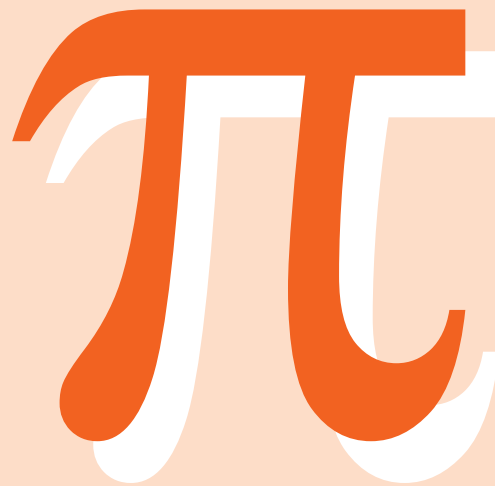


# FAT 304



Der Rollwiderstand von  
Nutzfahrzeugreifen unter realen  
Umgebungsbedingungen



# **Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen**

## **Forschungsstelle**

IPW automotive GmbH,  
Hannover

## **Autor**

Matthias Bode

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>Bildverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Rollwiderstandskoeffizient .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Versuchsfahrzeug .....</b>	<b>12</b>
<b>4 Messtechnik.....</b>	<b>15</b>
<b>5 Nebenwiderstände .....</b>	<b>18</b>
5.1    Definitionsmerkmale Reifen-Rollwiderstand ‘MTL‘ .....	19
<b>6 Versuchsprogramm .....</b>	<b>21</b>
<b>7 Versuchsbedingungen .....</b>	<b>24</b>
<b>8 Ergebnisse Stufentest .....</b>	<b>26</b>
8.1    Warmlauf $v=\text{const.}$ (85 km/h) .....	28
8.2    Übergang $v$ -Sprung .....	31
8.3    Stationäres Verhalten .....	33
8.3.1 Einfluss der Parameter Last und Fülldruck .....	36
<b>9 Ergebnisse Spurwiderstand .....</b>	<b>39</b>
<b>10 Resümee.....</b>	<b>44</b>
<b>11 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>46</b>

## Bildverzeichnis

BILD 1: ANHÄNGER-DEICHELKRAFTMESSUNG IPW (PARAMETERVARIATIONEN) .....	7
BILD 2: TROMMELPRÜFSTAND MIT PRÜFREIFEN [DUNLOP] .....	9
BILD 3: PRINZIPIELLER AUFBAU DES 'MTL' .....	12
BILD 4: MOBILE TIRE LAB ('MTL') .....	13
BILD 5: AUSZUG AUS 'MESSTECHNIK IM MOBILE TIRE LAB' (MTL) .....	15
BILD 6: DEFINITION WIDERSTÄNDE .....	18
BILD 7: REIFEN-ROLLWIDERSTAND 'MTL' .....	19
BILD 8: VERSUCHSOBJEKT IM PROGRAMM 'MATRIX 2015' .....	21
BILD 9: VERSUCHSMATRIX .....	22
BILD 10: STUFENTEST .....	22
BILD 11: PRÜFGELÄNDE MIT LANGEN GERADEN .....	24
BILD 12: UMGEBUNGSTEMPERATUREN BEI DER TESTDURCHFÜHRUNG .....	24
BILD 13: VERLÄUFE VON MESSGRÖßEN BEIM STUFENTEST (BEISPIEL) .....	26
BILD 14: WARMLAUF (85KM/H) – ÜBERGANGSVERHALTEN "INDOOR VS. OUTDOOR" .....	28
BILD 15: WARMLAUF – ZUSAMMENHANG VON ROLLWIDERSTAND U. REIFENTEMPERATUR .....	30
BILD 16: WARMLAUF - ROLLWIDERSTAND U. MATERIALTEMPERATUR "INDOOR VS. OUTDOOR" .....	31
BILD 17: STUFENTEST – TYPISCHE AUSPRÄGUNG DES TRANSIENTEN ROLLWIDERSTANDS .....	31
BILD 18: STUFENTEST – INTERAKTION VON GESCHWINDIGKEITSWECHSEL, MATERIALTEMPERATUR UND ROLLWIDERSTAND .....	32
BILD 19: STATIONÄRER ROLLWIDERSTAND – GESCHWINDIGKEITSEINFLUSS .....	33
BILD 20: MATERIAL- UND GASTEMPERATUR – STATIONÄRE WERTE BEIM STUFENTEST .....	35
BILD 21: STATIONÄRER FÜLLDRUCKEINFLUSS .....	36
BILD 22: STATIONÄRER RADLASTEINFLUSS .....	37
BILD 23: STATIONÄRE ROLLWIDERSTANDSBEIWERTE UNTERSUCHTER LAST-/DRUCKVARIANTEN .....	38
BILD 24: EINWIRKENDE KRÄFTE AM REIFEN .....	40
BILD 25: ERUIERTE SCHRÄGLAUFSTEIFIGKEITEN .....	41
BILD 26: GEGENÜBERSTELLUNG VON REIFENROLL- UND SPURWIDERSTAND .....	42
BILD 27: ACHSWEISE BETRACHTUNG DER EINWIRKENDEN RADKRÄFTE .....	43

## Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$c_{R\_ISO}$	Reifen-Rollwiderstandskoeffizient, Betonung liegt auf Bedingungen nach ISO (Trommelprüfstand)	[-]
$c_R$	Reifen-Rollwiderstandskoeffizient, Bedingungen ggfs. <u>abweichend</u> zu ISO	[-]
$c_\alpha$	Schräglaufsteifigkeit (cornering stiffness)	[N/°]
$F_{R\_ISO}$	Reifen-Rollwiderstandskraft, auf Trommelprüfstand (ISO)	[N]
$F_R$	Reifen-Rollwiderstandskraft, <u>abweichend</u> zu ISO	[N]
$F_{Rad}$	Radwiderstand	[N]
$F_{RW}$	Radwiderstandskraft ( <i>rolling resistance wheel</i> )	[N]
$f_{RW}$	Radwiderstandskoeffizient ( <i>rolling resistance wheel</i> )	[-]
$F_X$	Kraftkomponente Messnabe, Koordinatenlängsachse)	[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]
$p_{ISO}$	Fülldruck Reifen auf Trommelprüfstand nach ISO	[bar]
$T_{amb}$	Raumtemperatur	[°C]
$T_F$	Fahrbahntemperatur	[°C]
$T_G$	Materialtemperatur (Gürtelkante)	[°C]
$T_U$	Umgebungslufttemperatur (lokale Wetterstation)	[°C]

## **Verwendete Abkürzungen**

BASt	- Bundesanstalt für Straßenwesen
C3-tyres	- Reifen der Kategorie ‘heavy duty trucks‘
CO <sub>2</sub>	- Kohlenstoffdioxid
CPC	ContiPressureControl
DOT	- Reifenidentifikationsnummer
FAT	- Forschungsvereinigung Automobiltechnik
IPW	- IPW automotive GmbH, Hannover
MTL	- Mobile Tire Lab (Rollwiderstandsmessfahrzeug für LKW Reifen)

# 1 Einleitung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die experimentellen Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt ‘Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen’, durchgeführt nach Beauftragung durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin (FAT).

Zuständig für die fachliche Begleitung war der Arbeitskreis AK4 unter Führung von Herrn B. Lange, Obmann aus dem Hause Continental. In enger Abstimmung mit IPW automotive GmbH, Hannover, wurde das Ziel verfolgt, Antworten auf ausgesuchte Fragen zum Reifenrollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Betriebsbedingungen zu gewinnen.

Es handelt sich bei diesem Projekt um eine Fortsetzung von in diesem Kreis bereits mehrjährig verfolgten Grundlagenarbeiten, welche durch Einbindung eines erst seit kurzem vorhandenen Spezialfahrzeuges mit integriertem Reifenprüfstand nun mit breiterem Spielraum angelegt werden konnten.

Schon bei den vorangehend in natürlicher Umgebung ‘outdoor’ von IPW durchgeführten Untersuchungen stand der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen der Kategorie ‘C3’ auf realen Fahrbahnen im Mittelpunkt, siehe FAT-Schriftenreihe Nr. 255 (2013) [1]. Hierbei fand die Einflussgröße Fahrgeschwindigkeit jedoch noch keine Aufmerksamkeit, was in einer verfahrenstechnisch limitierten Fahrgeschwindigkeit von nur 15 km/h begründet war. Für eine Variation der Raddrehfrequenz in praxisrelevantem Maßstab war das vormals verwendete Messverfahren ‘Anhängers-Deichselkraftmessung’ (**Bild 1**) ungeeignet.



**Bild 1:** Anhängers-Deichselkraftmessung IPW (Parametervariationen)

Motiviert durch ein zunehmendes Interesse an einer Vertiefung von Rollwiderstandseigenschaften unter dem breiten Fächer realistischer Betriebsbedingungen war eine Neuausrichtung des Messverfahrens zu einer zentralen Herausforderung geworden. Unter diesem Eindruck hatte sich IPW schon im Vorfeld mit verschiedenen Konzepten befasst und Überlegungen zur Gestaltung eines entsprechenden Sonderfahrzeuges vorangetrieben. Sowohl dessen Entwicklung als auch die anschließende Umsetzung von Konstruktion und Messtechnik erfolgten in Eigenregie auf Basis eigener Ressourcen.

Das in diesem Rahmen entstandene Rollwiderstands-Messfahrzeug trägt die Bezeichnung *Mobile Tire Lab* (MTL). Rein äußerlich betrachtet ein schwerer Sattelzug, steht das 'mobile Prüflabor' seit Frühjahr 2014 für ein erweitertes Aufgabenspektrum zur Verfügung. Hervorzuheben ist der enge Realitätsbezug der Testmöglichkeiten, wobei nicht nur die bei konventioneller Vorgehensweise üblichen stationären Betriebsbedingungen nachstellbar sind, sondern auch transiente, was zyklisch strukturierte Tests ermöglicht. Grundsätzlich ist eine Erfassung wichtiger Zustandsgrößen des Objektes „Reifen“ dabei. Berücksichtigung finden darin auch die beteiligten Umweltbedingungen.

Bei ersten Teilaufgaben stand der elementare Eignungsnachweis im Vordergrund, das 'neue' Messequipment musste sich zunächst bewähren. Ist der real auf Straßen auftretende Reifen-Rollwiderstand zuverlässig feststellbar? Kann die Messmethode auch unter echten Verkehrsbedingungen die Erwartungen erfüllen? Fragen wie diese verlangten unverzüglich Antworten, was Funktions- und Plausibilitätskontrollen intensiv vorangetrieben hat. Neben einer hohen Zuverlässigkeit konnte die grundsätzliche Eignung des Gesamtsystems inzwischen überzeugend unter Beweis gestellt werden, so u.a. im Rahmen der Pilotaufgabe, siehe Beitrag in der FAT Schriftenreihe 285 [1].

Die im Folgenden behandelten Untersuchungen fanden unter Einsatz des 'MTL' auf dem Rundkurs des Dekra Prüfgeländes in Klettwitz statt. Im Mittelpunkt des im AK4 entwickelten Versuchsprogramms steht ein einzelnes Reifenobjekt, ein mit integrierter Sensortechnik speziell präparierter handelsüblicher Trailerreifen der Dimension 385/65 R 22.5. Als Besonderheit gegenüber dem bisherigen Testschwerpunkt >Rollwiderstand stationär bei  $v=\text{const.}$ < rückt der Aspekt "Übergangsverhalten" hierbei in den Fokus. Aber auch der Fahrwiderstand unter dem Einfluss von geringem Reifenschräglauf (Spurwinkel) wird entsprechend der vom Arbeitskreis verabschiedeten Aufgabenstellung betrachtet.

Die bei der Durchführung gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht ausführlich vorgestellt.



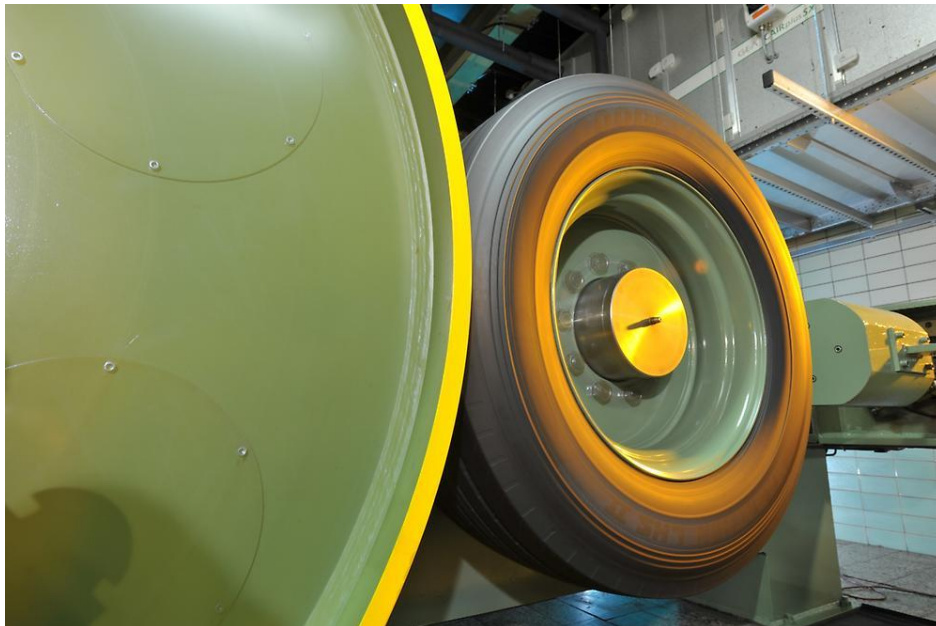
## 2 Rollwiderstandskoeffizient

Die Reifeneigenschaft ‘*Rollwiderstand*‘ beinhaltet zwar ursächlich einen wegabhängigen Energieverlust beim Rollvorgang, jedoch im Allgemeinen bezeichnet der Begriff die daraus resultierende Kraftwirkung ( $F_R$ ), welche messbar und mittels standardisierter Prüfverfahren weltweit einheitlich bestimmbar ist. Dieser physikalische Widerstand ist der Bewegung des rollenden Rades entgegen gerichtet, wobei der Widerstandswert von der Höhe der vertikalen Radlast ( $F_Z$ ) maßgeblich beeinflusst wird. Die direkte und ausgeprägte Abhängigkeit von  $F_R$  eignet sich hervorragend für eine Normierung, welche in bekannter Relation

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

den Rollwiderstandskoeffizienten definiert, hier mit dem Kurzzeichen  $c_R$  bezeichnet. Im internationalen SI-Einheiten-System als dimensionslose Größe definiert, lässt sich  $c_R$  in Prozent oder Promille ausdrücken; etabliert ist die Angabe in N/kN – aber auch die alte Deklaration kg/t ist noch nicht abgelöst.

Angaben zum Rollwiderstand von Reifen basieren im Normalfall auf verbindlichen Prüfergebnissen, die unter den Bedingungen eines spezifizierten Prüfverfahrens entstanden



**Bild 2:** Trommelprüfstand mit Prüfreifen [Dunlop]

sind. Zu den etablierten Verfahren gehören 'Indoor'-Messungen auf speziellen Trommelprüfanlagen [**Bild 2**], spezifiziert in Standards, wie z.B. der ISO 28580 [2].

