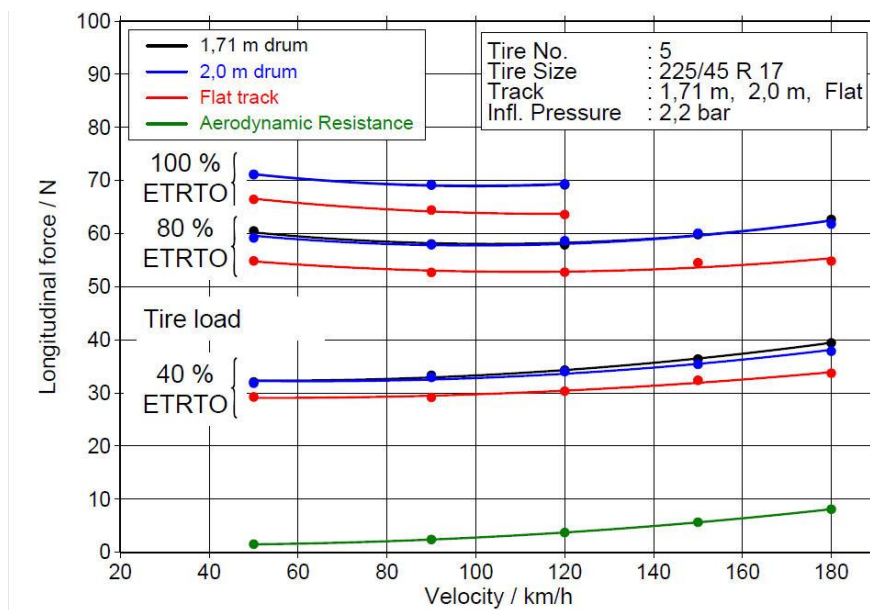


Abbildung 4.16: Einfluss Fahrbahnkrümmung auf Rollwiderstand (PKW) [7]

Ob der anerkannte Korrekturansatz allerdings auch dann noch zutreffend ist, wenn der Trommelradius R_2 in (Gl. 2.2) in Bezug auf reale, ebene Fahrbahnen wie in Gl. 4.3 bis auf den Wert 'unendlich' extrapoliert wird, diese interessierende Frage können vorzugsweise Gegenüberstellungen auf der Basis hierfür geeigneter Flat-Track-Anlagen beantworten, was allerdings nach Wissen der Autoren bisher nur in der Kategorie 'Pkw-Reifen' technisch möglich ist.

Beispielhaft wird in **Abbildung 4.16** ein Vergleich vorgestellt, bei dem Rollwiderstände eines Pkw-Reifens auf 2 Trommelgrößen und auch einer Flachbahn untersucht wurden. Neben dem Last- und Geschwindigkeitseinfluss lassen sich ausgeprägte Differenzen (Abstände) zwischen den Graphen der flachen und gekrümmten 'Fahrbahnen' erkennen. Erwartungsgemäß liegt das auf einer Flachbahn (Flat-track) festgestellte Niveau deutlich unterhalb der auf den Trommeln gemessenen Werte.

Ausgehend vom Trommel-Prüfstandsresultat (**Abbildung 4.16**) würde eine Konversion auf reale, ebene Fahrbahnverhältnisse nach Gl. 4.3 zu einer Minderung von 12% (Annahme $r_T=0,3m$) führen; eine Quote, die sich offensichtlich nicht ganz in dieser Höhe beim Pkw-Reifen eingestellt hat.

Wie stellt sich der quantitative Zusammenhang von Rollwiderstand und Fahrbahnkrümmung dar, wenn die hier im Blickfeld stehenden (großen) Reifen der Klasse C3 betrachtet werden?







	 $\varnothing 2,7m$	 $\varnothing 2m$	Bedingungen  385/ 65 R22,5 Trailerreifen Vollprofil 25 °C 85% Last 15 km/h glatt (Stahl) <small>v abweichend zu ISO 28580 deshalb C_R^*</small>
Basis	4,32 ‰	4,68 ‰	
Bezug $\varnothing 2m$	$4,32 ‰ \times 1,046$ $= 4,52 ‰$ C_R^*	4,68 ‰ C_R^*	
Prognose Flat 	$4,52 ‰ \times 0,816$ 3,69 ‰	$4,68 \times 0,816$ 3,82 ‰	
 Outdoor Beton	3,9 ‰ incl. Radlagerverluste, aerodynamischer Widerstand bei $v=15km/h$		~24 °C ~100% Last 15 km/h eben (Beton) 

Abbildung 4.17: Fahrbahnkrümmungseinfluss – Reifenkategorie C3

Dieser Frage wurde in diesem Projekt unter Einbeziehung der ‘Outdoor‘-Methode und 2 unterschiedlich großer Trommelmaschinen nachgegangen. **Abbildung 4.17** veranschaulicht die Schritte einer Gegenüberstellung, die als exemplarisch für diese Reifendimension angesehen werden darf. Am Beispiel eines Trailerreifenprodukts dokumentiert die Darstellung eine auf Gl. 4.3 basierende Prognose der Konversion auf den Zustand ‘flach‘: $c_R = 3,69 \text{ ‰}$ bzw. $3,82 \text{ ‰}$. Ihren Ursprung haben diese Zahlenwerte - eigentlich müssten sie identisch sein - in Basismessungen auf unterschiedlich großen Trommelanlagen. Die Unterschiede der anschließend auf $\varnothing 2\text{m}$ normierten Werte sollten indes nicht überbewertet werden, die Zeitpunkte der Messung lagen unvermeidbar auseinander.

Tatsächlich gemessen, auf einer sehr ebenen Betondecke, wurden in praxi generell höhere Widerstandsbeiwerte als die genannten $3,69$ und $3,82 \text{ ‰}$. Dieses prognostizierte niedrige Niveau wurde ‘outdoor‘ in keinem Fall erreicht.

Der in der Gegenüberstellung als Pendant angesetzte Realwert von $3,9 \text{ ‰}$ ist in der Tat im Fahrversuch (15 km/h ; Zustand Vollast) aufgetreten, allerdings ist dieser Minimumwert nur in Einzelfällen unter besonderen Bedingungen festgestellt worden:

- *unnachgiebige Fahrbahn*
- *ebene bzw. glatte Oberfläche*
- *windfrei*
- *Temperaturniveau “sehr warm“ (Fahrbahn, Reifenschulter, Umgebungsluft)*

Von diesen 4 Parametern ist die Temperatursituation am schwierigsten zu objektivieren; darauf wurde bereits eingegangen und auch im nachfolgenden Kapitel rückt dieser bemerkenswert zentrale Aspekt in den Mittelpunkt.

4.3.8 Temperatur(en)

Ein grundlegender Vorteil von Indoor-Reifentests ist die Unabhängigkeit von Wettereinflüssen. Hinzu kommt die mögliche Steuerbarkeit konstanter Prüfbedingungen. Es sind bekanntlich wichtige Voraussetzungen, um Testergebnisse mit hoher Wiederholqualität zu generieren. Das Standard-Prüfverfahren (ISO 28580) definiert als Sollwert eine Raumlufthtemperatur von 25°C, toleriert werden Abweichungen von 5°C nach oben und unten. Zwar ist damit die Temperatur der ‘Ersatzfahrbahn’ (Trommeloberfläche) nur ungefähr festgelegt - sie ergibt sich erst über den Prozess - jedoch besteht durch die vorgeschriebene langandauernde Vorkonditionierung im geschlossenen Raum eine insgesamt weitgehend stabile Temperatursituation. Anders als in der Übergangsphase liegen bei Erreichen des stationären Betriebspunktes (Meßphase) stationäre Wärmeströme vor; denn sowohl der Reifen selbst als auch der Kontaktpartner ‘*Stahltrommel*’ weisen dann eine fixe Temperaturverteilung auf – sie stehen im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung.

Die sich während des ‘Warmlaufs’ unter definierten Bedingungen im/am Reifenmaterial einstellenden Temperaturen fallen erfahrungsgemäß lokal stark unterschiedlich aus. In jedem Fall handelt es sich bei den Werten um ein produktspezifisches, betriebspunktabhängiges Resultat – mit individueller Temperaturverteilung und jeweils typischer Temperatureausprägung.

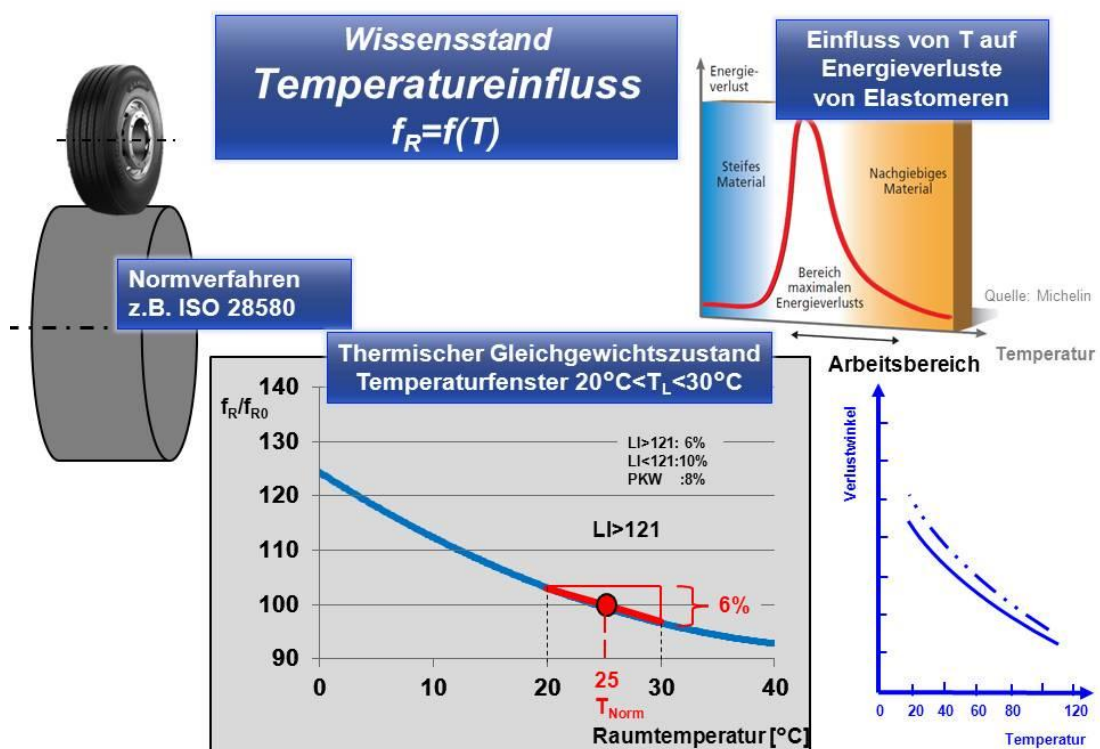


Abbildung 4.18: Wissensstand Temperatureinfluss – Korrekturfestlegung (u.a. ISO)