Hierbei rollt der fixierte Prüfreifen *ohne Schräglauf und Radsturz* unter definierter Belastung auf einer Außentrommel mit einem Mindestdurchmesser von 1,7 m. Da sich das Verhältnis der Krümmungsradien zwischen den Kontaktpartnern Trommel/Reifen im Reifen-Rollwiderstand niederschlägt, wird ein einheitlicher Bezug mittels Korrekturformel nachträglich hergestellt. Als Referenzwert ist hierfür ein Rollendurchmesser von 2 m angesetzt.

Im Gegensatz zu 'Outdoor'-Messverfahren bietet allein die 'Indoor'-Methode die grundlegenden Voraussetzungen, um unter stabilen und vor allem definierten Umgebungsbedingungen zu prüfen. So ist die Lufttemperatur der Umgebung in ISO 28580 mit 25°C spezifiziert. Abweichungen von diesem Referenzwert werden mit  $\pm 5^\circ\text{C}$  toleriert und mittels Korrekturformel verrechnet.

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

Zwar schließt die Spezifikation raue Laufflächen nicht aus, jedoch soll die Stahltrommel bevorzugt eine glatte Oberfläche aufweisen, ansonsten ist diese Abweichung im Prüfergebnis extra zu vermerken.

Innerhalb der Regulierung sind nur eine Geschwindigkeits- und auch nur eine Laststufe für den Reifentest vorgesehen (single point test). Für Reifen mit einem Lastindex  $LI < 121$  ist beispielsweise die Stufe auf 80 km/h festgelegt.

Als Prüflast ist für Lkw- und Busreifen eine Radlast von 85% der maximalen Tragfähigkeit definiert – unabhängig vom Trommeldurchmesser!

Der zu berücksichtigende Fülldruck leitet sich aus dem der maximalen Tragfähigkeit zugeordneten Druckwert ab.

Standardisierte Prüfverfahren, wie die Methode nach ISO 28580, sind darauf festgelegt, den Rollwiderstand *im stationären Betriebszustand* auf der Basis thermischen Gleichgewichts zu überprüfen. Transientes Verhalten und zeitveränderliche Zustände sind hierbei mit Bedacht ausgeschlossen.

Der Rollwiderstandskoeffizient eines Reifens ist aber selbst unter stationären Randbedingungen keinesfalls eine Objektkonstante, sondern ein von den Zustandsvariablen (Betriebs- und Umweltbedingungen) abhängiger Zahlenwert. Zur Vermeidung von Missverständnissen unterscheidet der Verfasser deshalb bei der Angabe zwischen regulär nach ISO-Definition ermittelten Werten und jenen, die abweichend zu den darin

festgelegten Bedingungen gewonnen wurden, mittels zusätzlicher Indizierung des üblichen Symbols  $c_R$ , wie nachfolgend aufgeführt.

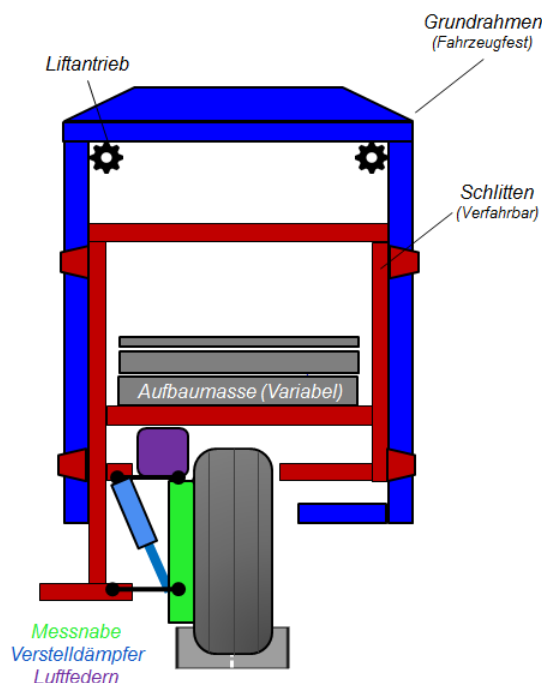
*a)  $c_{R\_iso}$  - per Standardtestmethode ermittelt, d.h. exakt reglementierte, übertragbare Bedingungen, bspw. nach ISO 28580 (Trommelkontakt gekrümmt, Oberflächentextur glatt, Umgebungstemperatur 25°C, etc.)*

*b)  $c_R$  - unter von a) abweichenden (freien) Bedingungen festgestellt - offene Methode.*

Nach diesem Grundschemata erfahren Outdoor-Messungen, wie die in diesem Projekt durchgeführten, eine Zuordnung in die zweite Kategorie. Aussagekräftig kann eine Wertangabe in jedem Fall immer nur dann sein, wenn die Rahmenbedingungen der Messung nachvollziehbar beschrieben und demzufolge vollständig bekannt sind.

### 3 Versuchsfahrzeug

Das für die aktuelle Untersuchung eingesetzte Spezialfahrzeug ist ein Sattelzug mit integriertem Reifenprüfstand, worauf sich die Bezeichnung *Mobile Tire Lab* (**Bild 4**) gründet. Anders als bei den stationären Rollwiderstands-Prüfanlagen schließt der im Sattelanhänger implementierte „Viertelfahrzeug-Prüfstand“ (quarter test rig) nicht von vornherein Vertikalbewegungen des Rades aus, da eine konstruktive Sperrung dieses Freiheitsgrades gezielt vermieden wird. Ebenso wie im regulären Betriebsfall bei Bus oder Lkw, lässt die gewählte Bauform mit 4 Säulenführungen die bei Straßenfahrt natürlicherweise angeregten vertikalen Bewegungen von Rad- und Aufbaumasse zu.



**Bild 3:** Prinzipieller Aufbau des ‘MTL‘

Abstrahiert handelt es sich bei diesem System schwingungstechnisch um einen Zwei-Massen-Schwinger (**Bild 3**), wobei die Aufbaumasse in enger Stufung zwischen 15 und 45 kN mittels Ballastplatten variiert werden kann. **Wie üblich**, übernimmt ein hydraulischer Teleskopdämpfer die notwendige Bedämpfung, hierbei in der Sonderausführung als elektronischer Verstelldämpfer. Der Bewegung von Aufbau und Rad kann damit in differenzierter Weise Energie entzogen werden. Eine geregelte Luftfederung mit Rollbälgen verschafft ein konstantes Fahrniveau.

Die angefertigte Einzelradaufhängung in Doppelquerlenker-Bauweise sorgt mit steifen, spielfreien Lagerelementen (Schwenk- und Traglager) für eine exakte Führung des lenkbaren Rades. Auch der Radträger ist eine Sonderkonstruktion, welche darauf zugeschnitten ist, den relativ schweren Messnabenkorpus starr aufzunehmen. Die installierte Präzisions-Kraftmessnabe ist primär für stationäre Prüfstände konzipiert. Zentrale Elemente des WFT (Wheel Force Transducer) aus dem Hause Kistler sind Präzisions-Kraftmesszellen in DMS-Technologie - fixiert im Stator. Der wälzgelagerte Rotorteil besteht aus einer sehr steifen Welle mit Flanschanbindung für den Radanschluss, wobei Standardfelgen einsetzbar sind. Aufgrund der bei dieser Bauform ruhenden Kraftmesszellen entfällt

Die angefertigte Einzelradaufhängung in Doppelquerlenker-Bauweise sorgt mit steifen, spielfreien Lagerelementen (Schwenk- und Traglager) für eine exakte Führung des lenkbaren Rades. Auch der Radträger ist eine Sonderkonstruktion, welche darauf zugeschnitten ist, den relativ schweren Messnabenkorpus starr aufzunehmen. Die installierte Präzisions-Kraftmessnabe ist primär für stationäre Prüfstände konzipiert. Zentrale Elemente des WFT (Wheel Force Transducer) aus dem Hause Kistler sind Präzisions-Kraftmesszellen in DMS-Technologie - fixiert im Stator. Der wälzgelagerte Rotorteil besteht aus einer sehr steifen Welle mit Flanschanbindung für den Radanschluss, wobei Standardfelgen einsetzbar sind. Aufgrund der bei dieser Bauform ruhenden Kraftmesszellen entfällt

die bei umlaufenden Messkörpern prinzipiell notwendige winkelbezogene Koordinatenverrechnung, wodurch eine potentielle Fehlerquelle vermieden wird.

Das vertikale Absenken/Anheben des Viertelfahrzeug-Prüfstands wird durch eine Liftfunktion ermöglicht. Hierbei handelt es sich um einen elektrischen Spindelantrieb, welcher ferngesteuert den beweglichen Prüfstandsteil (Schlitten) in die vom Operator gewünschte Arbeitsposition bewegen kann. Wesentliche Betriebspositionen des Schlittens sind:

- Vollhub / Messrad maximal angehoben (frei hängendes Rad, Transportsituation)
- Teilhub / Messrad mit geringem Bodenkontakt (Radlast minimal, Skim-Test)
- Nullhub / Messrad vertikal frei unter Prüflast (regulärer Messbetrieb)

Mit dem Teilhub verbindet sich die Möglichkeit, ähnlich zum Prozedere der standardisierten Rollwiderstandsmessung den Bewegungswiderstand  $F_X$  bei drehendem Rad unter minimaler Radlast zu ermitteln. Der bei diesem Vorgang, bekannt als Skim-Test, auftretende Minimalwiderstand beziffert die durch überlagerte Störquellen erzeugte Messwertverfälschung; es handelt sich um Verlustanteile, die auch als parasitäre Effekte bezeichnet werden. Darin eingeschlossen ist z. B. bei einer Trommelmessung neben der Lagerreibung auch der Lüfterwiderstand, welcher bei Körperrotation in dichter Luftumgebung entsteht. Im bewegten Viertelfahrzeug leistet zudem auch die frontale Anströmung des Messrades einen Widerstandsbeitrag, der sich ebenfalls im Messwert von  $F_X$  niederschlägt und entsprechend revidiert werden muss.



**Bild 4:** Mobile Tire Lab ('MTL')

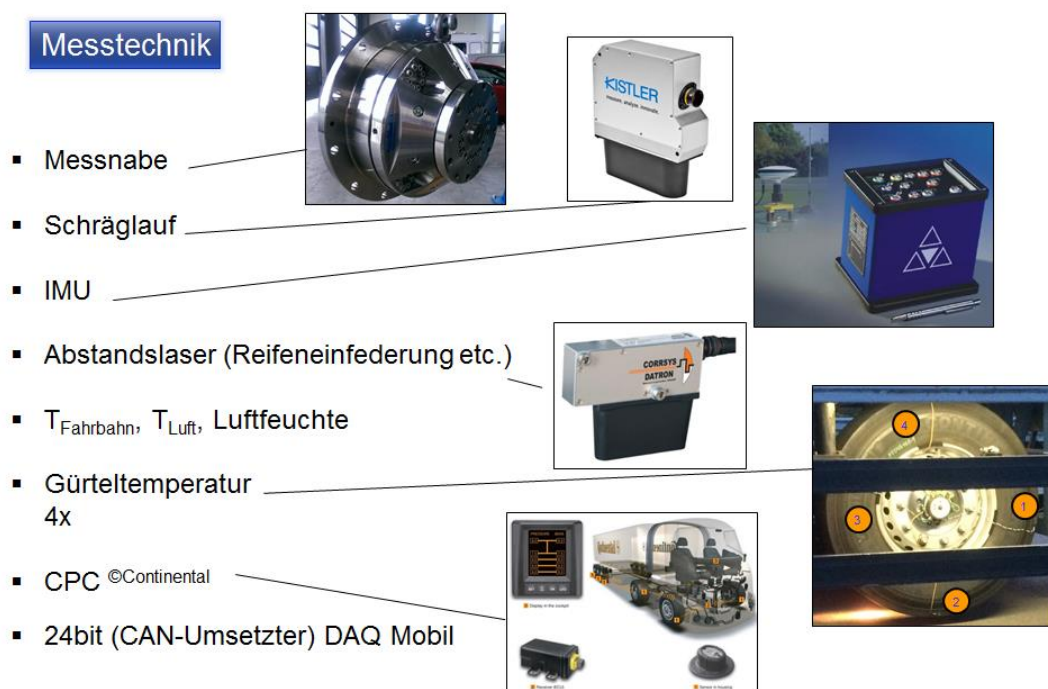
Der Luftstrom unterhalb des Anhängerbodens wird nicht durch besondere Leitbleche oder Abdeckungen umgeleitet oder gar verhindert. Eine solche Maßnahme wäre für das Messrad ein gravierender Eingriff in den Wärmehaushalt des Reifens, mit unmittelbaren Konsequenzen für den sich einstellenden Rollwiderstand. Durch seine Position in der Mittelebene des Zuges ist das Messrad vor direkter Sonneneinstrahlung indes gewollt geschützt.

Als Energiequelle für die am Auflieger installierten Elektro-Hilfsaggregate dient ein installierter Stromgenerator mit Verbrennungsmotorantrieb. Sowohl Dreh- als auch Wechselstrom stehen damit zur Verfügung. Die gesamte Messtechnik wird allerdings separat davon aus dem 24V Fahrzeug-Bordnetz gespeist.

Zur visuellen Überwachung und Beobachtung der Messradumgebung während der Fahrt ist ein Mehrkamera-Videosystem fest installiert, womit der Test-Operator vom Beifahrersitz aus per Monitor Sichtkontakt zum Messrad und auch Liftsystem halten kann.

## 4 Messtechnik

Am *Mobile Tire Lab* sind insgesamt 64 Messkanäle eingerichtet (**Bild 5**), deren Signale mehrheitlich permanent digital aufgezeichnet werden. Etwa 22 Messkanäle beinhalten Informationen zur Prüfstandssteuerung bzw. zu dessen Überwachung. Diese werden dem auf dem Beifahrerplatz tätigen Testoperator auf einem Kontrollmonitor visualisiert, wobei er über ein Bedienpanel sämtliche Stellfunktionen des im Sattelanhänger integrierten ‘Viertelfahrzeugs’ abrufen und beeinflussen kann.



**Bild 5:** Auszug aus ‘Messtechnik im Mobile Tire Lab’ (MTL)

Ein wesentliches Element der insgesamt aufwendigen Datenaquisition ist ein dezentral angeordneter CAN-Umsetzer (24 bit Auflösung) mit entsprechenden Eingängen für die verschiedenen Analogsensoren, wie beispielsweise jene zur Temperaturmessung, Weg- und Abstandsmessung. Alle Module mit eigenem CAN-Wandler, wie z.B. GPS-Tracker, IMU-Plattform, Schräglaufsensor (korrelationsoptisch) liefern digitale Signale über eine Kabelverbindung zum Fahrerhaus, direkt zur entsprechend konfigurierten Hardware des dort installierten DAQ-Systems. Dort ebenfalls angeschlossen ist das Reifendruckkontrollsystem CPC (Continental Pressure Check), womit alle Reifen des Zuges überwacht werden. Damit ist eine kontinuierliche Aufzeichnung sowohl der Drücke als auch der Temperaturen der Gasfüllung gewährleistet.

Von der auf Datenspeicher aufgezeichneten Vielzahl an Signalen sind nur 10 Verläufe kernrelevant, um final die im Fokus der Untersuchung stehende Größe >Reifen-Rollwiderstand< einschließlich der wesentlich beteiligten Zustandsgrößen beschreiben zu können, siehe **Tabelle 1**.

Nr	Zustandsgröße	Messort	Element	Anzahl
1	Rollwiderstand ( $F_x$ )	Radnabe	WFT	1
2	Radlast $F_z$ stat. + dyn.	Radnabe	WFT	1
3	Fülldruck	Reifen Torus	CPC	2
4	Gas-Temperatur	Reifen Torus	CPC	2
5	Materialtemperatur	Reifen Gürtelkante	Thermoelement + Telemetrie	3-4
6	Fahrbahntemperatur	Oberfläche Deckschicht	IR-Fühler	1
7	Umgebungstemperatur	Luft	Thermofühler	1
8	Raddrehzahl/Geschw.	Radnabe	n-Geber	1
9	Schräglaufwinkel	Radträger	Korrelationsoptik	1
10	Textur	Fahrbahn	Laser	1

**Tabelle 1:** Messgrößen für Zustandsbeschreibung Reifen-Rollwiderstand

Von den in Tabelle aufgelisteten Messgrößen erfordert die unter Position 1 symbolisch mit  $F_x$  bezeichnete Rollwiderstandskraft eine zusätzliche Erläuterung. Der Rollwiderstand des Reifens steht auch bei diesem Messverfahren nicht a priori unverfälscht ohne überlagerte Störeinflüsse unmittelbar zur Verfügung, sondern erst nach einer ausgeklügelten Datenaufbereitung in Kombination mit mehreren Sekundär-Messgrößen. Am Ende dieses Prozesses steht die reale Rollwiderstandskraft quasi netto als bereinigte Größe zur Verfügung. Alle hierfür erforderlichen Zusatzinformationen fließen zuvor in einen Korrekturalgorithmus, welcher das angewandte Kraftmessprinzip notwendigerweise grundlegend stützt. Die erreichbare Datenqualität und Messgenauigkeit hängt in



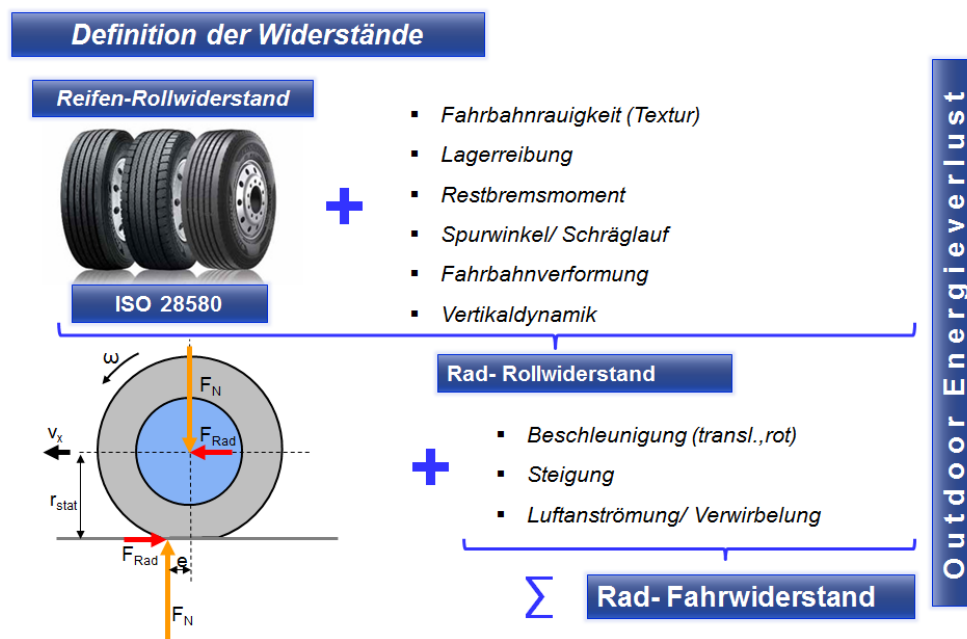
besonderem Maße von der Präzision einiger einflussreicher Nebengrößen ab. Zur Gruppe flankierender Hilfsgrößen zählt neben den hochauflösenden Lageparametern, wie Lotrichtung und Neigungswinkel mehrerer Bezugsebenen, nicht zuletzt das Reibmoment der wälzgelagerten Radnabe. Die bei Rotation auftretende Lagerreibung wird u.a. durch Drehzahl, Radlast, Temperatur und Viskosität des Schmieröls beeinflusst, deshalb erfährt diese Größe eine ausgesprochen hohe Aufmerksamkeit und wird zu jedem Zeitpunkt hochgenau ermittelt. Ein konventionelles, punktuelles ‘Skimming’ zur Bezifferung der Verluste durch parasitäre Begleiteffekte reicht in der vom stationären Prüfstand bekannten Vereinfachung nicht für den Anspruch einer hohen Präzision am ‘MTL’ aus, die möglichen Fehler wären hierbei viel zu groß.

Nur mit hinreichenden Erfahrungen in diesem Schlüsselbereich des ‘Gesamtverfahrens’ kann überhaupt das Potenzial der spezifisch an das Trailerfahrzeug angepassten mechanisch-elektronischen Prüfstandsstruktur erfolgreich genutzt werden.

Unter Hinweis auf die in Tabelle 1 aufgelistete Zustandsgröße Textur (lfd. Nr. 10) bleibt noch anzufügen, dass die diesbezügliche Sondereinrichtung bei den aktuellen Testaktivitäten des MTL nicht zum Einsatz gekommen ist.

## 5 Nebenwiderstände

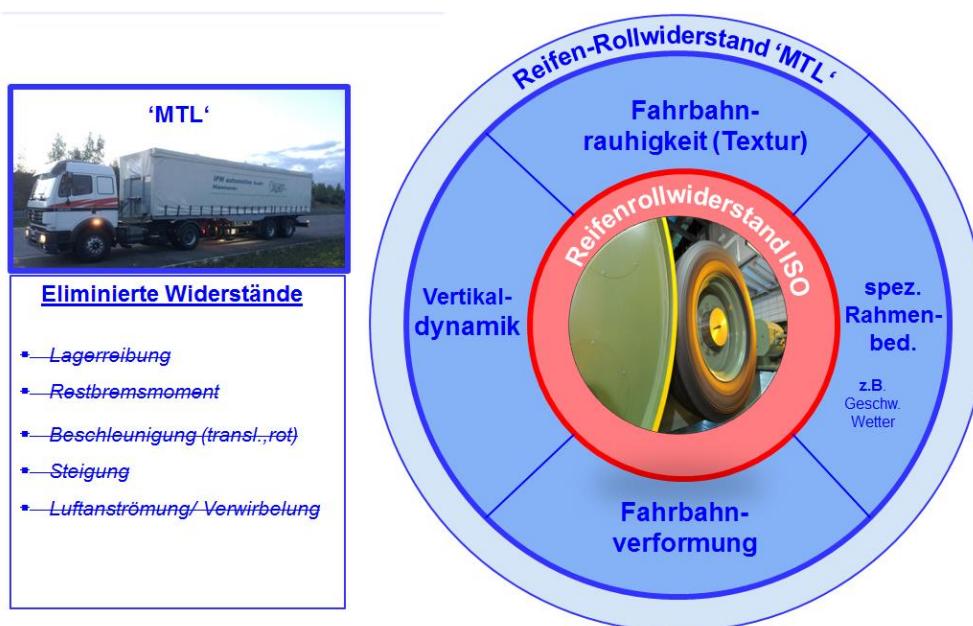
Bekannt ist, dass Betriebs- und Umgebungsbedingungen sich auf die Höhe des Reifen-Rollwiderstands auswirken. Anders als beim etablierten Standard-Messverfahren auf Stahltrommel, z.B. nach ISO 28580, weicht die Situation beim ‘Outdoor-Test‘ deutlich von den Laborbedingungen ab. Obwohl auch hier ebenfalls ein rotierendes Rad im Zustand ‘freirollend‘ betrachtet wird, treten bei der Fortbewegung in ‘natürlicher Umgebung‘ zusätzliche Widerstandskomponenten auf, die sich im Ergebnis einer darauf ausgerichteten Kraftmessung niederschlagen. **Bild 6** sind sechs mögliche Überlagerungseinflüsse benannt. Weitere Störgrößen wie Beschleunigung und Fahrbahnsteigung, aber auch Luftventilation und Luftanströmung kommen in der Praxis noch hinzu. Zu einer erkennbar wichtigen Differenzierung und auch inhaltlichen Abgrenzung des Terminus ‘Rollwiderstand‘ können die hervorgehobenen Begriffe Rad-Rollwiderstand und Rad-Fahrwiderstand beitragen, aber auch eine spezifische Definition bietet sich mit Blick auf das eingesetzte MTL für diesen Zweck an, wie nachfolgend beschrieben.



**Bild 6:** Definition Widerstände

## 5.1 Definitionsmerkmale Reifen-Rollwiderstand ‘MTL‘

Am ‘MTL‘ kann ein Restbremsmoment definitiv ausgeschlossen werden, da keine Bremsentechnik installiert ist, jedoch können sich einige andere der zuvor genannten Stör- bzw. Verlustquellen mit additiven Kraftanteilen niederschlagen, worauf streng geachtet wird (**Bild 7**). Störgrößen wie Beschleunigung und Steigung lassen sich bei genauer Kenntnis – was präzise Messwerte voraussetzt - sehr gut eliminieren, hingegen sind die Kraftkomponenten von Aero-Effekten wie Anström- und Ventilationswiderstand nur sequentiell im Testablauf separierbar. Beiträge dieser Effekte fließen gewöhnlich nicht in deklarierte Rollwiderstandsangaben ein, sie müssen ergo ausgegrenzt werden. Diese von standardisierten Messverfahren gewohnte Definition wird ebenfalls beim ‘MTL‘ herangezogen. Bei dem Prozedere mit der Bezeichnung Aero-Skim handelt es sich um einen speziellen Abschnitt innerhalb der Messprozedur, der in guter Näherung eine Elimination des Aero-Einflusses in der Kraftbilanz ermöglicht.



**Bild 7:** Reifen-Rollwiderstand ‘MTL‘

Die mit dem ‘MTL‘ gewonnenen Erfahrungen bestärken die Auffassung, dass insbesondere die parasitäre, von mehreren Faktoren abhängige Lagerreibung keinesfalls vernachlässigt werden darf. Diesbezüglich war es nur konsequent, diesem Aspekt von Anfang an der Entwicklung des mobilen Prüfstandes besondere Beachtung zu schenken. Darauf abgestellte messtechnische Maßnahmen haben sich als zielführend erwiesen. Das Maß der Lagerreibung ist jederzeit quantitativ nachvollziehbar.

So wie es die kreisförmige Darstellung in Bild 7 veranschaulichen soll, sind insbesondere die beim ‘MTL‘ eingebundenen Wechselwirkungen aus Fahrbahneinflüssen das zent-


rale Unterscheidungsmerkmal gegenüber der Standardmethode, bei der im Gegensatz zum mobilen Prüfstand ein translatorisch unbeweglicher Reifen auf einer glatten, gekrümmten Trommeloberfläche abrollt. Beachtenswert sind darüber hinaus grundsätzlich jedwede Unterschiede zwischen offenen oder reglementierten Rahmenbedingungen. Aus abweichenden Betriebsbedingungen können mehr oder weniger voneinander abweichende energetische Zustände resultieren – was immer mit Konsequenzen für die Höhe des sich einstellenden Rollwiderstandes verbunden ist.

## 6 Versuchsprogramm


Bei dem in **Bild 8** vorgestellten Testobjekt handelt es sich um einen handelsüblichen, modernen Trailerreifen der Dimension 385/65 R 22.5 in eingerolltem Zustand. Zur Vorbereitung gehörte das Präparieren mit mehreren im Bereich der Gürtelkante integrierten Temperatursensoren sowie die Installation von CPC-Modulen im Reifeninneren. CPC steht für das Handelsprodukt Continental Pressure Check, welches in diesem Projekt dafür benutzt wurde, um fortlaufend Druck- und Temperaturverläufe des Füllmediums ‘Luft’ (Gas) zu registrieren.

**Testobjekt**


### Continental EcoPlus HT3 385/65 R22.5



- eingerollter Neureifen
- Profilhöhe 100%
- CPC- Installation
- integrierte Materialtemperatursensoren (3x)

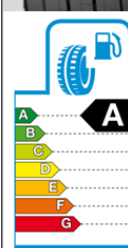


T Gürtelkante 3x



Conti CPC

Techn. Daten:	Felgenbreite	: 11,75"
	Abrolldurchmesser	: 1040mm
	Max Tragfähigkeit	: 4500kg@9bar
	Speed Index	: K
	Load Index	: 160



**Bild 8:** Versuchsobjekt im Programm ‘Matrix 2015‘

Im Mittelpunkt des vom Arbeitskreis AK4 aufgerufenen Versuchsprogramms ‘Matrix 2015‘ stehen zwei Arbeitsblöcke, die in **Bild 9** farblich differenziert dargestellt sind:

a) *STUFENPROGRAMM*

b) *SCHRÄGLAUF*

Eine Besonderheit der als Stufenprogramm bezeichneten Hauptaufgabe ist das zeitabhängige Geschwindigkeitsprofil, siehe Darstellung in **Bild 10**. Der Test umfasst 3 definierte Abschnitte mit konstanter Fahrgeschwindigkeit, welche ohne Unterbrechung mit schnellem Übergang zu absolvieren sind. Die Testdauer für den gesamten Zyklus beträgt 4 Stunden. Ausgangszustand bei Testbeginn ist jeweils der ‘kalte‘ Reifen unter Nenndruck. In Kombination mit den notierten Last- und Druck-Vorgaben ergibt sich

eine 3x2 Testmatrix. Wichtige Randbedingungen sind der trockene Fahrbahnzustand und die als Rundkurs angelegte Messbahn (Asphaltdecke). Die Mittelwerte der bei der Testabwicklung im Sept. 2015 auf dem Prüfgelände angetroffenen Umgebungstemperaturen weisen auf ein nicht einheitliches Temperaturniveau unterhalb von 20°C hin.

Bei dem in der Versuchsmatrix farblich markierten Abschnitt 'Schräglauf' handelt es


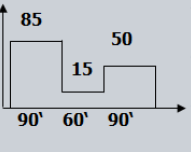
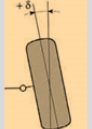
Versuchsmatrix						
Test	Reifen	Last [kg]	Druck [bar]	Zyklus	Datum	Umgebungsbedingungen
MTL-10	 Continental EcoPlus HT3 385/65 R22,5	4200	9,0	 90min@85km/h 60min@15km/h 90min@50km/h	21.09.15 14:48	trocken, Ø14,8°C
MTL-11			7,5		22.09.15 13:01	trocken, Ø19,2°C
MTL-12			9,0		23.09.15 15:47	trocken, Ø15,6°C
MTL-13		3000	7,5	22.09.15 17:39	trocken, Ø15,3°C	
MTL-14			9,0	24.09.15 15:31	trocken, Ø16,8°C	
MTL-15			7,5	24.09.15 20:43	trocken, Ø9,2°C	
MTL-16	 Spurwinkelvariation	4200	9,0	50km/h const.	21.09.15 19:10	trocken, Ø13°C
	85km/h const.					
	15km/h const.					