In **Abbildung 4.18** ist eine Temperatur-Charakteristik des Reifen-Rollwiderstands als elementares Beispiel für den bekannten Wissensstand wiedergegeben. Die qualitative Beschreibung bezieht sich auf den stationären Betriebsfall, aufgetragen über einer variablen Umgebungstemperatur. Urheber des progressiven Anstiegs bei niedrigen Temperaturwerten ist eine bekannte Eigenschaft visco-elastischer Materialien: Energiedissipation durch Dämpfung. Dieser Effekt tritt bei dynamischer Verformung von Elastomeren auf. Das Verhalten bedeutet Energieverlust, der graduell von der Verformungsfrequenz und der Stofftemperatur abhängig ist. Den letzteren Aspekt verdeutlicht das in **Abbildung 4.18** eingefügte Verlustwinkel-Diagramm. Darin dokumentiert sich analog zum Rollwiderstandsverlauf der stark nichtlineare Temperaturgang der Dämpfungsarbeit.

Die in **Abbildung 4.18** eingeblendeten Temperaturkorrekturwert-Angaben bringen den Stand der Technik auf Grundlage aktueller Prüfstandards wie ISO 28580 zum Ausdruck. In differenzierter Weise werden Abweichungen von der Raumlufttemperatur reifenspezifisch gewichtet, so beispielsweise im Falle eines C3-Reifens mit einem Faktor von $0,6\%/^{\circ}\text{C}$; dieser Wert gilt jedoch nur, wenn der Lastindex größer 121 ist. Der lineare Korrekturansatz ist in allen 3 Kategorien ausschließlich für das angegebene enge Temperaturfenster von $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$ zulässig – siehe Normbedingungen für Labortests.

Wie aber entwickelt sich der Rollwiderstand quantitativ bei Umgebungslufttemperaturen außerhalb dieses Fensters im Einzelfall tatsächlich?

Im Rahmen der hier berichteten Untersuchung bestand das Bestreben, diesen Zusammenhang für C3-Reifen im Laborversuch exemplarisch grundlegend zu klären. Da sich bei Nachfragen im In- und benachbarten Ausland jedoch keine verfügbare, hierfür geeignete technische Maschinenausstattung ausfindig machen ließ, stehen ersatzweise im Folgenden nur eigene empirische Outdoor-Testerfahrten im Blickfeld der weiteren Betrachtungen. Es handelt sich hierbei um spezielle Beobachtungen an einerseits sehr warmen, andererseits ausgesucht kühlen Versuchstagen, welche erste quantitative Antworten auf die ‘reale‘ Temperaturabhängigkeit einzelner Reifenmuster geben. Zudem weisen diese Untersuchungen aber auch auf das Dilemma einer äußerst schwierigen Berücksichtigung von den in ‘freier Natur‘ multipel überlagerten, nicht immer konstanten thermischen Einflussfaktoren hin.

Abbildung 4.19 zeigt ein typisches Beispiel für das im ‘Outdoor‘-Fahrversuch bei niedriger Umgebungs- und auch Bodentemperatur festgestellte Reifenverhalten. Es handelt sich hierbei um eine Langzeitmessung mit konstanter Fahrgeschwindigkeit und permanenter Messwertaufzeichnung über die Dauer eines Tages. Offensichtlich ist der thermische Ausgleich hier nicht wie zuvor in Kap. 4.1 beschrieben in einer Stunde erreicht, vielmehr liegt ein thermischer Gleichgewichtszustand erst verzögert nach über drei Stunden vor. Nach dem transienten Verhalten beginnt ein quasi stationärer Zustand; leicht erkennbar am nun annähernd konstanten Verlauf des Rollwiderstands. Analog

hierzu weisen die an der Gürtelkante und auch außen an der Schulter ermittelten Temperaturwerte einen nahezu konstanten Level auf. Die Einbrüche im Kurvenverlauf der Gürteltemperatur sind auf kurze Stopps zum Zwecke einer regelmäßigen Gerätekontrolle zurückzuführen.

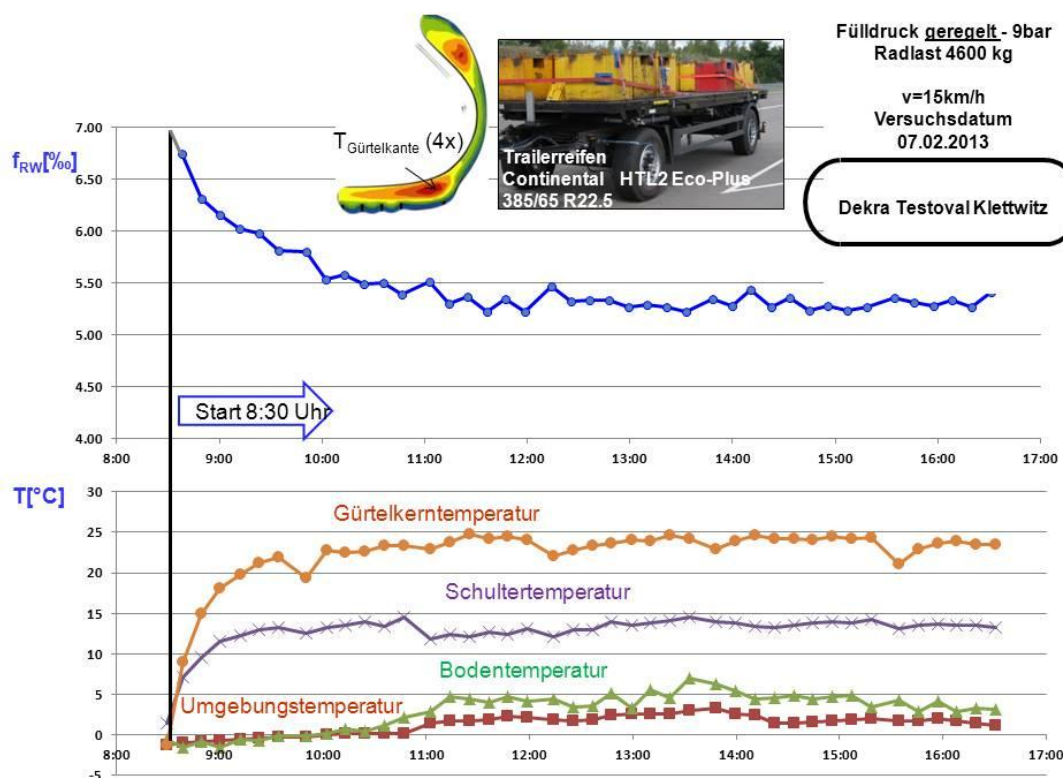


Abbildung 4.19: Rollwiderstandsmessungen (kalt) in Klettwitz, Februar 2013

Auf derselben Ovalbahn, welche mit einer Asphalt-Fahrbahndecke ausgestattet ist, wurden mit identischem Reifensatz Vergleichsmessungen in der warmen Jahreszeit durchgeführt, **Abbildung 4.20**. Ebenso, wie zuvor dargestellt, war auch hier beim Rollwiderstand erst allmählich nach über 3 Stunden Fahrzeit ein quasi stationärer Zustand erreicht, was in diesem Fall eine Folge der nicht konstanten, sich zeitlich stark ändernden äußeren Temperaturbedingungen ist. Mit Erreichen einer Gürtelkantentemperatur von ca. 50°C verändert sich der Rollwiderstand dann allerdings nur noch marginal. Er beharrt auf diesem Level trotz weiterer Zunahme der Gürteltemperatur. Das für diesen Reifen auch aus anderen Tests mit Luftdruckregelung her bekannte Tiefstniveau des Rollwiderstandsbeiwertes von 4,06 Promille wird erreicht und trotz noch weiter steigender Temperaturen jedoch nicht mehr unterschritten.

Stellvertretend für beide untersuchten Trailerreifen-Produkte der Dimension 385/65 R22.5 werden in diesem Kapitel auszugsweise nur diejenigen Rollwiderstands-

Temperatur-Zusammenhänge vorgestellt, die auf Messungen mit dem Continental-Reifensatz beruhen. Weil keine grundlegenden Unterschiede festgestellt wurden, insbesondere aber auf Grund der zusätzlichen Informationstiefe durch die technische Präparation mit integrierten Temperatursensoren (nur Continental) ist dies erlaubt.