Bild 9: Versuchsmatrix

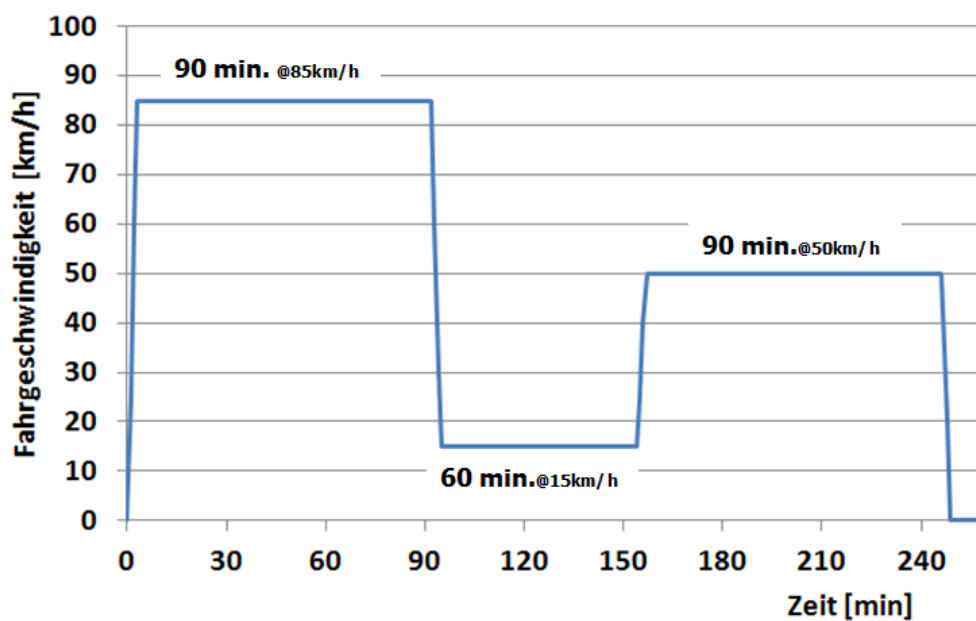


Bild 10: Stufentest

sich um Sondermessungen, welche das Schwerpunktthema >Rollwiderstand< praxisnah ergänzen. Außer dem reinen Reifen-Rollwiderstand soll exemplarisch der Anteil einer durch geringen Reifenschräglauf zusätzlich erzeugten Fahrwiderstandskomponente festgestellt und in Relation gesetzt werden, so die Vorgabe.

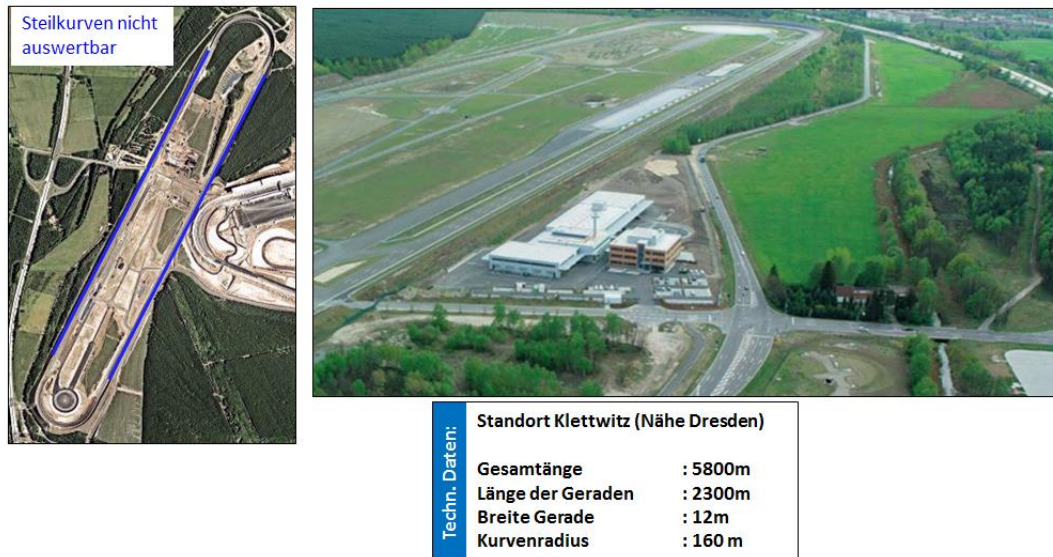
Durch Reifenseitenkräfte induzierte Kraftkomponenten, welche in der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs Fahrwiderstand erzeugen, betreffen in der Verkehrsrealität die Situationen:

- i) Geradeausfahrt mit Spurwinkel (Spurwiderstand)
- ii) Kurvenfahrt unter Schräglauf (Kurvenwiderstand).

## 7 Versuchsbedingungen

Alle Messreihen wurden mit dem “MTL“ im September 2015 auf dem Rundkurs des Dekra Prüfgeländes in Klettwitz durchgeführt, siehe Geländeinformationen in **Bild 11**.

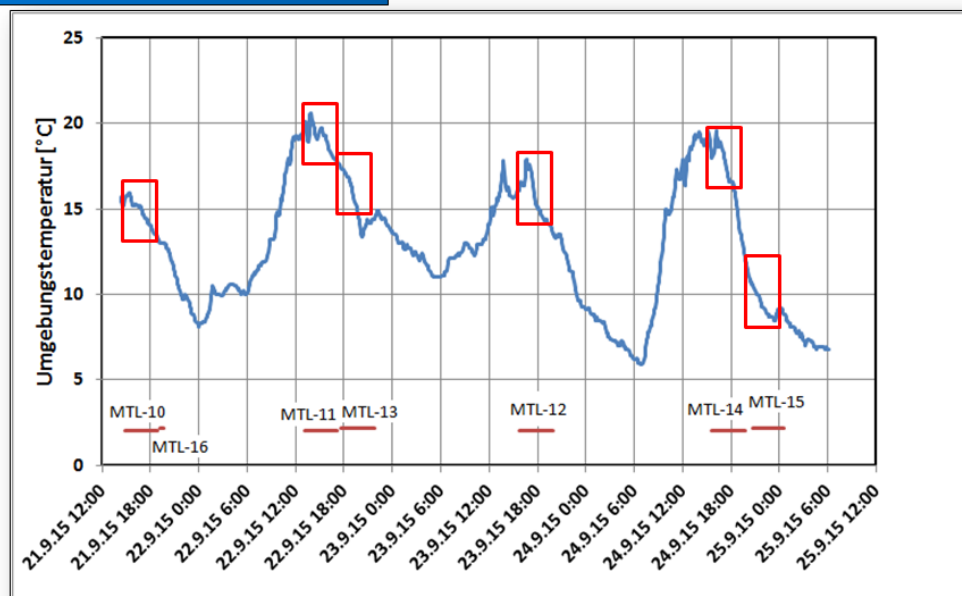
### Prüfgelände – Ovalrundkurs Dekra



**Bild 11:** Prüfgelände mit langen Geraden

### Umgebungstemperatur

Wetterstation Dekra



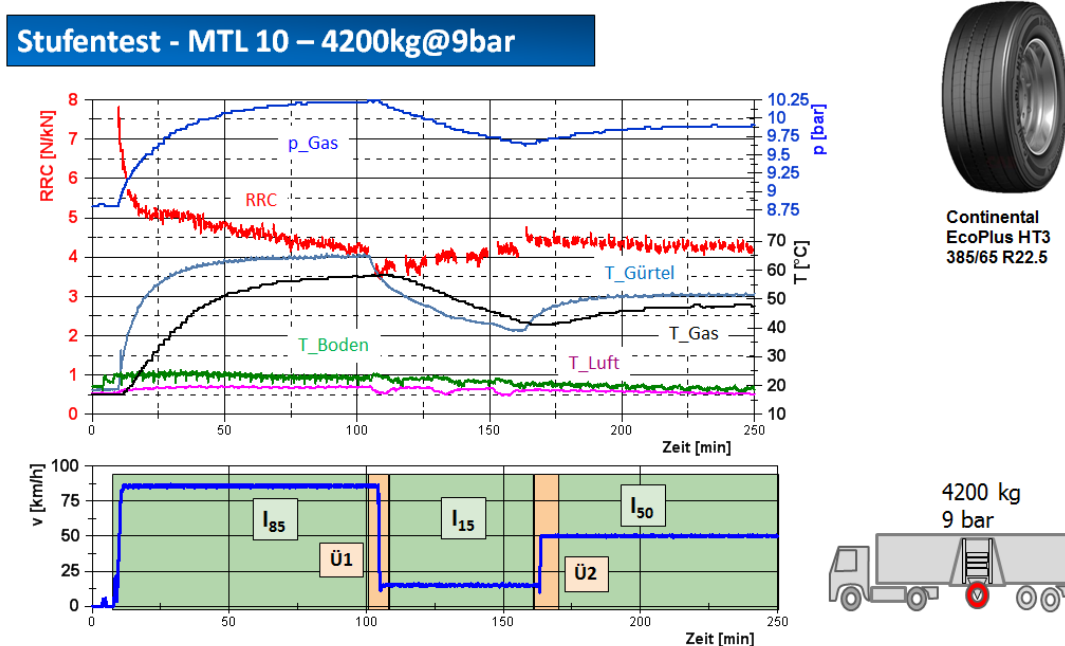
**Bild 12:** Umgebungstemperaturen bei der Testdurchführung



Die vor Ort von einer Wetterstation aufgezeichneten Lufttemperaturen (**Bild 12**) lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 13-21°C, nur während der letzten Messreihe, die erst in den Nachtstunden durchgeführt werden konnte, war die Temperatur mit Werten von 8-12°C auf ein tieferes Niveau gefallen. Auch die fortlaufend während der Fahrt ermittelten Temperaturen an der Oberfläche der Asphalt-Fahrbahndecke lagen im mittleren Temperaturbereich, sie sind im anschließenden Ergebnisteil jeweils hinterlegt.

## 8 Ergebnisse Stufentest

Das in **Bild 13** dargestellte Diagramm zeigt exemplarisch typische Verläufe einiger Messgrößen des rund 4-stündigen Tests. Im unteren Zeitfenster ist das umgesetzte 3-stufige Geschwindigkeitsprofil abgebildet, optisch hervorgehoben ist die Einteilung in 3 Hauptabschnitte (Intervall  $I_{85}, I_{15}, I_{50}$ ) mit schmalen Übergangszonen (Ü1, Ü2).



**Bild 13:** Verläufe von Messgrößen beim Stufentest (Beispiel)

Über die Gesamtdauer des dargestellten Tests liegt die registrierte Fahrbahntemperatur oberhalb der Lufttemperatur, wobei sich die Werte bei fallender Tendenz allmählich angleichen. Der Rückgang der Oberflächentemperatur von 24°C auf 19°C wäre beim ‘Indoor-Test’ ein Ausschlusskriterium, ist aber für eine Testumgebung in ‘freier Natur’ nicht ungewöhnlich, sondern typisch zeitvariant. Akzeptabel gering sind Temperaturverschiebungen zumeist nur bei zeitlich verkürzter bzw. blockweiser Betrachtung, wie im Intervall  $I_{85}$  sichtbar, mit einem dort weitgehend konstanten Temperaturverlauf.

Alle weiteren in **Bild 13** dargestellten Verläufe beschreiben den zeitlichen Ablauf der sich im Fahrbetrieb bei konstanter Fahrgeschwindigkeit und Radlast entwickelnden energetischen Zustandsveränderung des Reifens - ausgehend von einem bei 9 bar angesiedelten Kaltwert des Fülldrucks. Zu den beobachteten Größen gehören zwei Temperaturen, die von Gas und Material (Gürtelkante), ferner der Fülldruck und schließlich der ermittelte Rollwiderstand.

Am Verlauf der Materialtemperatur - zwischen 2 Gürtellagen erfasst - ist erkennbar, dass sofort nach Fahrtbeginn ein hoher Energieumsatz erfolgt, wobei sich das Material in dieser Schichtlage am Rand der Reifenhülle sehr schnell aufheizt, während das Gas im Torus sich träger und auch schwächer erwärmt.

Am Ende der ersten Geschwindigkeitsstufe, nach 90 Minuten Fahrdauer, befinden sich die Wärmeströme (Entstehung/Weiterleitung/Abfuhr) am Reifen bereits weitestgehend im Gleichgewicht. Der annähernd erreichte stationäre Wärmefluss schlägt sich in typischer Weise in der asymptotischen Annäherung des Rollwiderstandskoeffizienten (RRC) nieder. In Verbindung von zunehmender Fahrstrecke und demzufolge hoher Biegewechselanzahl wächst die Materialerwärmung, wobei gleichzeitig der Rollwiderstand zurückgeht.

Die im zweiten Abschnitt des Stufenprogramms ( $I_{15}$ ) erkennbaren Lücken beim Rollwiderstandsverlauf sind auf eliminierte Daten zurückzuführen, welche zu den nicht aussagekräftigen Passagen im Bereich der beiden Steilkurvensektionen gehören. Der mit 15 km/h gefahrene Zyklusabschnitt ist mit 60 min Dauer relativ kurz definiert, weshalb der thermische Ausgleich offensichtlich noch nicht vollständig abschließen konnte. Hinter der 'kurzen' Definition steht die Absicht, vor allem den Rückgang des Rollwiderstandes nach sprunghafter Fahrgeschwindigkeitsänderung (high/low) sichtbar machen zu wollen, ebenfalls auch die Tendenz während des anschließenden Anstiegs. Dieser Priorität genügt die festgelegte Zyklusdauer, wobei die Verkürzung es ermöglicht hat, den Zeitaufwand auf ein Maximum von 4 h Fahrzeit ohne Stillstand zu beschränken.