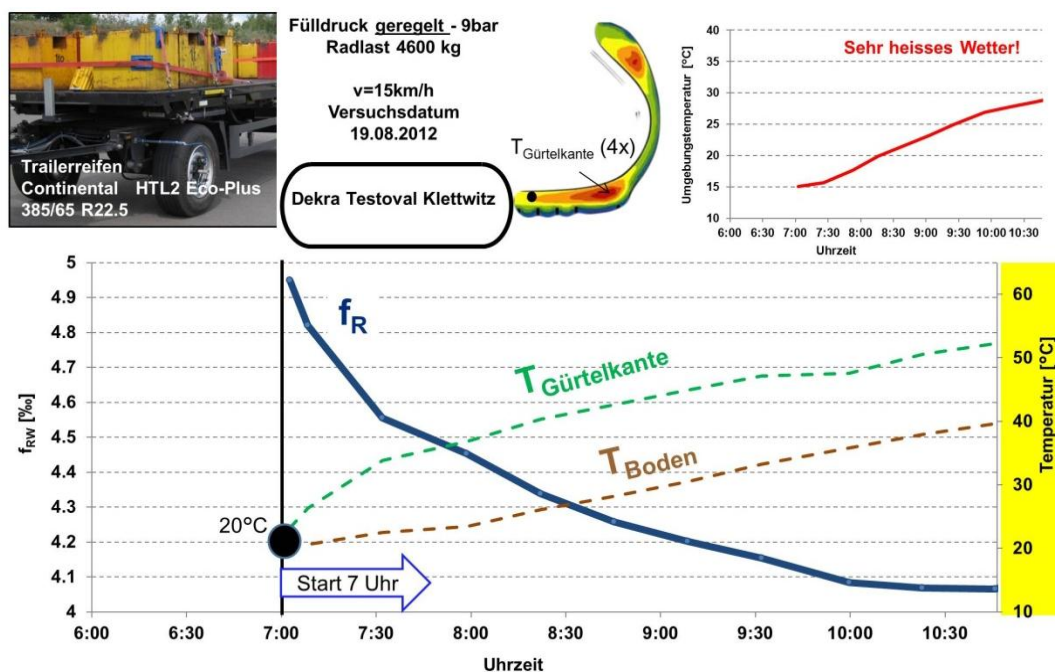


Abbildung 4.20: Rollwiderstandsmessung in Klettwitz, August 2012

Anders als das aufschlussreiche Bild, welches die stetigen, degressiven Rollwiderstandsverläufe im transienten ‘Einroll-Zustand‘ bei jeder Messreihe zeichnen, ergeben sich aus der stationären Versuchsphase lediglich Einzelwerte, die den Zusammenhang zwischen den Temperaturbedingungen und dem punktuellen Rollwiderstand nur bruchstückhaft wiedergeben, siehe **Abbildung 4.21**. Die große Lücke bei den angetroffenen Umgebungstemperaturen (Luft, Boden) und die somit auf die Skalenränder konzentrierte geringe Fallzahl lassen keine vertrauenswürdige Formulierung eines mathematischen Zusammenhangs zu. Nicht zielführend, so zeigt sich auch hier, ist es, den ‘outdoor‘ gemessenen Rollwiderstand gedanklich nur monokausal mit der Lufttemperatur zu verknüpfen – wie es die ‘Indoor-Prüfmethode‘ rechtfertigt. Gleiches gilt für die Bodentemperatur als Variable. Auch mit ihr allein ist keine geeignete Korrelation des Rollwiderstands gerechtfertigt. Die insgesamt mit der Methode der Kerntemperaturmessung (Messort: Gürtelkante) gemachten Erfahrungen stellen in Aussicht, dass über diese Messgröße in geeigneter Weise ein schlüssiger Zusammenhang dargelegt werden kann.

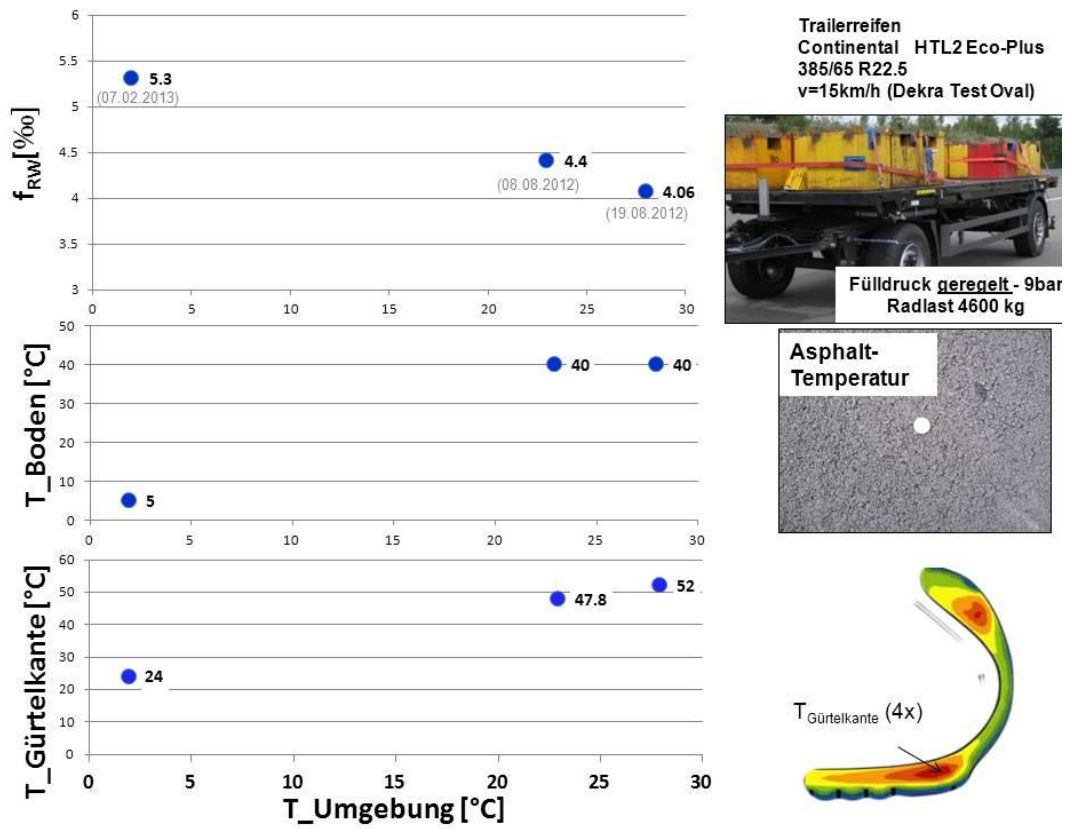


Abbildung 4.21: Temperaturabhängigkeit Rollwiderstand ‘Outdoor’

4.3.9 Fahrbahnnachgiebigkeit

Zwischen dem Rollwiderstand eines Fahrzeugs und der Fahrbahnausführung besteht nachweislich eine physikalische Abhängigkeit. Nicht nur die Fahrbahnunebenheit oder, wie bereits beschrieben, die Oberflächentextur treten als Strukturparameter hervor - von übergeordneter, elementarer Bedeutung ist die Fahrbahnfestigkeit. Genauer ausgedrückt ist es die *Steifigkeit*. Normalerweise wird für die in Deutschland üblichen festen Verkehrsstraßen diese Eigenschaft unter Rollwiderstandsaspekten als “starr“ angenommen. Ein Begriff, der eine vollständig unnachgiebige Fahrbahn bezeichnet, bei der Spurbildung als Folge plastischer Verformung ebenso ausgeschlossen ist, wie selbst auch elastische Verformungen in und unter der Deckschicht als nicht existent bzw. unwirksam gelten.

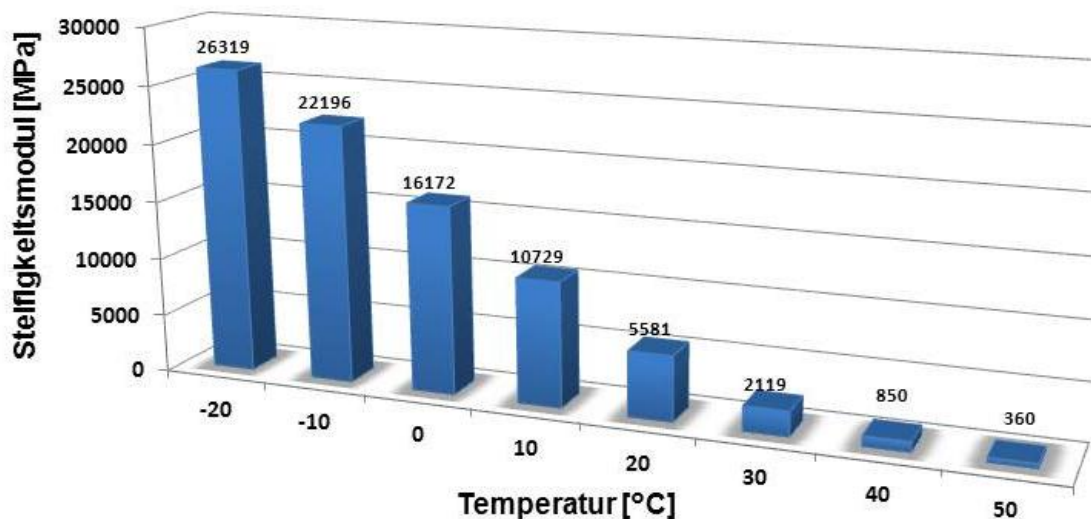


Abbildung 4.22: Steifigkeitsmodul vs. Temperatur der “Asphalt-Deckschicht“ [13]

Ist jedoch die auf jeden Fall real vorhandene Elastizität einer Asphalt-Fahrbahndecke – siehe **Abbildung 4.22**– in der Tat zu vernachlässigen? Ist die vorhandene Temperaturabhängigkeit nicht zumindest bei hohen Bodentemperaturen relevant? In Verbindung mit der erhöhten Bodenpressung eines C3-Reifens kann eine Auswirkung auf den Radwiderstand nicht von vornherein ausgeschlossen werden, so die hier aufgestellte These.