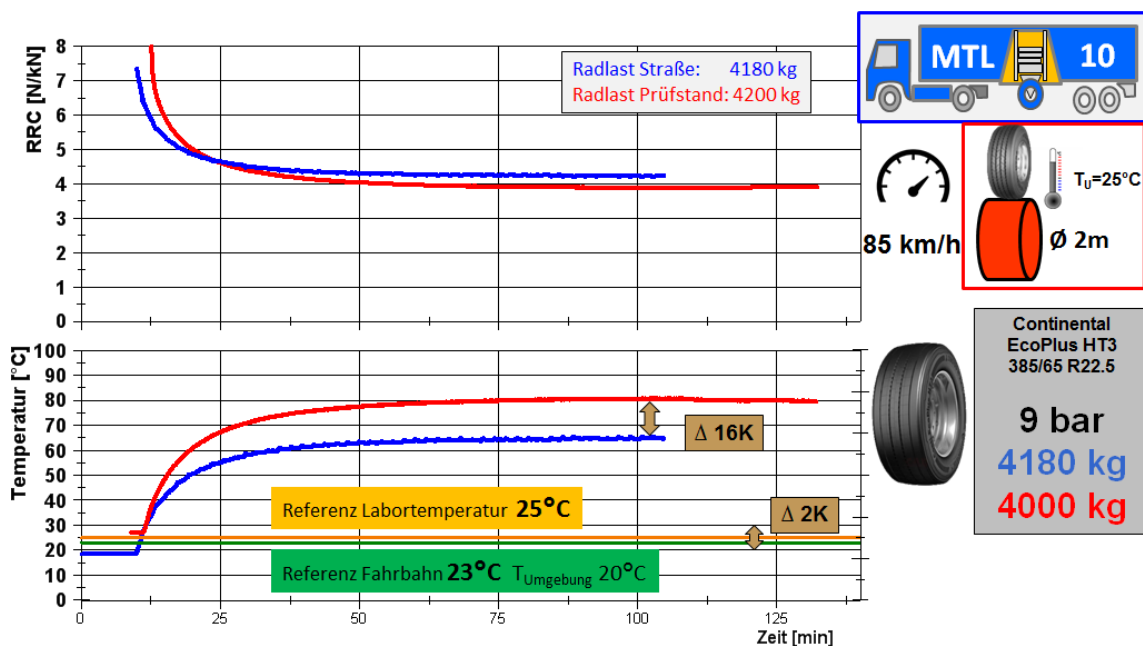
Der abrupte Rückgang des Rollwiderstandskoeffizienten in der Übergangsphase ( $\ddot{U}_1$ ) ist ein kurzzeitiger Effekt, welcher in Verbindung mit der sprungförmig abgesenkten Radrehfrequenz eine Folge des nun vorhandenen Wärmeüberschusses ist. Aus dem Geschwindigkeitswechsel ergibt sich für den Reifen eine intensive Störung der thermischen Balance mit folglich veränderten Wärmeströmen. Erst allmählich baut sich ein neuer Gleichgewichtszustand wieder auf. Es ist ein selbsttätig ablaufender Prozess, der nicht zuletzt vom Temperaturgefälle gegenüber der Umgebung beeinflusst wird und mehr oder minder viel Zeit beansprucht.

In ähnlicher Weise bedeutet auch der Geschwindigkeitssprung 'low/high' von 15 auf 50 km/h ( $\ddot{U}_2$ ) eine Störung der thermischen Balance, ebenfalls mit sichtbaren Konsequenzen für den Rollwiderstand. Das in dieser Situation angestiegene Rollwiderstandsniveau ist eine Folge der angehobenen Drehfrequenz, erst die allmählich zunehmende Materialerwärmung – erkennbar an den Temperaturverläufen - trägt im weiteren Verlauf zu einem stetigen Rückgang des Rollwiderstands bei. Am Ende des Testzyklus wird ein annähernd stationärer Betriebszustand für diese Geschwindigkeitsstufe erreicht. Soweit der erste Überblick zum Verständnis der im Folgenden aus den Stufentests abgeleiteten Zusammenhänge.

## 8.1 Warmlauf v=const. (85 km/h)

Der erste Abschnitt des 3-teiligen Stufentests wird als Warmlaufphase bezeichnet. Innerhalb des 2-stündigen Zeitfensters findet bei konstanter statischer Radlast und Fahrgeschwindigkeit ein stetiger thermischer Übergang vom Ausgangszustand ‘Reifen kalt’ auf ein höher gelegenes Temperaturniveau statt, wobei sich sowohl Wärmeaufkommen und Wärmeströme als auch die Wärmeverteilung im Reifen auf einen ausgeglichenen Zustand zubewegen. Thermodynamisches Gleichgewicht bedeutet hierbei stationäre Temperaturen bei Gas und Materialien, was im Idealfall konstante äußere Testbedingungen, zudem aber auch eine genügend lange Laufdauer voraussetzt. Für die in diesem Projekt gesuchten Antworten ist die aus Kompromissgründen auf ca. 100 min. verkürzte Zeitspanne ausreichend lang.

Aus den in **Bild 14** dargestellten Zeitverläufen wird deutlich, wie sich die ins Blickfeld gerückten Zustandsgrößen RRC und T unterscheiden, wenn der Warmlauf des Reifens mit  $v = \text{const.}$  (85km/h) einerseits unter konservativen Laborbedingungen auf einer Trommelanlage stattfindet, andererseits unter natürlichen Gegebenheiten auf texturierter, ebener Fahrbahn.



**Bild 14:** Warmlauf (85km/h) – Übergangverhalten “indoor vs. outdoor“

Der in beiden Fällen hohe Anfangswert des Rollwiderstandes ist primär vom niedrigen Temperaturniveau des Reifenmaterials zu Beginn geprägt, nicht zuletzt aber auch von der aufgezungenen hohen Drehrate. Letztere ist als Hysteresefrequenz für die Verlust-

rate von Bedeutung, allerdings vermindert sich der Rollwiderstand dank schnell zunehmender Materialerwärmung in kurzer Zeit intensiv.

Woran liegt es, dass das sich abzeichnende stationäre Rollwiderstandsniveau auf der Straße höher liegt als auf der gekrümmten Trommel im Testlabor, wenngleich dort bekanntlich erheblich mehr Walkarbeit am Reifen verrichtet wird? Um dieses Ergebnis ansatzweise zu verstehen, genügt ein Blick auf die Temperaturaufzeichnungen.

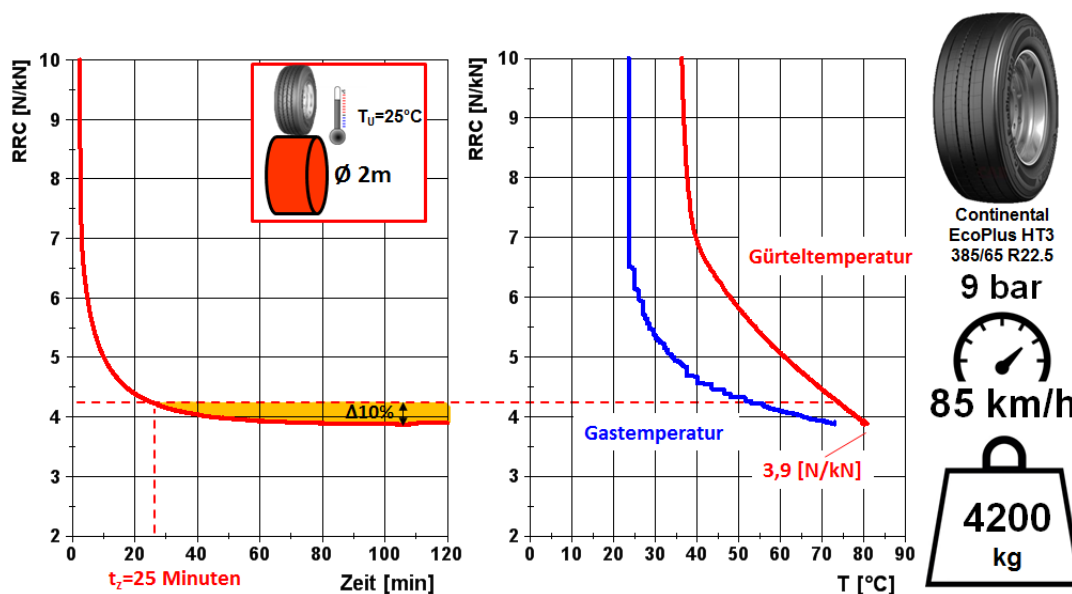
In beiden Fällen schreitet die Durchwärmung des Reifens zügig voran, allerdings steigen die Reifentemperaturen auf ein unterschiedlich hohes Niveau, hier sichtbar an der aussagekräftigen Materialtemperatur im Bereich der Gürtelkante. Unter konstant temperierten Umgebungsbedingungen (25°C) und ohne Fahrtwind hat sich auf der stationären Anlage ein Maximum von 81°C eingestellt, während das Niveau am fahrenden 'MTL' auf ebener, texturierter Fahrbahn 16 Kelvin darunter liegt. Es ist anzunehmen, dass die erhöhte Walkarbeit in Zusammenhang mit der gekrümmten Kontaktfläche zu diesem Temperaturdelta beiträgt, jedoch zumindest zwei weitere Effekte sind ebenfalls beteiligt:

- a) *Differierender Kühleinfluss durch unterschiedliche Luftanströmung*
- b) *Abweichende Temperaturlagen beider Kontaktpartner (Luft und Fahrbahn)*

Während sich die Testumgebung mit Blick auf die Fahrbahntemperatur mit 2 Kelvin nur gering unterscheidet, wirkt sich der Temperaturunterschied von 5 Kelvin beim Umgebungsmedium Luft über die bei dieser Fahrgeschwindigkeit hohe Fahrtwindanströmung offensichtlich intensiv auf den Wärmezustand des Reifens aus, was in diesem Zusammenhang Wärmeentzug bedeutet und eine Rollwiderstandserhöhung zur Folge hat.

Typisch für den instationären Vorgang 'Reifenwarmlauf' ist neben dem elementaren hyperbolischen Verlauf des Rollwiderstandes über der Zeitachse eine reifenspezifisch ausgeprägte Temperaturcharakteristik, welche in **Bild 15** beispielhaft für eine Standard-Warmlaufsituation im Labor dargestellt ist. Bereits nach 25 min. Laufdauer liegt der Rollwiderstand nur noch 10% oberhalb des später erreichten Stationärwertes. In natürlicher Umgebung unterscheidet sich das Zusammenspiel von Reifentemperatur und Rollwiderstand von dem im temperaturgeregelten Raum, was sich in den Zeitkonstanten niederschlägt. Im Vergleich wurden 'Outdoor' größere Zeitkonstanten ermittelt. Im Gegensatz zur dynamischen Entwicklung der Materialtemperatur wächst die Temperatur des sich träger aufheizenden Gases mit deutlicher Verzögerung, erst allmählich findet eine Annäherung an die stets höher liegende Materialtemperatur statt. Im linearen Finalabschnitt der Gastemperaturkurve ist erkennbar, dass sich die Steigungen beider Messgrößen deutlich voneinander unterscheiden. Die Rollwiderstandsänderung bei Änderung der Materialtemperatur (Gradient  $\Delta T/\Delta RRC$ ) ist hier im Vergleich zur Gastemperaturkurve deutlich stärker ausgeprägt. Die hohe Empfindlichkeit, die hohe Dynamik und die

in weitem Bereich annähernd lineare Ausprägung prädestinieren die technisch anspruchsvollere Temperaturmessung im Randbereich des Gürtels für eine eindeutige



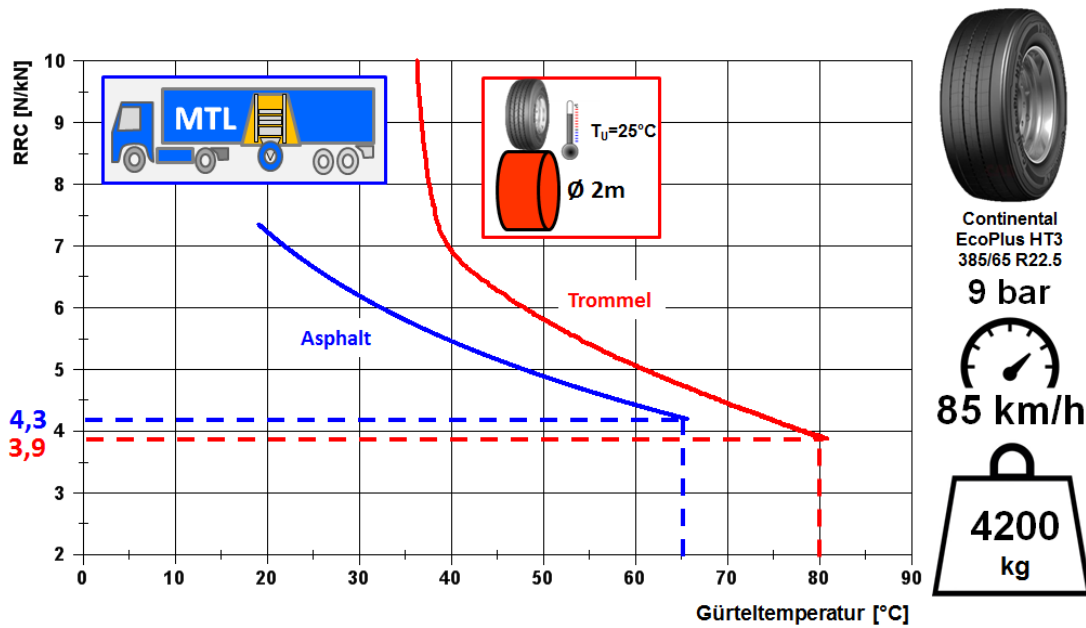
**Bild 15:** Warmlauf – Zusammenhang von Rollwiderstand u. Reifentemperatur

thermische Zuordnung von Rollwiderstand und Reifentemperatur. Diese Bevorzugung gilt auch mit Blick auf schulterbezogene Messungen, die ergänzend berührungslos (IR-Sensor) durchgeführt wurden, jedoch im Folgenden nicht berücksichtigt werden.

Die auf der Trommelanlage ermittelte Charakteristik  $RRC=f(T_G)$  für den im Mittelpunkt stehenden Trailerreifen basiert ebenso wie die erweiterte Gegenüberstellung in **Bild 16** auf einer von selbst ablaufenden zeitlichen Zustandsänderung. Der allmähliche Übergang in einen stabilen Zustand von Temperatur und Rollwiderstand verläuft unter natürlichen Bedingungen abweichend zu dem auf der Stahltrommel generierten Zusammenhang. MTL- und Indoor-Test liefern auf den ersten Blick zwar durchaus ähnliche Charakteristika, jedoch im Detail divergieren Steigungen und Eckwerte beider Kennungen.

Insgesamt, nicht nur in der Finalzone, mit einem jeweils nahezu linear ausgeprägten Zusammenhang zwischen beiden Zustandsgrößen, erweist sich der Reifen in Bezug auf Temperaturänderung in der Outdoor-Situation als weniger rollwiderstandsempfindlich!

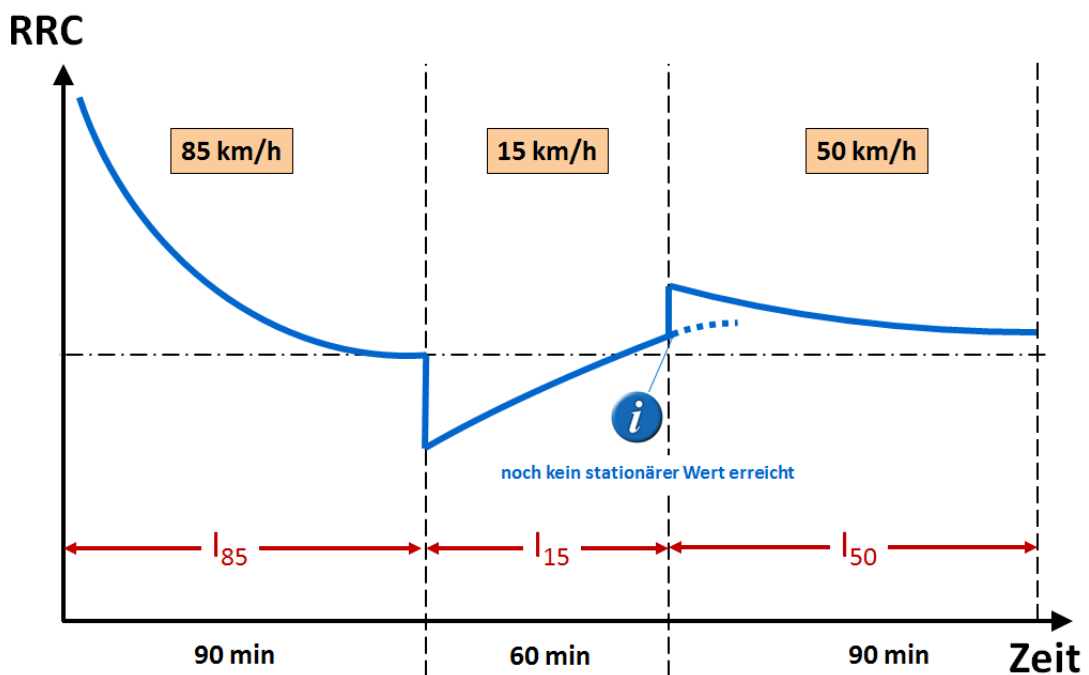
Diese Erkenntnis bezieht sich zunächst allein auf das in diesem Projekt untersuchte Reifenobjekt, wobei eine kausale Begründung der unterschiedlich intensiven Wechselwirkung grundsätzlich vorliegt, jedoch noch nicht vollständig abgesichert ist.