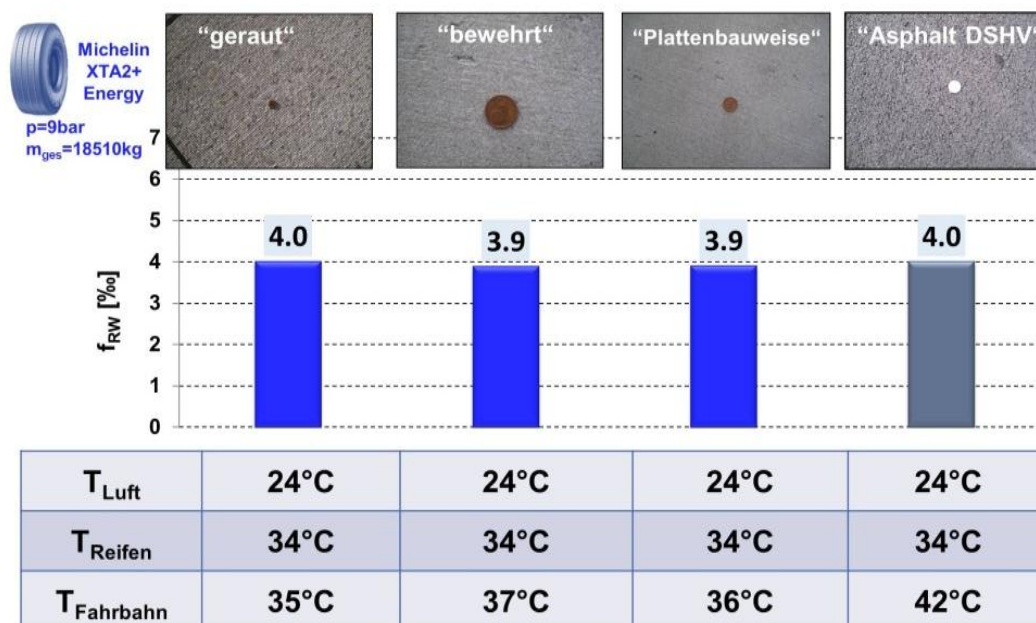


Abbildung 4.23: Rollwiderstandsergebnisse auf unterschiedlichen Untergründen (Forstinning)

In **Abbildung 4.23** sind vier Ergebnisse von Rollwiderstandsmessungen dargestellt, die auf 3 Fahrbahnen mit Betondecke und einer als Dünnschichtasphalt (Betonunterbau) aufgetragenen Decke stattgefunden haben. Anders als die bekannte Segmentbauweise – mit nachträglich geschnittenen Dehnungsfugen - ist eine der Betondecken (Joint plain) nicht segmentiert, wobei gegen ein Aufreißen mittels einer aufwendigen Stahlbewehrung Sorge getragen wird. Unter Würdigung einer Genauigkeit des Messverfahrens von maximal ein Zehntel Promille erlaubt die Gegenüberstellung nur eine Schlußfolgerung:

Hier vorhandene unterschiedliche Fahrbahnsteifigkeiten haben sich nicht signifikant im Rollwiderstand niedergeschlagen.

Dieser praktischen Erfahrung stehen die Ergebnisse eines Sonderexperiments bei warmen Sommerwetter gegenüber, bei dem eine als Oval angelegte Prüfgeländefahrbahn – mit konventioneller Asphaltdecke – vom frühen Morgen bis zum Abend fortlaufend befahren wurde; mit dem 18t-Messanhänger im Schlepp der Zugmaschine und der für das Verfahren typischen Fahrgeschwindigkeit von 15km/h. Zustandsangaben zu Radlast, Fülldruck, Temperaturverläufen etc. sind in der Legende von **Abbildung 4.24** festgehalten. Aus der Darstellung des Rad-Rollwiderstands geht hervor, dass erst allmählich eine Stabilisierung des stetig fallenden Rollwiderstandsniveaus eingetreten ist. Trotz der sich von Beginn an ändernden, deutlich inkonstanten Temperaturbedingungen ist auch hier das von 'beständigen Temperaturbedingungen' anderer Messreihen her bekannte Tiefstniveau von ca. 4 Promille erneut reproduziert worden.

Als besondere Auffälligkeit in diesem Diagramm sticht die Trendumkehr gegen 11:00 Uhr ins Auge, der Rad-Rollwiderstand steigt nun (unerwartet) kontinuierlich an. Diese Entwicklung verläuft analog zu einer bis auf über 50°C ansteigenden Fahrbahntemperatur! Die gut erkennbare Umkehrschwelle liegt bei einer Fahrbahntemperatur von knapp 40°C, wo bereits ein stark reduzierter Steifigkeitsmodul vorliegen kann, wie in **Abbildung 4.22** gezeigt. Auch die Frage, warum der Rad-Rollwiderstand in einem zweiten Umkehrpunkt schließlich einen gegenteiligen Trend einschlägt, läßt sich zum aktuellen Zeitpunkt nur ohne Nachweis mit einer Vermutung beantworten. Als These steht hierfür die durchaus begründete Annahme im Raum, dass sich die Steifigkeit der Deckschicht in Verbindung mit einer deutlich reduzierten Sonneneinstrahlung inzwischen wieder erhöht hat.

Für eine Interpretation der hier vorgestellten Ergebnisse ist der Hinweis angebracht, dass das Experiment an einem extrem heißen Sommertag stattgefunden hat. Bei Wiederholungstests auf dieser Asphaltdecke mit Fahrbahntemperaturen von weniger als 40°C ist die hier vorgefundene Abhängigkeit des Rad-Rollwiderstands keinesfalls in dieser exemplarischen Art und Weise feststellbar gewesen.

Die insbesondere von der Temperatur in der Fahrbahndecke geprägte Fahrbahnsteifigkeit darf bei Rollwiderstandsbetrachtungen offensichtlich im Fall des großen, entsprechend lasttragenden C3-Reifens nicht von vornherein als grundsätzlich vernachlässigbare Größe angesehen werden!

Der unter speziellen Umgebungsbedingungen in diesem Projekt festgestellte Zuwachs an Rad-Rollwiderstand (Trailerreifen) läßt sich auf über 16 % beziffern, ausgelöst durch Fahrbahnnachgiebigkeit.

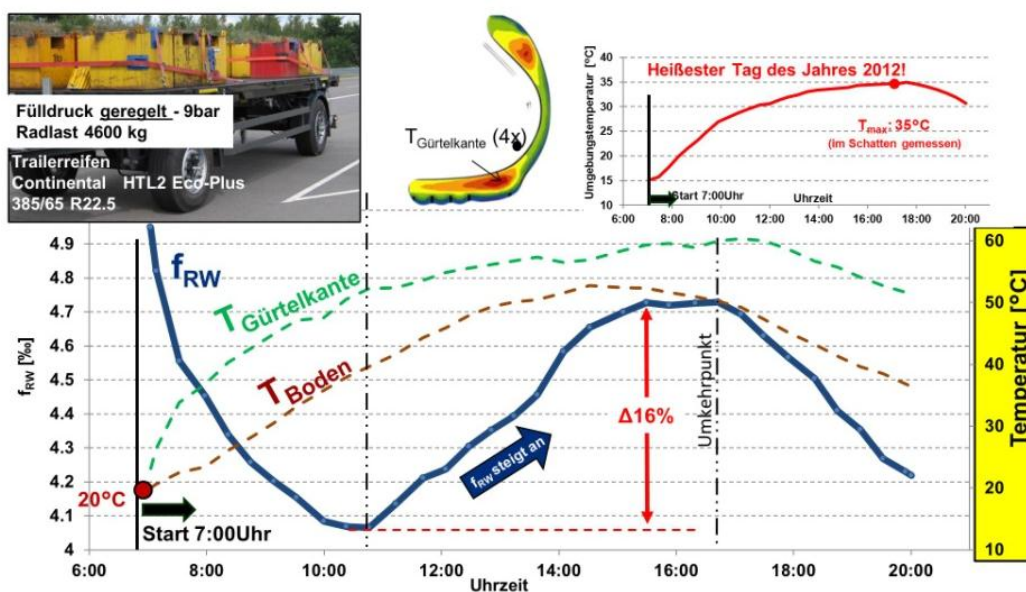


Abbildung 4.24: Umkehreffekt Rollwiderstand bei hohen Asphalttemperaturen

4.3.10 Reifenbauart

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen erkennbar, standen zwei verschiedene Trailerreifen in üblichem Rillenprofildesign im Zentrum der Untersuchung von Rollwiderstandsabhängigkeiten. Zusätzlich wurde jedoch auch stichprobenartig der Frage nachgegangen, ob das von Antriebsreifen mit Block-/Klotzprofil her bekannte Phänomen eines höheren Rollwiderstands sich ebenfalls auf der realen Straße wiederfindet. Für diese Klärungsabsicht wurde der Messanhänger nacheinander mit zwei Varianten von Antriebsreifen ausgerüstet:

- Einzelreifen 495/45 R22.5 (wide base)
- Zwillingsreifen 315/70 R22.5

Es handelt sich um Neureifen – ergo Reifen mit voller Profilhöhe – welche mit 9t Achslast und angepasstem Fülldruck betrieben wurden; unter den bestehenden technischen Bedingungen natürlich nur im Betriebszustand ‘freirollend‘.

Ergebnisse Rollwiderstand Supersingle vs. Zwilling

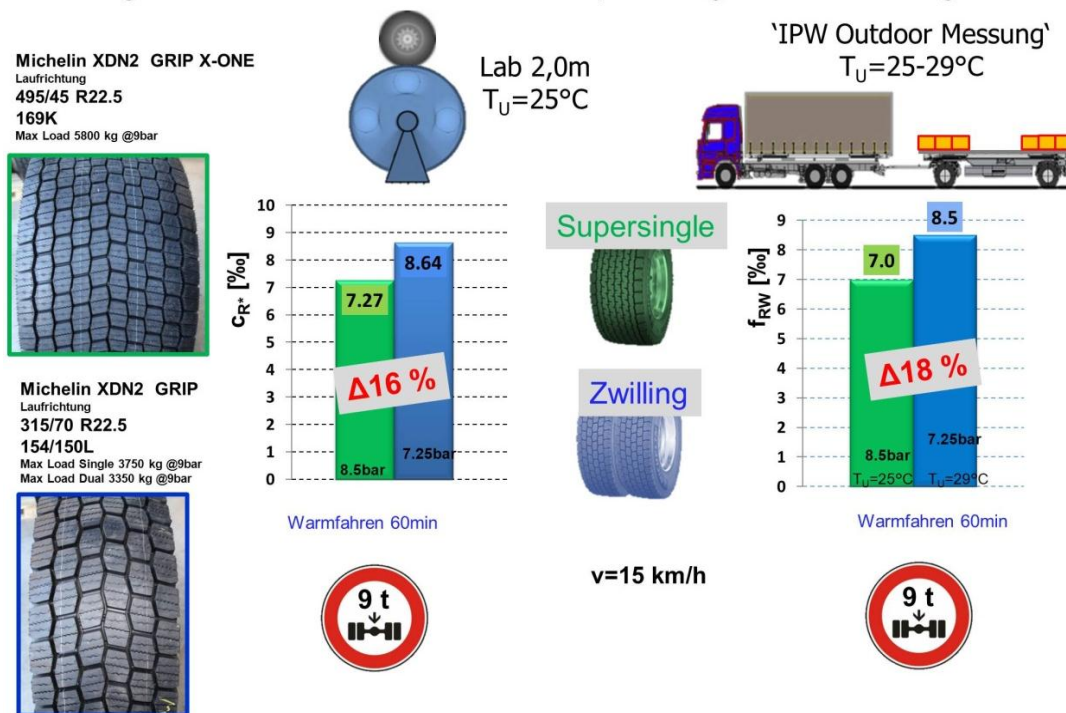


Abbildung 4.25: Rollwiderstand Indoor und Outdoor - Gegenüberstellung Zwillingsreifen vs. “Wide-Base Reifen“

Beim zuvor durchgeführten Rollwiderstands-Ranking auf dem ‘Indoor‘-Prüfstand mit glatter Stahltrommel, **Abbildung 4.25**, hatte der breite Einzelreifen die von ihm erwarteten Vorteile eindeutig unter Beweis gestellt; das Ergebnis: 16% weniger Rollwiderstand als die konkurrierende Zwillingsvariante. Das Rollwiderstandsniveau liegt pas-

send zu der eingangs gemachten Annahme mit Werten von mehr als 7 Promille deutlich über den Trailerreifen.

Aus den Outdoor-Resultaten, innerhalb der Gegenüberstellung von **Abbildung 4.25**, ist zu entnehmen, dass die bei gut vergleichbar warmer Wetterlage (T_L 25-29°C) festgestellten Rollwiderstände jeweils niedriger angesiedelt sind als die auf dem Prüfstand ermittelten. Auch der Test auf realer, in üblicher Form rauer Fahrbahnoberfläche spiegelt den geringeren Rollwiderstand des breiten Einzelreifens wider. Ein Rating zwischen beiden Reifenmustern zeigt bei einer Differenz von 18% nahezu den gleichen Deltabetrag wie bei den Prüfstandsergebnissen.

4.3.11 Spurgeometrie

Bei der standardisierten Rollwiderstandsprüfung, z.B. nach ISO 28580, stehen Radmittelebene und Trommelebene parallel zueinander. Demzufolge rollt der Reifen per Definition nicht nur sturzfrei, sondern auch mit einem Spurwinkelwert von 0°; was gleichbedeutend mit einer Fortbewegung ist, die ohne Reifenschräglauf erfolgt. Dieser Teil der Spezifikation hat zur Absicht, von außen aufgezwungene Reifenseitenkräfte als verfälschendes Element auszuschließen. Auf die reifenimmanenten, abplattungsbedingten Seitenkräfte (Plysteer, Konussteer) wird kein Einfluss genommen, diese Phänomene sind mehr oder weniger stark elementar beteiligt.

Gegenüber dem Seitenkraftaufbau aus Radsturz sind die aus geringen Schräglaufwinkeln resultierenden lateralen Kräfte zwischen Fahrbahn und Reifen um rund eine Zehnerpotenz größer. Ein Grund, weshalb der Schräglauf für den aus der Seitenkraftlängskomponente erzeugten Fahrzeug-Rollwiderstand den erheblich stärkeren Einflussfaktor darstellt.

Die in Nutzfahrzeugen vom Hersteller festgelegten Spurgeometriewerte entsprechen nicht in zwingender Weise auch der im Transportalltag anzutreffenden Situation. Aus verschiedenen Gründen sind Einstellungsabweichungen von vorgegebenen Toleranzfeldern möglich, was teilweise erst durch Sichtung eines ungewöhnlichen Reifenverschleißzustands bemerkt wird.

In strengem Sinn der reinen Lehre sind der sogenannte Spurwiderstand und ebenso auch der Reifen-Rollwiderstand nur Komponenten des Radwiderstands. Vereinfachend wird häufig dennoch beides vermengt und insgesamt von Rollwiderstand gesprochen, was irritierend sein kann.

Der Spurwiderstand lässt sich rechnerisch leicht prognostizieren, wenn für den beteiligten Reifen die lastabhängige Schräglauftiefigkeit (cornering stiffness) bekannt ist, siehe **Abbildung 4.26**. Eine einfache Betrachtungsweise wird im Folgenden vorausgesetzt, d.h. Nullseitenkräfte finden keinen Niederschlag.

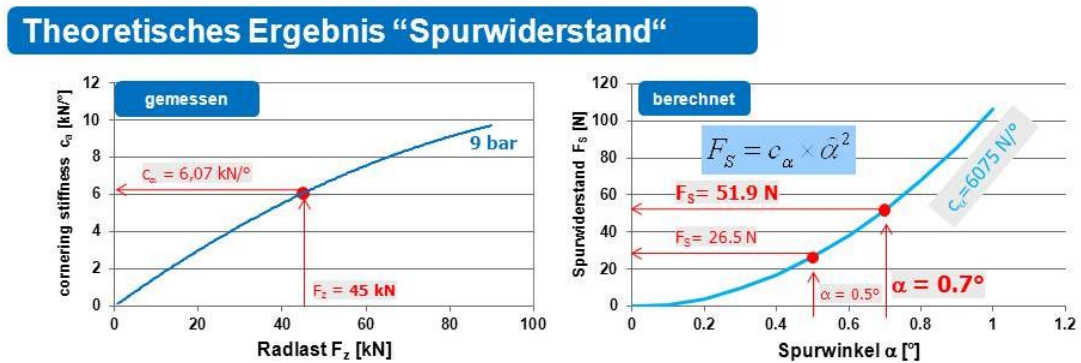


Abbildung 4.26: Zusammenhang von Spurwinkel und Spurwiderstand

Der über dem Einzelspurwinkel aufgetragene Spurwiderstand steigt auf Grund der quadratischen Abhängigkeit anfangs nur gering zunehmend, später überproportional stark an. Der progressive Verlauf (**Abbildung 4.26**) weist für das einzelne Rad bei $\alpha = 0,7^\circ$ einen Wert von ca. 52 N aus. Ein Betrag, der in Relation zu einem beispielhaft angenommenen Reifen-Rollwiderstand von 180 N weniger als 30% Anteil ausmacht. Wenngleich der markierte Radspurwert von 0,7 Winkelgrad (in Winkelminuten: $42'$) für die hier betrachtete 9t-Anhängerstarrachse eine im realen Verkehrsalltag nur unwahrscheinlich anzutreffende große Gesamtspur von 1,4 Winkelgrad ($84'$) demonstriert, so wurde dennoch die hintere Fahrzeugachse für eine exemplarische Überprüfung gezielt entsprechend manipuliert (Vorspur).

Das Ergebnis der auf einer Asphaltfahrbahn durchgeführten Vergleichs-Messreihen (**Abbildung 4.27**) bestätigt den vorab prognostizierten Anstieg des Radwiderstands, in dessen Folge die von der Deichsel übertragene Zugkraft um rund 110 N auf rund 960 N zunimmt. Dieser Zuwachs ist ausschließlich auf die nur an der Hinterachse vorgenommene Manipulation der Spurgeometrie zurückzuführen. Bei einer Gesamtvorspur von 1,4 Winkelgrad (Fall B) hat die Hinterachse – separat betrachtet – gegenüber dem spurwinkelfreien Fahren (Fall A) in dieser Konstellation einen um ca. 27% höheren Bewegungswiderstand erzeugt. Wegen der höheren Gesamtzugkraft verändern sich natürlich die angegebenen prozentualen Fahrwiderstandsanteile beider Achsen, obwohl von der Vorderachse ein unveränderter absoluter Widerstandswert ausgeht.

Zuvor war in beiden Bauzuständen eine aussagekräftige Achsvermessung durchgeführt worden.