**Bild 16:** Warmlauf - Rollwiderstand u. Materialtemperatur “indoor vs. outdoor“

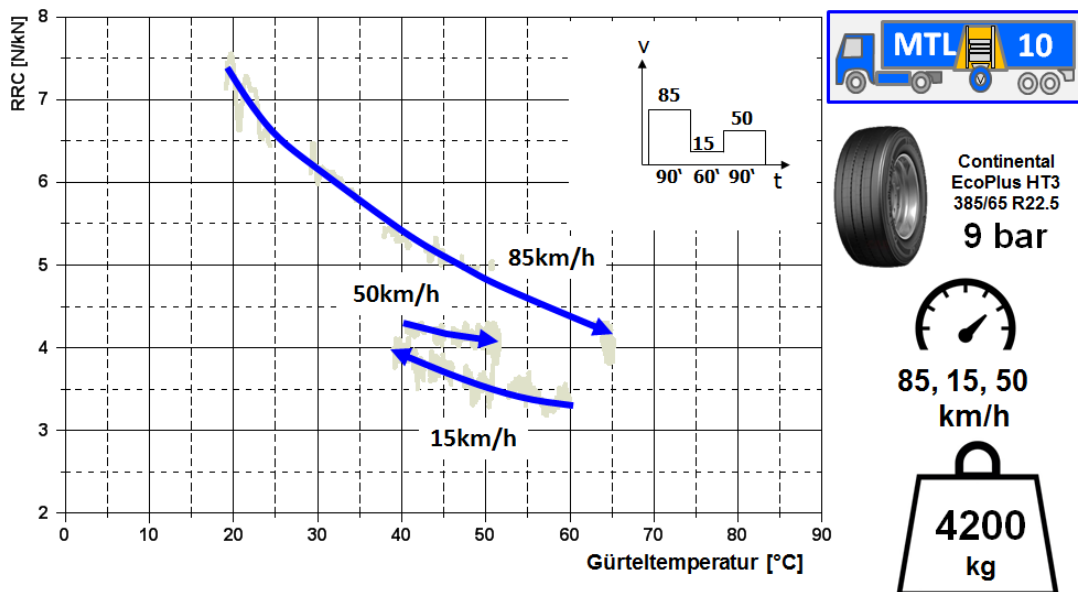
## 8.2 Übergang v-Sprung

Aus den durchgeführten Zyklustests mit 3 Fahrgeschwindigkeitsstufen lässt sich als anschauliches Ergebnis eine für jeden Abschnitt typische qualitative Entwicklung des Rollwiderstands aufzeigen, welche vereinfacht in **Bild 17** als Zeitverlauf wiedergegeben ist.



**Bild 17:** Stufentest – typische Ausprägung des transienten Rollwiderstands

Beginnend mit dem bereits vorab ausführlich behandelten Reifenwarmlauf im Intervall  $I_{85}$  mit  $v=\text{const.}$  (85km/h) stellt sich beim Wechsel der Geschwindigkeitsstufe ein signifikanter Rollwiderstandssprung ein, wobei innerhalb des Abschnitts  $I_{15}$  vorübergehend sehr niedrige Werte auftreten, mit nachfolgend allmählichem Anstieg. In entgegengesetzter Weise führt der folgende Geschwindigkeitswechsel von 15 auf 50 km/h zu einer unmittelbaren Rollwiderstandserhöhung, welche im zeitlichen Abstand langsam abklingt. Es handelt sich bei den betrachteten Übergangssituationen ursächlich um transiente Reaktionen als Folge eines gestörten thermischen Gleichgewichtszustandes, welche durch den sprunghaften Wechsel der Fahrgeschwindigkeit ausgelöst werden.



**Bild 18:** Stufentest – Interaktion von Geschwindigkeitswechsel, Materialtemperatur und Rollwiderstand

In den abschnittsspezifischen, skalierten Darstellungen von RRC über  $T_G$  (**Bild 18**) treten die wesentlichen Zusammenhänge in den Vordergrund, nun auch quantitativ. Beim verzögerungsbehafteten Übergang vom Geschwindigkeitsintervall  $I_{85}$  auf  $I_{15}$  fällt die Materialtemperatur um nur 5 Kelvin, allerdings verringert sich der Rollwiderstandskoeffizient infolge eines deutlichen Wärmeüberschusses im Reifen drastisch von ca. 4,2 auf unter 3,5 %. Warum überschüssige Wärme? Die Antwort darauf ergibt sich aus dem weiteren Kurvenverlauf ( $I_{15}$ ). Die niedrige Stufe von 15 km/h betreffend liegt das Niveau der Materialtemperatur im Zustand thermischen Gleichgewichts erheblich niedriger als 60°C, so der eingangs vorhandene Wert, was der Rückgang auf weniger als 40°C nach einstündiger Fahrt erkennen lässt. Der sich im Kurvenverlauf (15 km/h) abzeichnende Trend steigenden Rollwiderstands ist offensichtlich mit einer Reifenabkühlung



verknüpft, die Temperaturabsenkung geht aus dem zugehörigen unteren Graphen in Bild 13 hervor.

Gegenteilig löst der Sprung von 15 auf 50 km/h Fahrgeschwindigkeit abrupt einen Anstieg des Rollwiderstandes aus, welcher analog zum Verhalten bei Beginn der Warmlaufphase durch eine vorübergehend höhere Verlustarbeit – eine Folge der erhöhten Hysterese Frequenz – verursacht wird. Auch hier beweist der Trend eines fallenden Rollwiderstands den intensiven Einfluss zunehmender Materialerwärmung.

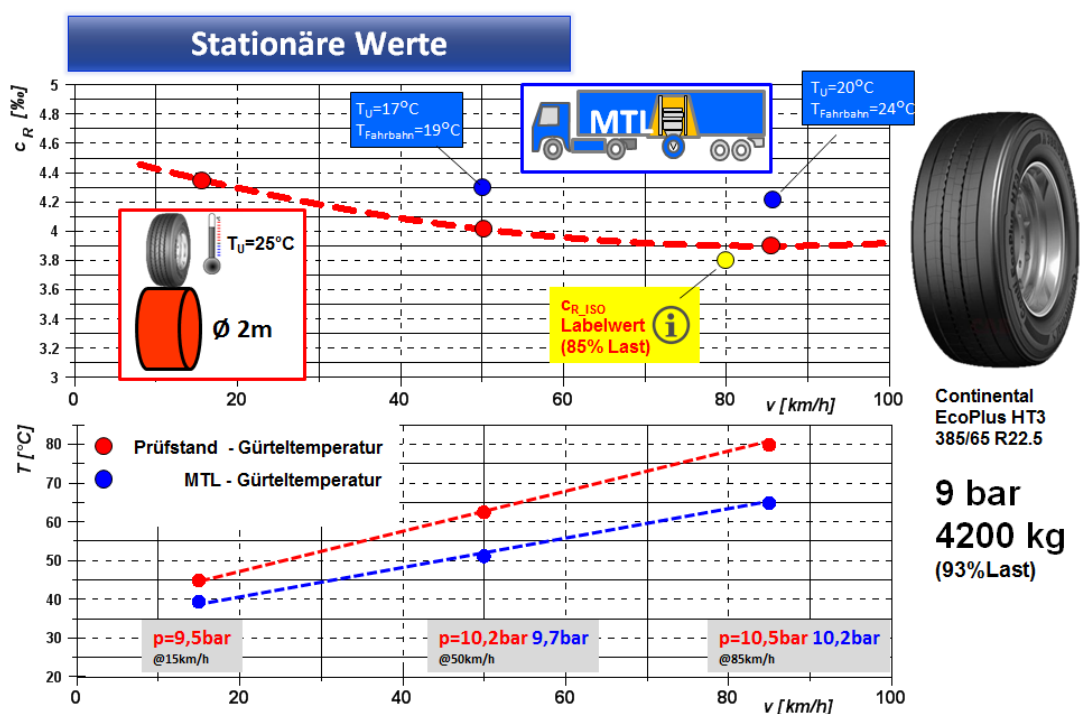
### 8.3 Stationäres Verhalten

Eine als >Stationärwert< bezeichnete Rollwiderstandsangabe ist wenig aussagekräftig, wenn nicht die den Testprozess begleitenden Rahmen- und Betriebsbedingungen vollständig definiert und bekannt sind. Der als stationär bezeichnete Zustand setzt immer voraus, dass sich die maßgeblichen Einflussfaktoren während des Betriebs zeitlich nicht ändern, was sehr gut im Synonym ‘Beharrungszustand‘ zum Ausdruck kommt. Zu den Konstanten des Testprozesses zählen bei Einsatz des MTL auf der Straße nur zwei steuerbare Betriebsparameter:

*Fahrgeschwindigkeit und statische Radlast,*

*während sich die Reifen-Zustandsgrößen zeitabhängig reaktiv entwickeln, beeinflusst von gegebenenfalls sich ändernden Umgebungsbedingungen.*

Das Motiv, das im Fahrversuch mit dem MTL beobachtete thermische Reifenverhalten dem von ‘Indoor‘-Messungen gegenüberzustellen, war Auslöser für eine separate Ver-



**Bild 19:** Stationärer Rollwiderstand – Geschwindigkeitseinfluss

suchsreihe von Rollwiderstandsmessungen, welche mit dem Testobjekt auf einer 2m Stahltrommel in klimatisierter Laborumgebung nachträglich stattfanden. Die dabei verfügbare Reproduzierbarkeit konstanter Versuchsbedingungen als auch die erreichbare hohe Messgenauigkeit auf dieser Anlage schlägt sich in wiederholt bestätigten Ergebnissen von 3 betrachteten Geschwindigkeitsstufen nieder, siehe obere Darstellung in **Bild 19**. Vermutlich aufgrund unterschiedlicher Lastbedingungen liegt der für  $v=80$  km/h deklarierte Labelwert nicht punktgenau auf der Näherungskurve  $c_R=f(v)$ .

Die dort dargestellte Funktion drückt lückenlos die punktuell ermittelte Geschwindigkeitsabhängigkeit des stationären Rollwiderstandskoeffizienten aus. Alle berücksichtigten Einzelwerte beruhen auf einem vorgeschalteten dreistündigen Warmlauf bei  $v$ =konstant. Qualitativ entspricht der Trend mit einem über ein breites Geschwindigkeitsband fallenden Rollwiderstand der bekannten Charakteristik dieser Reifenkategorie. Der Verlauf weist auf eine kontinuierliche Abnahme zwischen 15 u. 85 km/h hin, allerdings ist die Änderung mit weniger als 0,5 ‰ abs. relativ gering.

Ein weiteres Merkmal der Geschwindigkeitsabhängigkeit des stationären Rollwiderstandes ist der Kurvenumkehrpunkt, der vor dem Skalenende bei ca. 80 km/h erkennbar ist. Dieser Aspekt verdient Erwähnung, weil diese Eigenheit der Funktion  $c_R=f(v)$  eine Trendumkehr bedeutet, was in vergleichbaren Darstellungen häufig nicht erkennbar präsent ist - obwohl ein typisches Merkmal für das Reifenverhalten dieser Kategorie.

Oberhalb der 'Referenz-Laborkurve' sind in geringem Abstand zwei hinsichtlich Last, Fülldruck und Fahrgeschwindigkeit übertragbare stationäre Vergleichswerte hervorgehoben, die aus dem vorgestellten Stufentest in natürlicher Umgebung stammen. Beim Hinterfragen, warum diese Punkte höher angesiedelt sind, liefern die Temperaturzustände wichtige Informationen zur Erklärung, wie vorhergehend bereits erläutert.

Aus den Daten der während der Labor- und Zyklustests für 3 Geschwindigkeitsstufen aufgezeichneten Temperaturgrößen sind die ermittelten Endwerte im unteren Teil von Bild 19 aufgetragen. Die Verbindungsgeraden drücken den annähernd linearen Zusammenhang zwischen Materialtemperatur und Geschwindigkeit aus, demzufolge steigt die Reifenerwärmung in beiden Testsituationen proportional zur Raddrehzahl an.

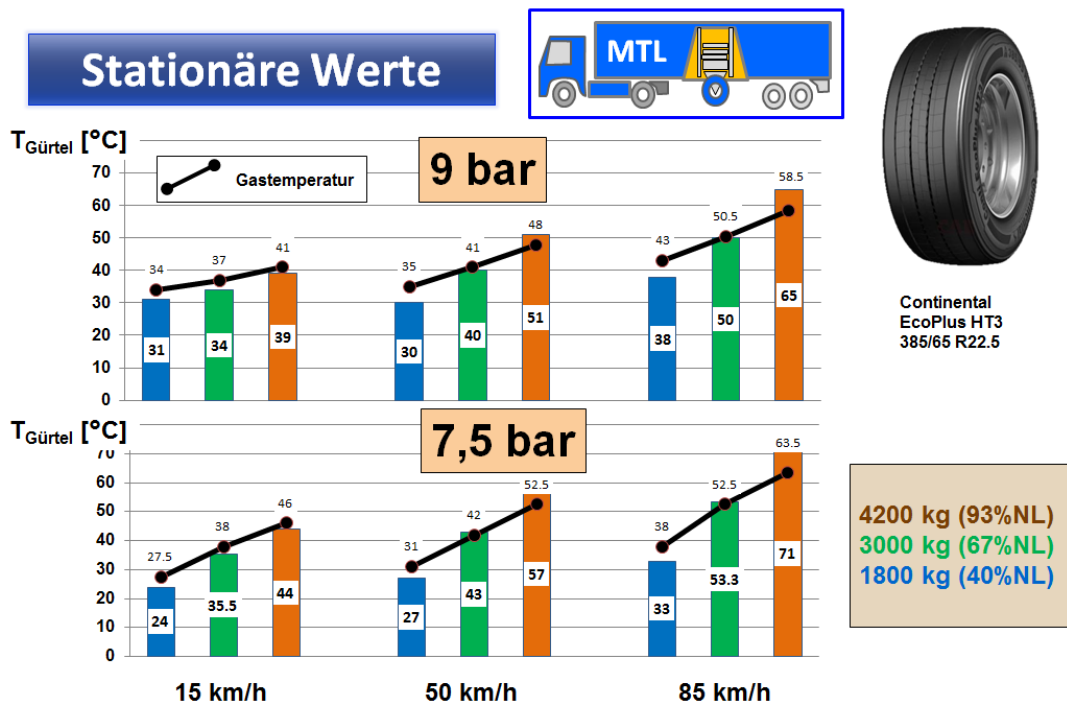
Es ist offensichtlich, dass die erreichten stationären Temperaturwerte beim Fahrversuch deutlich niedriger als beim Labortest liegen, wozu vordergründig 3 Mechanismen beitragen:

- a) Umgebungstemperaturen differieren ( $\Delta T$  Fahrbahn und  $\Delta T$  Luft)
- b) Anströmeffekte sind verschieden - Wärmeentzug höher bei Fortbewegung (Fahrt)
- c) Energieumsatz bei ebenem Reifenkontakt schwächer (geringere Walkverluste)

Hervorgegangen aus den Ergebnissen der 3x3x2 Matrix des durchgeführten Stufentestprogramms, veranschaulichen die Säulen in **Bild 20** die in freier Umgebung auf ebener

Fahrbahn final erreichten Temperaturwerte des Materials an der Gürtelkante. Ergänzend hierzu sind auch die festgestellten Stationärwerte der Gastemperatur aufgeführt.