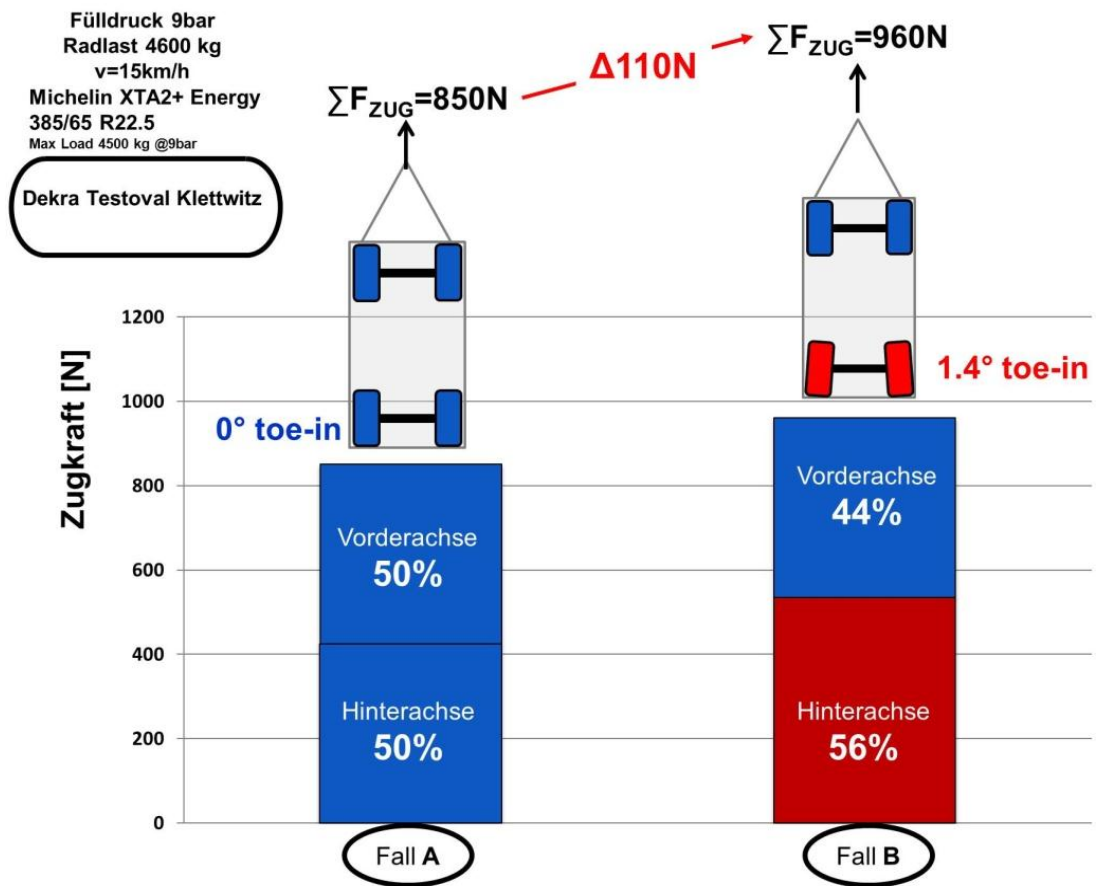


Abbildung 4.27: Manipulierte Spurgeometrie - Fahrwiderstandsänderung

4.4 Gegenüberstellung ‘Indoor vs. Outdoor‘

Die im Standardverfahren auf Trommelprüfanlagen untersuchten Rollwiderstände liefern für den betrachteten Betriebspunkt ein zuverlässiges, reproduzierbares Ergebnis, welches die zu beurteilende Eigenschaft eindeutig und nachvollziehbar beschreibt. Die Basis hierfür: Die Versuchsbedingungen sind wirklich stationär, umfassend definiert (z.B. ISO 28580) und werden streng eingehalten. Es stehen auf diese Weise Zahlenwerte mit absoluter Aussagekraft zur Verfügung. Die höchste Qualitätsstufe wird hierbei jedoch erst unter der Voraussetzung erreicht, dass in einem organisierten Verbundsystem Abgleichprozesse zwischen Prüfanlagen stattfinden – was heute bereits erfolgreich getan wird.

Wozu bei diesen hervorragenden technischen Möglichkeiten dann überhaupt ‘unter freiem Himmel‘ messen, wie in dem hier berichteten Projekt intensiv verfolgt?

Anders als beim Standardverfahren im Reifenprüflabor gibt es auf der Straße keineswegs diese vollkommen stationäre, von vielen unwägbaren Störeinflüssen bereinigte einzelne Betriebssituation. Vor allem aber ist der Reifenkontakt zur Fahrbahn ein anderer als zur gekrümmten, glatten Trommeloberfläche. Sowohl die Abplattung des Reifentorus und damit die Latschausbildung als auch die Oberflächenstrukturen von einerseits Stahltrommel und andererseits Fahrbahndecken sind grundverschieden, die realen Interaktionen sind somit nicht dieselben. Welche Zusammenhänge sich aus der in der Realität vorhandenen Komplexität im Einzelnen ergeben, dies unter praxisnahen Gegebenheiten möglichst zuverlässig festzustellen, war bekanntlich ein wesentliches Motiv der



Abbildung 4.28: Reifen-Rollwiderstand im Realbetrieb - Zielgleichung ‘Straße‘

Untersuchung.

Kann der am Prüfstand präzise gemessene Reifen-Rollwiderstand so ohne weiteres auf die Straßenfahrt übertragen werden? Unter Berücksichtigung der bei den Anhänger- und Trommel-Messreihen gewonnenen Erkenntnisse wird nachfolgend dargestellt, wie eine allgemeine Formulierung des Zusammenhangs aussehen könnte (**Abbildung 4.28**). Hingewiesen sei auf die zentrale Annahme einer stationären Betriebssituation.

$$F_{R_real} = F_{R,ISO} * \sqrt{\frac{R_T}{R_T + r}} * \left(\frac{p}{p_{ISO}}\right)^{-0,2} * \left(\frac{F_Z}{F_{Z,ISO}}\right)^{0,9} * K_V * K_T * K_R * K_F \quad (4.4)$$

Auf der rechten Formelseite der **Gl. 4.4** ist das Prüfstandsergebnis $F_{R,ISO}$ als verbindlicher Referenzwert eingesetzt. Dieser maßgebliche Bezugswert wird mittels 7 Multiplikatoren gewichtet. Mit der ‘Gewichtung’ werden mehr oder weniger stark relevante fundamentale Abhängigkeiten berücksichtigt, die sich hinter den Einflussfaktoren:

- a) *Fahrbahnkrümmung*
- b) *Fülldruck*
- c) *Radlast*
- d) *Fahrgeschwindigkeit*
- e) *Temperatur*
- f) *Fahrbahntextur*
- g) *Fahrbahnnachgiebigkeit*

verbergen. Einen Sonderfall stellt der siebte Einflussparameter dar, der unter der Bezeichnung ‘Fahrbahnnachgiebigkeit’ angeführt ist und nach dem aktuellen Wissensstand nur unter besonderen Bedingungen von Bedeutung ist.

Als Ergebnis der ISO-Prüfwert-Gewichtung ergibt sich schlussendlich auf der linken Gleichungsseite der Reifen-Rollwiderstand F_{R_real} . Das Kürzel mit dem Index ‘*real*’ bezeichnet eine der Realität ‘Strasse’ streng angenäherte Größe, die von den beschriebenen Zustandsvariablen abhängig ist und deren Betrag in der Einheit N als absoluter Wert vorliegt. Abweichend zum vorab auch benutzten Begriff ‘Rad-Rollwiderstand’ umfasst der hier eingeführte ‘Reifen-Rollwiderstand F_{R_real} ’ keine Nebenwiderstände, wie beispielsweise solche aus Spurgeometrie, Lagerreibung, Radventilation etc.. Missverständnisse und Verwechslungen sollten damit ausgeschlossen sein.

a) *Fahrbahnkrümmung*

Wie schon in Kap. 4.3.7 beschrieben, ist der Hintergrund der sogenannten Krümmungskorrektur die Ergebnism normierung auf einen einheitlichen Trommeldurchmesser von 2m. Ausgehend von der bisher unbewiesenen Zulässigkeit einer Extrapolation auf eine ebene Fahrbahn würde dies für einen C3-Reifen von 1m Durchmesser bedeuten, dass der Rollwiderstand dort um 18,4 % geringer wäre. Die in diesem Projekt durchgeführten Tests lassen leider noch keine verbindliche Bewertung und damit verwertbare Aussage zu, wie genau diese ‘Konversion‘ die Realität im Fall der C3-Palette tatsächlich abbildet. Die für die Trailerreifen ermittelten Zusammenhänge liegen im Trend eher unterhalb dieses Prozentwertes.

b) *Fülldruck*

c) *Radlast*

Der in Gl. 4.1 aufgeführte Zusammenhang berücksichtigt beide Einflussfaktoren in einer empirischen Funktion, deren Ursprung sich nicht eindeutig klären ließ. Sie findet sich u.a. in Veröffentlichungen der Häuser Michelin und Continental. Hintergrund und damit auch Basis der Formel sind Labormessungen. – Die mit Trailerreifen in diesem Projekt durchgeführten Stichversuche bestätigen die in Gl. 4.1 formulierte Empfindlichkeit des Rollwiderstands auf Fülldruckabweichungen weitgehend. Auch der sich bekannterweise nur sehr gering auswirkende Lasteinfluss auf den Rollwiderstandskoeffizienten wurde punktuell bestätigt. Beide Übereinstimmungen waren so auch zu erwarten, da sich diese fundamentalen Abhängigkeiten präzise anhand von Prüfstandsmessungen klären lassen.