Nicht nur der bereits vorgestellte Einfluss der Fahrgeschwindigkeit ist bei den Temperaturgrößen erkennbar, sondern, was zu erwarten war, auch eine Temperaturzunahme bei steigender Radlast; bei beiden Fülldruckvarianten qualitativ ähnlich ausgeprägt, jedoch graduell unterschiedlich.



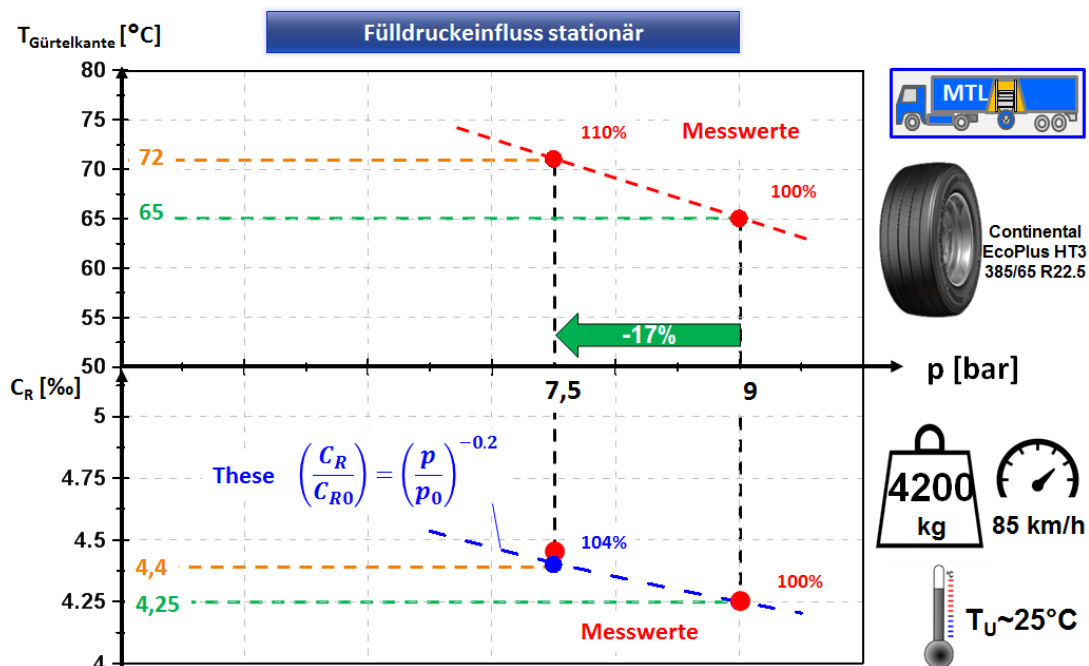
**Bild 20:** Material- und Gastemperatur – stationäre Werte beim Stufentest

Wie zuvor beschrieben, gleichen sich Gas- und Materialtemperatur während des Warmlaufs (85 km/h) zunehmend an, wobei die schnell steigende Materialtemperatur zunächst deutlich, desweiteren aber immer weniger über der Gastemperatur rangiert. Trotz der allmählichen Angleichung verbleibt die Materialtemperatur nicht grundsätzlich auf einem höheren Niveau, was sich nach Bild 20 auch nur bei hoher Last so eindeutig darstellt.

Offensichtlich hat sich beim mittleren Lastfall nahezu kein Temperaturunterschied zwischen Gas- und Material eingestellt. Im unteren Lastfall (40%NL) sind als Folge einer vermuteten, erheblich veränderten Wärmeverteilung relativ geringere Materialtemperaturwerte generiert, was aber nur bei der Variante '7,5 bar' ursächlich auf geringere Umgebungstemperaturen bei der Testdurchführung zurückzuführen ist. Eine Erklärung für das beobachtete lastabhängig unterschiedliche Temperaturverhalten könnten ggfs. begleitende Thermografieaufzeichnungen liefern, die zukünftig ein fester Bestandteil der Zustandserfassung sein werden.

### 8.3.1 Einfluss der Parameter Last und Fülldruck

Aus der exemplarischen Gegenüberstellung der Zusammenhänge von Temperatur und Rollwiderstandskoeffizient bei Fülldruckvariation (**Bild 21**) geht hervor, dass der für den Betriebsfall ‘7,5 bar’ ermittelte Rollwiderstandskoeffizient sich nah der Kurve befindet, welche als Graph der aufgeführten, bekannten empirischen Funktion die theoretische Lastabhängigkeit von RRC (gleichfalls  $c_R$ ) veranschaulicht.



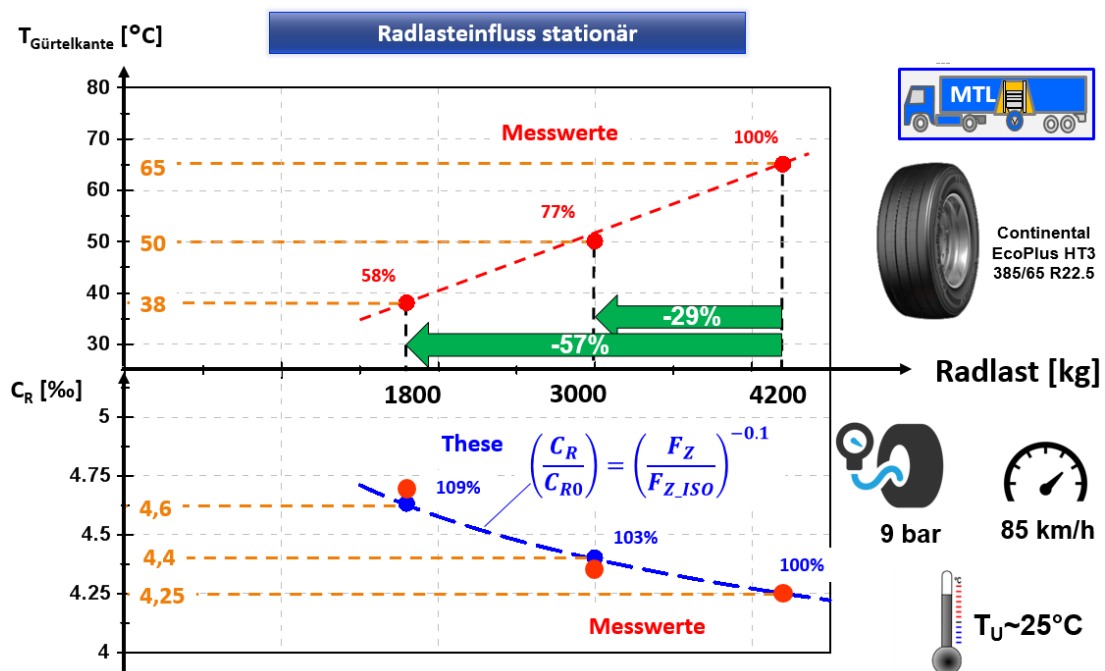
**Bild 21:** Stationärer Fülldruckeinfluss

Im Gegensatz zu den vorangehenden Eindrücken, dass eine erhöhte Materialtemperatur prinzipiell eine Rollwiderstandsminderung auslöst, zeigt sich hier das Gegenteil dessen. Es liegt in diesem Fall primär daran, dass die absoluten Energieverluste durch Walkarbeit (Hysterese) mit zunehmender Reifeneinfederung stark zunehmen, die daraus resultierende Temperaturzunahme jedoch nicht ausreicht, den zu leistenden Energieaufwand durch thermische Schwächung der Hystereseverluste zu kompensieren. Zudem trägt die Komponente ‘Reibung’ unter den spezifischen Bedingungen erhöhter Einfederung einen stärkeren Beitrag zum Rollwiderstand bei. Wärme, die durch zunehmende Reibung bei einfederungsbedingt vergrößerter Reifenlatschfläche in der Kontaktzone des Laufstreifens zur Fahrbahn entsteht, wird bevorzugt an die Umgebung abgegeben.

Als Ergebnis der vorgenommenen Druckabsenkung um 17% kann festgehalten werden: Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 85 km/h sind Reifentemperatur (Material) und Rollwiderstandsbeiwert erwartungsgemäß gestiegen,  $T_G$  um 10%,  $C_R$  um weniger als 4%. Für die Unterschreitung des theoretischen Wertes liefern die gegenüber dem Refe-

renztest (9 bar) nach oben gewanderten Umgebungstemperaturen eine stichhaltige Begründung.

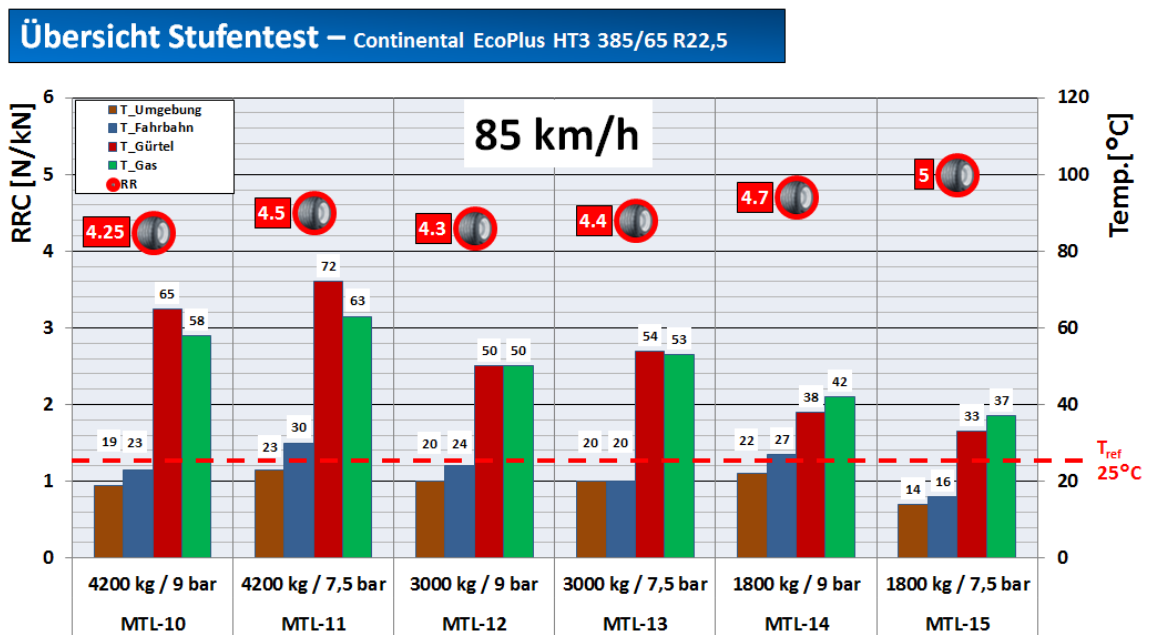
Die Zunahme des Rollwiderstandskoeffizienten bei Verringerung der Last zeichnet sich im unteren Teil von **Bild 22** ab. Gegenläufig, im Vergleich zum vorgestellten Fülldruckeinfluss, ist bei dieser Betriebsvariante der Kurventrend abnehmenden Rollwiderstands mit einer zunehmenden Reifentemperatur verknüpft. Auch bei der Lastvariation ist der ausgelöste thermische Effekt eine Folge zunehmender Reifeneinfederung, Ursache des Temperaturanstiegs ist jedoch der verstärkte Energieumsatz durch vermehrte Materialverformungsarbeit (Walken).



**Bild 22:** Stationärer Radlasteinfluss

Ausgehend vom Referenzlastfall (4200 kg) hat die vorgenommene 2-stufige Lastverringernung grundsätzlich zu einer Abnahme von Reifentemperatur und auch Rollwiderstandsbeiwert geführt. Beispielsweise wurde über die Lastabnahme von 57% die Reifentemperatur erheblich reduziert (-42%), dennoch hat diese intensive thermische Auswirkung den Rollwiderstandsbeiwert nur wenig beeinflusst. So ist der Absolutwert im direkten Vergleich nur relativ gering von 4,25 ‰ auf weniger als 4,6 ‰ angestiegen. Dabei wird der zu diesem Kurvenpunkt benannte theoretische Wert sogar unterschritten, was hier jedoch nicht auf unterschiedliche Umgebungstemperaturen während der Messung zurückgeführt werden kann.

Einen Überblick über die im angestrebten Beharrungszustand erzielten Rollwiderstandswerte - einschließlich der äußeren Temperaturbedingungen – erfährt der Leser abschließend in konzentrierter Form in **Bild 23**. Darin sind alle Untersuchungen der Geschwindigkeitsstufe 85 km/h berücksichtigt. Abgesehen von 2 Testreihen (7,5 bar, 1800 et. 3000 kg) haben alle bei den Variationen von Last und Fülldruck erzielten Teilergebnisse die beiden empirischen, exponentiell geprägten Abhängigkeiten als validen Trend weitgehend bestätigt, was nicht zuletzt an den in diesen Fällen relativ ähnlichen Versuchsbedingungen während der Testausführung gelegen haben wird.



**Bild 23:** Stationäre Rollwiderstandsbeiwerte untersuchter Last-/Druckvarianten

## 9 Ergebnisse Spurwiderstand

Bei einer standardisierten Rollwiderstandsprüfung stehen die Mittelebenen von Rad und Trommel parallel zueinander. In den entsprechenden Reglements wird eine Ergebnisverfälschung durch Radsturz und Reifenschräglauf über eine enge Tolerierung der geforderten Parallelität ausgeschlossen, der Grenzwert liegt nach ISO 28580 bei nur 1 mrad. Dieser Teil der Spezifikation trägt so dazu bei, von außen aufgezwungene Reifenseitenkräfte als Folge von Radschräglauf und –sturz zu vermeiden. Aber auch Verfälschungen durch longitudinale Kraftkomponenten von reifenimmanent erzeugten Seitenkräften - wie Plysteer und Konussteer - sind dadurch verhindert. Deren Beiträge könnten den Rollwiderstand beeinflussen, wenn Längskraftkomponenten infolge Schrägstellung entstünden. Das gestürzte Rad wird fortan nicht betrachtet.