d) *Temperatur*

Wie bereits im Unterkapitel 4.3.8 ausführlich beschrieben, wirft die Temperaturabhängigkeit des Rollwiderstands eine Vielzahl noch ungelöster Fragen auf. Eigentlich wird es jedoch nur dann schwierig, wenn Tests ‘outdoor‘ und somit außerhalb eines temperaturgeregelten Labors durchgeführt werden. Allein die Lufttemperatur der Umgebung ist in dieser Situation kein hinreichender Maßstab für eine sinnvolle Zuordnung des Rollwiderstands. Auch wenn häufig eine Angleichung von Bodentemperatur und Profiltemperatur (Laufstreifen) beobachtet werden konnte, dennoch verschafft eine Einbeziehung der Oberflächentemperatur der Fahrbahn keine bessere Korrelation zwischen den beiden Größen. Ein Ausweg aus diesem Dilemma scheint möglich. So beispielsweise über die in diesem Projekt final angesetzte Lösung ‘Sensierung der Gürtelkantentemperatur‘. Die

Summe aktueller, empirischer Beobachtungen mit dieser Methode reicht allerdings noch nicht für eine Verallgemeinerung aus.

e) *Fahrgeschwindigkeit*

Im praxisnahen Geschwindigkeitsbereich von bis zu 90 km/h ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit des reinen Reifen-Rollwiderstands bei C3-Reifen nicht immer vernachlässigbar. Diese eindeutige Feststellung wurde bei Stichproben im Prüfstandsversuch gewonnen. Allerdings steht mit der Standard-Prüfprozedur – bei nur einer definierten Betriebsstufe (single-point-test) – noch keine verwertbare Information in Bezug auf die v -Charakteristik des Reifen-Rollwiderstands zur Verfügung. Diese für eine Übertragung wichtige Abhängigkeit kann im Labortest auf dem Trommelprüfstand gewonnen werden. Jedes Reifenmuster sollte entsprechend überprüft werden, wenn ein hoher Genauigkeitsanspruch für F_{R_real} aus Gl. 4.4 besteht. Da nicht bekannt ist, wie sich eine auf dem Prüfstand im stationären Zustand unter spezifischen thermischen Bedingungen ($T_{Luft}=25^{\circ}C$) ermittelte Geschwindigkeitscharakteristik gegenüber dem unter realen Bedingungen (outdoor) auftretenden Verhalten darstellt, bestehen zu diesem Komplex noch offene Fragen.

f) *Fahrbahntextur*

Für den sogenannten Verformungsgrip ist der Mikroschlupf und damit auch die Fahrbahn-Mikrotextur von erheblicher Bedeutung. Hingegen spielt diese Eigenschaft beim Rollwiderstand nur eine schwache Rolle (Adhäsion). Als vorrangig prägendes Strukturelement bezüglich der C3-Reifendimension hat sich die Megatextur gezeigt, danach folgt die Makrotextur. Für den untersuchten Rillenreifen in 22,5“-Dimension wurde eine elementare Korrelation zwischen Rollwiderstandsbeiwert und dem Texturdeskriptor MPD (Mean Profile Depth) festgestellt. In der schon vom Pkw-Reifen her bekannten Tendenz: Je rauer die Oberfläche, desto höher der Rad-Rollwiderstand – allerdings nicht zwingend mit linearem Zusammenhang, wie nachfolgend weiter erläutert.

Der Einflußgrad, auf der Basis des MPD-Kennwertes bewertet, scheint bei dieser Raddimension geringer als bei den kleineren Reifen der Kategorie Pkw zu sein. So sind für letzteren von VTI [12] angeführt: 17-30% pro mm MPD, je nach Geschwindigkeit.

Der große Reifen reagiert, so ist der erste Eindruck, erst bei sehr rauer Textur; somit deutlich unempfindlicher auf die üblicherweise im Verkehrsnetz bei gut unterhaltenen Fahrbahnen anzutreffende Schwankungsbreite der Oberflächenstrukturen. Als Orientierungsmaßstab sind die entsprechenden Erfahrungswerte aus Pkw-Meßreihen [Miriam] herangezogen worden, wie in Kap. 4.3.7 beschrieben.

Zwar liegt ein erster mathematischer Zusammenhang für den exemplarisch vorgestellten C3-Reifen vor, jedoch erlauben die geringe Fallzahl und die nur grob gestaffelten ‘Fahrbahnqualitäten‘ noch keine Verallgemeinerung der ermittelten Korrelation. Neben einer gezielten Validierung lassen fernerhin auch die Wechselwirkungen zwischen Profilart, Rauigkeit und Fahrbahntemperatur noch weiteren Klärungsbedarf erkennen.

g) Fahrbahnnachgiebigkeit

Aus dem in Kap. 4.3.9 vorgestellten Versuch lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Annahme einer starren, unnachgiebigen Fahrbahn unter speziellen Umgebungsbedingungen – Voraussetzungen sind bestimmte Steifigkeitseigenschaften, erhöhte Fahrbahntemperaturen und eine erhöhte Flächenpressung - die Rollwiderstandssituation sachlich falsch wiedergibt. Mit dem belasteten Trailerreifen der Kategorie C3 konnte auf einer Bahn mit Asphaltdecke exemplarisch gezeigt werden, dass dieser Einflussparameter sich massiv auswirken kann. Der für den Trailerreifen festgestellte Zuwachs an Rad-Rollwiderstand: Über 16 %, ausgelöst durch eine temperaturbedingte Fahrbahnnachgiebigkeit!

5 Resümee

In dem hier vorgestellten Gemeinschaftsprojekt stand der Rollwiderstand einiger Nutzfahrzeugreifen der Kategorie 'C3' im Mittelpunkt einer auf realen Fahrbahnen durchgeführten experimentellen Untersuchung. Die Motivation hierfür begründet sich in der aktuell noch weitgehenden Unbekanntheit des unter den wahren Betriebsbedingungen einer Straßenfahrt tatsächlich auftretenden Rad-Rollwiderstands und der Zielsetzung, das Wissen darüber zu vertiefen. Die natürlichen Rahmenbedingungen können bekanntlich sehr vielfältig sein, ganz im Gegensatz zu den 1-Punkt-Zustandsbedingungen einer standardisierten Rollwiderstandsuntersuchung auf einer Trommelanlage. Allerdings ebenso wie auf dem Trommelprüfstand allein der thermische Gleichgewichtszustand als stationäre Betriebssituation zu einem wiederholbaren, aussagekräftigen Ergebnis führt, stand auch in diesem Projekt weniger das transiente Reifenverhalten im Vordergrund als vielmehr der thermisch stabile Beharrungszustand.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem nach einer Prüfspezifikation, wie z.B. ISO 25580 ermittelten Reifen-Rollwiderstand und dem auf der Straße festgestellten Rad-Rollwiderstand sind dort mitbeteiligte Nebenwiderstände, die auf der Trommel ganz gezielt ausgeschlossen werden.

Folglich sind Nebenwiderstände in dem als c_R bekannten 'normierten' Reifen-Rollwiderstandskoeffizienten nicht enthalten, da sie in dem streng definierten Prozess gewollt keinerlei Berücksichtigung erfahren. Effekte wie air drag (Lüfterverluste), Fahrbahnrauigkeit, Fahrbahnnachgiebigkeit, Spurfehler etc. liefern jedoch in der Realität zusätzlich zum reinen Reifen-Rollwiderstand mehr oder auch weniger nennenswerte Fahrwiderstandsverluste. Dieser Umstand erfordert neben der physikalischen eine sprachliche Abgrenzung, um Missverständnisse zu vermeiden. Unter dem Oberbegriff Rad-Rollwiderstand findet in diesem Bericht das Kollektiv verschiedener Komponenten eine eindeutige Zuordnung. Zur Unterscheidung und Abgrenzung wurde hierfür das Symbol f_{RW} festgelegt. Dieser unverwechselbare Rad-Rollwiderstandsbeiwert läßt gegenüber dem 'Normverfahren' auch abweichende Betriebszustandsgrößen (Fülldruck, Temperatur, Radlast, Fahrgeschwindigkeit) zu, die notwendigerweise im einzelnen zu deklarieren sind.

In Kombination mit einigen begleitenden Prüfstandsuntersuchungen haben die 'Outdoor'-Messreihen - primär wurden Trailerreifen der Dimension 385/65 R22.5 geprüft - die nachfolgend zusammengefassten Erkenntnisse geliefert.

In konzentrierter Form resümiert:

Verfahren/Methode

- Methode 'Anhänger-Deichselkraftmessung (ADM)' hat sich bewährt; ist ausgereift und realitätsnah - Voraussetzungen an Gelände und Versuchsumgebung müssen jedoch strikt erfüllt sein
- Untersuchung wurden ausschließlich am freirollenden Rad vorgenommen - 'outdoor' wie auch 'indoor'
- Stationärer Zustand (therm. Gleichgewicht) im Fokus; 'outdoor' auch transientes Verhalten beobachtet
- Fahrgeschwindigkeit auf 15 km/h begrenzt
- Messprinzip i.O.; Messkette driftarm, präzise und zuverlässig, Sensor robust, geeignet für 18t-Trailer

Ergebnisse untersuchter Einflussfaktoren 'Reifen-Rollwiderstand'

- Raddimension: Reifenkategorie C3 gegenüber Pkw-Reifengrößen auf einem niedrigeren Rollwiderstandsniveau mit deutlich geringeren Koeffizienten
- Bauart: Reifen mit Traktionsprofil zeigten deutlich höheren Rollwiderstand als Trailerreifen; 'wide-base'- gegenüber Zwillingsvariante 17% verlustärmer (2 Flanken statt 4)
- Profilhöhe: Intensive Abhängigkeit – 27% Differenz ermittelt (16 vs. 4 mm)
- Fülldruck: Einflussgrad bei Abnahme zunehmend gravierend; bekannter empirischer Exponentialzusammenhang wurde punktuell für C3-Reifen bestätigt
- Radlast: Hoher Einflussgrad (abs.), allerdings bei c_R nur schwache Auswirkung; bekannter empirischer Exponentialzusammenhang wurde punktuell bestätigt (C3)
- Fahrgeschwindigkeit: Unterschiedlicher Einflussgrad (individuell geprägt, auf Trommel ermittelt), nur fallweise vernachlässigbar gering; teilweise konstant zwischen 50-90 km/h
- Fahrbahnkrümmung: Krümmungskorrektur für Normierung auf 2m-Trommeldurchmesser mittels bekannter Gleichung stichhaltig. Hochrechnung auf ebene Fahrbahn ergab Überbewertung bei C3-Reifen
- Fahrbahntextur: Der für Pkw-Reifen (anderweitig) nachgewiesene Einflussgrad bestätigt sich bei der Kategorie C3-Reifen in abgeschwächter Weise. Auch hier gilt 'je rauer, desto mehr Widerstand'; Reaktion jedoch weniger empfindlich als bei kleineren Reifen.
- Fahrbahnsteifigkeit: Unter bestimmten Voraussetzungen nicht vernachlässigbarer Einfluß, kann zu erheblichem Anstieg beitragen – in dieser Untersuchung exemplarisch nachgewiesen
- Spurgeometrie: Spurwiderstand durch Reifenschräglauf ist terminologisch nicht als Reifen-Rollwiderstand einstuftbar; jedoch ein realer Nebeneffekt, der den Rad-Rollwiderstand deutlich heraufsetzen kann – was punktuell nachgewiesen wurde
- Temperatur: Störeinflüsse erschweren 'outdoor' das Erzielen eines thermischen Beharrungszustands mit ausgeglichener Wärmeverteilung; anders als unter Laborbedingungen ist unter Feldbedingungen die Umgebungstemperatur allein keine zielführende Variable für eine eindeutige Korrelation zwischen Umgebungstemperatur und Rollwiderstand. Die Reifenkerntemperatur, hier definiert am Messort Gürtelkante, eignet sich hingegen als Kenngröße. Eine funktionale Abhängigkeit konnte noch nicht formuliert

werden. Ebenso wie sich eine erhebliche Rollwiderstandszunahme bei Außentemperaturen um null Grad Celsius nachweisen ließ, fand sich auch der erwartete Rückgang (bis Minimumniveau) in den bei hohen Sommertemperaturen festgestellten Ergebnissen wieder.

Ergebnisübertragung ‘Trommel – Strasse‘

Die mögliche Frage zur Korrelation zwischen dem Standardversuch (ISO 25580) und dem auf realer Verkehrsstraße mit flacher und rauer Fahrbahndecke durchgeführten ‘Outdoor‘-Test war nicht Gegenstand der Untersuchung. Auch der Aspekt, ob ein Rollwiderstands-Rating von Reifen ‘indoor‘ oder ‘outdoor‘ unterschiedlich ausfällt, stand bei dieser Studie nicht im Fokus. Auf Grundlage der nur auf Stichproben angelegten Untersuchung ließen sich auch keine dieser Fragen nach wissenschaftlichen Maßstäben grundlegend zuverlässig beantworten. Insbesondere die Bandbreite an Reifentypen und die Vielfalt an Varianten und Mustern verbietet eine Verallgemeinerung der punktuell gewonnenen Feststellungen. Jedoch war es an Hand der vorrangig mit den Trailerreifen der Dimension 385/65 R22.5 gemachten Versuchserfahrungen für diese Kategorie nun möglich, fragliche Abhängigkeiten fallweise zu überprüfen und das C3-Reifenverhalten unter dem die Wirklichkeit bestimmenden Einflußszenario exemplarisch zu beleuchten.

Mit der in Kap. 4 wiedergegebenen Transfer-Gleichung, welche 7 ausgewählte Zustandsvariablen einbezieht, besteht theoretisch die Möglichkeit einer erweiterten Betrachtung: Hochrechnung des puren Reifen-Rollwiderstandes (Prüfstandswert) auf den gesamten, unter realen Strassenbedingungen erzeugten Reifen-Rollwiderstand (F_{R_real}). Einige der darin enthaltenen Abhängigkeiten sind noch unzureichend verifiziert, jedoch ausgehend von den vorgestellten Teilergebnissen können schon jetzt durchaus nützliche Schlussfolgerungen gezogen werden. Abschätzungen der quantitativen Beeinflussung durch Last und Fülldruck sind damit bereits sehr gut möglich.

Weil der Faktor ‘Krümmungskorrektur‘ den Vorteil des flachen Fahrbahnkontaktes offensichtlich überbewertet und andererseits die Rollwiderstandszunahme durch Fahrbahnrauigkeit (Textureinfluss) häufig außer Acht gelassen wird, stehen der auf dem (glatten) Prüfstand nach ISO 28580 ermittelte Reifen-Rollwiderstandskoeffizient und der auf einer Strasse festgestellte Widerstandsbeiwert zumeist nah beieinander. Falls keine ungefähren Übereinstimmungen eintreten, begründet sich dies grundsätzlich als Folge voneinander abweichender Betriebsbedingungen und damit unterschiedlicher Betriebszustände. Vor allem die hohe Temperatursensitivität der Verlustarbeit ist der Dreh- und Angelpunkt einer komplexen thermischen Situation.

Literaturverzeichnis

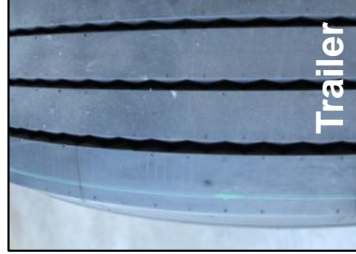
- [1] **Holloh, K.-D., Krukenberg, R., Pflug, H.-Chr., Schuckert, M.:** "CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen – Braucht auch diese Fahrzeugklasse eine CO₂-Regulierung?", 11. Intern. Fachtagung Nutzfahrzeuge 2011, Steyr, 19.-20. Mai 2011, VDI-Berichte Nr. 2128 (2011)
- [2] **Soci t  de Technologie Michelin** (Hrsg.): "The tyre – Rolling resistance and fuel savings", F-Clermont-Ferrand (2003)
- [3] **ISO:** "Passenger car, truck and bus tyres – Methods of measuring rolling resistance - Single point test and correlation of measuring results", ISO 28580 (2009)
- [4] **Glaeser, K.-P.:** "Rolling Resistance of Tyres on Road Surfaces – Procedures to Measure Tyre Rolling Resistance", Energy Efficient Tyres, IEA, Paris, (15.-16. Nov. 2005)
- [5] **Krehan, P.;** "K rper, W.: Messung des Rollwiderstands auf der Strasse", Automobiltechnische Zeitschrift, ATZ 93; Nr. 10 (1991)
- [6] **Bode, M.:** "Realisierung einer mobilen Pr feinrichtung zur Ermittlung des Vordrill- und Rollwiderstands auf echten Fahrbahnen", TU Braunschweig, ILF, Diplomarbeit (2009)
- [7] **KIT Karlsruhe:**
http://www.fast.kit.edu/download/DownloadsFahrzeugtechnik/130307-Testing_facilities_FAST_english.pdf (Zugriff 04.04.2013)
- [8] **Regulation EC No 1222/2009** of the European Parliament and of the Council (25.11.2009)
- [9] **Popov AA, Cole Dj, Cebon D and Winkler CB:** "Laboratory measurement of rolling resistance in truck tyres under dynamic vertical load", Proc Institution of Mechanical Engineers, Vol.217, Part D, p1071-1079 (2003)
- [10] **Sandberg, U.:** "Rolling Resistance measurements on laboratory drums versus measurement on road surfaces", Energy Efficient Tire Workshop, Paris (15.-16. November 2005)

-
- [11] **Descornet, G.:** “Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance”, Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031, W.E. Meyer and J. Reichert, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA (1990)
- [12] **Sandberg, U. et al.:** Report MIRIAM_SP1_01: “Rolling Resistance – Basic Information and State-of-the-Art on Measurement methods”, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) (01.06.2011)
- [13] **RDO Asphalt 09**, FGSV 2009 (Richtlinien für die Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht)
- [14] **Kopp, S.:** “Nutzfahrzeugaerodynamik- Oft unterschätzt und doch die Zukunft?“, VDI Fahrzeug und Verkehrstechnik (2009)
- [15] **Wallentowitz, H.:** “Längsdynamik von Kraftfahrzeugen“, Aachener Schriftenreihe Automobiltechnik, 12. Auflage (2005)
- [16] **Backfisch, K.-P.:** “Reifen zum Kraftstoffsparen“, KÜS Magazin Ausgabe (11.2010)

Anhang

Versuchsobjekte 2011

Continental



Continental HTL2 EC
Long Distance
385/65 R22.5
158L

DOT 6Y79 MK2M

Felge
22,5 x 11.75
ET 40

Michelin



Michelin XDN2 GRIP
Laufriechung
315/70 R22.5
154/150L
Max Load Single 3750 kg @9bar
Max Load Dual 3350 kg @9bar

DOT HAKP PMJX 4509

Felge
9.0 x22.5
ET 40



Michelin XDN2 GRIP X-ONE
Laufriechung
495/45 R22.5
169K
Max Load 5800 kg @9bar

DOT FNBD F7MX 1008

Felge
22,5 x 17
ET 37



Michelin XTA2+ Energy
385/65 R22.5
158L
Max Load 4500 kg @9bar

DOT FVWB 6JMX 1209

Felge
22,5 x 11.75
ET 40

Referenzreifen aus
Versuchen 2010

Trailer

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2013

VDA

Verband der
Automobilindustrie

FAT

Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de