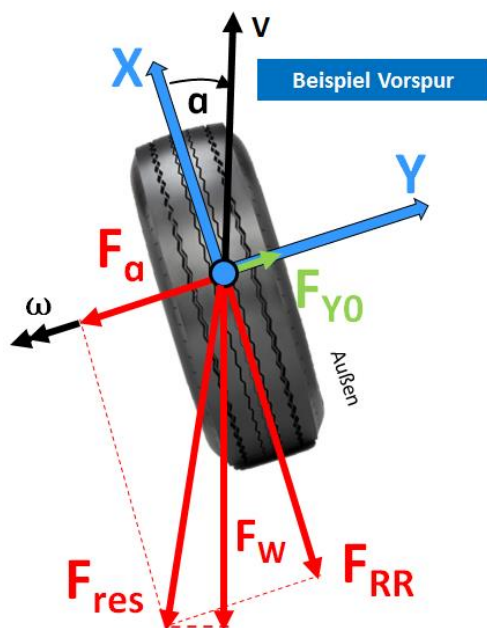
Die bei Nutzfahrzeugen vom Hersteller festgelegten Achsgeometriewerte entsprechen nicht zwingend der Alltagssituation von Fahrzeugen im Verkehrseinsatz. Aus verschiedenen Gründen sind Einstellungsabweichungen möglich, die zu einer Anhebung des Fahrwiderstandes führen können - begleitet von erhöhtem Kraftstoffverbrauch und auch Reifenverschleiß. Unabhängig von der Fahrsituation - ob Geradeausfahrt oder Kurvenpassage – der hierbei auftretende Reifenschräglauf erzeugt prinzipiell Seitenkräfte in der Aufstandsfläche, welche in situ den Radwiderstand erhöhen und damit den Fahrwiderstand des Fahrzeugs anheben. Die Energiedissipation betreffend ist der Schräglaufwiderstand eine wichtige Komponente, insbesondere dann, wenn überhöhte Spurgeometriefehler vorliegen und/oder sich derartige Mängel dauerhaft parasitär auswirken.

Sowohl bei Geradeaus- als auch Kurvenfahrt verursacht Schräglauf einen additiven Bewegungswiderstand, der zusätzlich zum Reifen-Rollwiderstand die Energiebilanz belastet.

Bezogen auf die Fahrsituation Kurvenfahrt bezeichnet der Begriff ‘Kurvenwiderstand’ den hierbei durch Schräglauf partikulär erzeugten spezifischen Radwiderstand.

Mit dem Begriff ‘Spurwiderstand’ verbinden sich Schräglaufwinkel von normalerweise nur geringer Quantität, welche bei Geradeausfahrt permanent vorliegen. Das Erreichen bestimmter Radführungseigenschaften setzt definierte Achsgeometrieparameter voraus, wobei der Radspurwinkel – festgelegt als Einzel- und Gesamtspur - insbesondere an Lenkachsen ein wichtiges Element ist. Der statische Einstellwert kann seitens des OEM sowohl als Vor- oder auch Nachspur deklariert sein. Als Folge elastokinematischer Eigenschaften kann es bei fahrdynamischer Beanspruchung darüber hinaus zu vorübergehend veränderten Radstellungen kommen, was durch konstruktive Maßnahmen jedoch gezielt beeinflussbar ist und von vornherein entsprechend berücksichtigt wird.

Demgegenüber können im Fall einer gestörten Achsgeometrie dauerhafte Abweichungen vom statischen Soll-Spurwinkel auftreten, wobei durch die permanente Fehlstellung der Energieaufwand für die Fortbewegung deutlich steigen kann. In welchem Maße selbst bei nur geringen Spurwinkelwerten der Fahrwiderstand ansteigen kann, soll im Folgenden durch Messdaten im Vergleich zum Reifen-Rollwiderstand exemplarisch dargelegt werden.



**Bild 24:** Einwirkende Kräfte am Reifen

So wie es die Draufsicht in **Bild 24** mit den am rechten Vorderrad unter Vorspur angreifenden Kräften darstellt, treten am rollenden Reifen Kontaktkräfte in der x/y-Ebene auf, die von der Radmessnabe am 'MTL' in beiden Hauptrichtungen getrennt erfasst werden. Bei der Komponente  $F_{\alpha}$  handelt es sich um die durch Schräglauf erzeugte Seiten- bzw. Querkraft, während  $F_{RR}$  um  $90^{\circ}$  versetzt als Rollwiderstandskraft bzw. Längskraft parallel zur Radmittelebene einwirkt. Gemeinsam ergeben beide Teilkräfte die resultierende Kraft  $F_{res}$ , deren Projektion auf den Vektor der Fahrgeschwindigkeit den Bewegungswiderstand des Rades  $F_W$  kennzeichnet.

Auch in der Messpraxis, wo die Teilkräfte beider Hauptachsen unter Berücksichtigung des Winkelwertes ( $\alpha$ ) einzeln auf den Vektor der Fahrgeschwindigkeit projiziert werden, ergibt sich ebenfalls in Summe der Bewegungswiderstand des Rades  $F_W$ . In dieser Betrachtung setzt sich somit die Summe zusammen aus den Beiträgen von

a) *Spurwiderstand* und b) *Reifen-Rollwiderstand*.

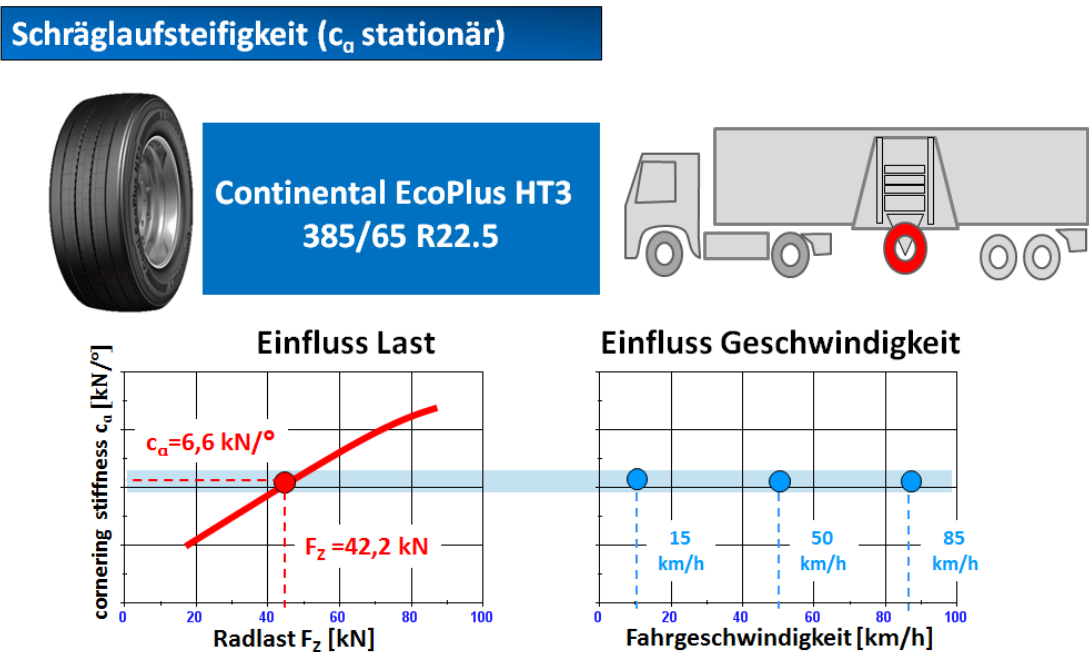
Vollständigkeitshalber ist die sogenannte Nullseitenkraft  $F_{Y0}$  aufgeführt, die in Annahme geringer Bedeutung als laterale Einflussgröße zumeist vernachlässigt wird, jedoch im Folgenden (ohne Konus-Anteil) Berücksichtigung finden soll. Normalerweise wirkt der Plysteer-Anteil der Nullseitenkraft wie dargestellt in Richtung Fahrbahnrand - so zumindest ist der Effekt bei Reifenprodukten für den Markt mit Rechtsverkehr von vornherein implementiert.

Der am Einzelrad im Versuch nur indirekt bestimmbare Spurwiderstand ergibt sich aus den Messgrößen Seitenkraft  $F_{\alpha}$  und Schräglaufwinkel  $\alpha$ . Werden beide Signalverläufe übereinander aufgetragen, lässt sich bekanntlich aufgrund des proportionalen Zusammenhangs für den Linearabschnitt eine Steigung angeben, die als Schräglaufsteifigkeit



oder auch als ‘cornering stiffness‘ ( $c_a$ ) bezeichnet wird. Der eingengte Definitionsbereich erstreckt sich über ein schmales Feld von nur  $\pm 1^\circ$  um den Winkelwert Null herum.

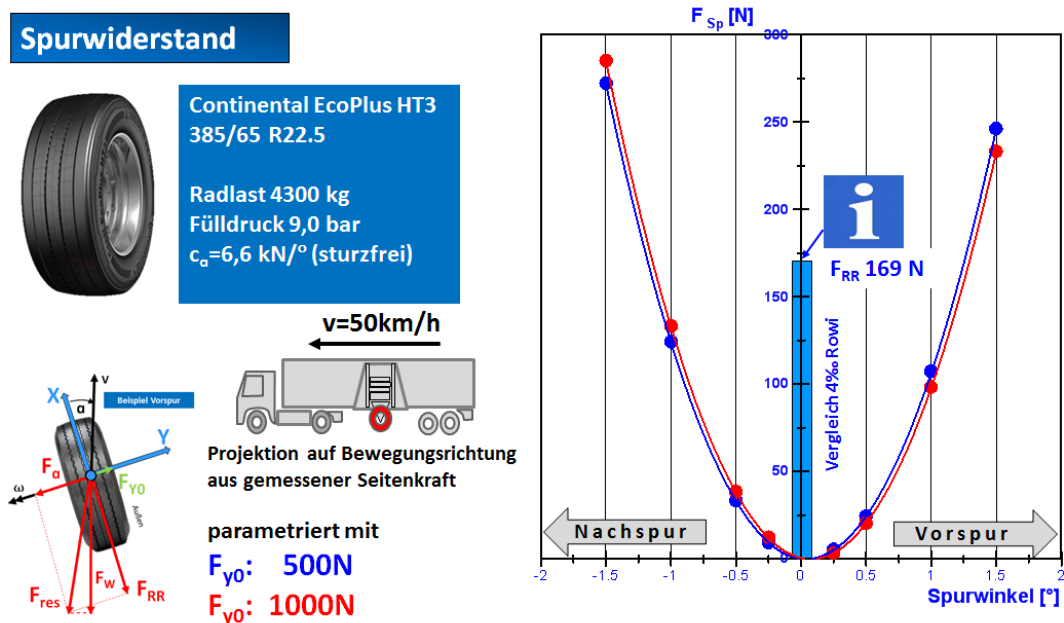
In hohem Maße abhängig ist die Schräglaufsteifigkeit von der Radlast, siehe **Bild 25**, hingegen kaum von der Fahrgeschwindigkeit. Als wichtiger Hinweis sollte hier nicht fehlen, dass der stationär angelegte Test eine nur langsame, quasistatische Schräglaufänderung bedingt, was bei der Durchführung berücksichtigt wurde. Nur bei zudem geringer Schräglaufwinkelamplitude ist eine verfälschende, hohe thermische Aufheizung des Reifens vermeidbar, was zudem den Profilstreifen in Bezug auf Abrieb schont. Dynamische Effekte sind im Rahmen dieser Vorgehensweise ausgeschlossen, dabei ist eine durchgeführte Prekonditionierung des Reifens allerdings Voraussetzung.



**Bild 25:** Eruierte Schräglaufsteifigkeiten

Für die Höhe des Spurwiderstandes bedeutet die quadratische Abhängigkeit vom Spurlinienwinkel einen progressiven Anstieg, unabhängig davon, ob als Vor- oder Nachspur definiert, siehe **Bild 26**. Unter den Bedingungen des dargestellten Beispielfalles wird das in Säulenform zum Vergleich abgebildete Reifen-Rollwiderstandsniveau von 169 N (4% der Radlast) zunehmend überschritten, wenn der Reifenschräglauf einen Betrag von mehr als  $1,3^\circ$  angenommen hat.

Die Asymmetrien beider Parabeln zum Nullpunkt des Winkels sind eine Folge der Plysteer-Nullseitenkraft, die hier anschauungshalber in 2 unterschiedlichen Intensitäten berücksichtigt wurde. Zwar lässt die gewählte Parametrierung von 0,5 bzw. 1 kN nur einen geringen Einfluss erkennen, jedoch scheint es offensichtlich, dass eine hohe Nullseitenkraft die Parabel auf der Abszisse nach rechts verschiebt.

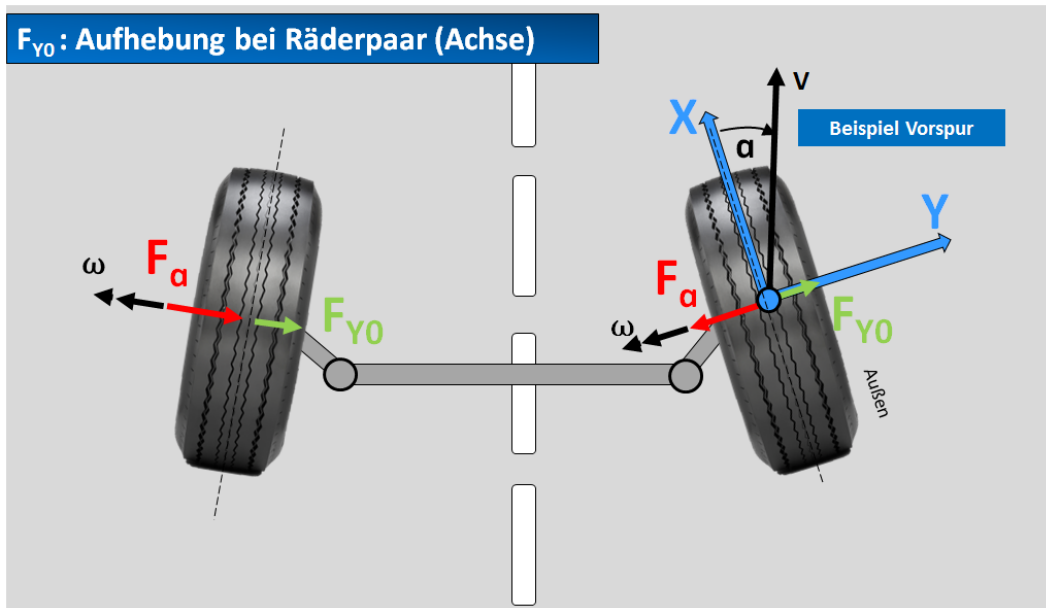


**Bild 26:** Gegenüberstellung von Reifenroll- und Spurwiderstand

Ist es demzufolge tatsächlich möglich, dass Vorspur sich weniger stark hemmend auswirkt als ein gleich hoher Nachspurwert? Hinsichtlich des betrachteten einzelnen Rades ist dieser erste Eindruck zwar richtig, nicht jedoch bei vollständiger Betrachtung der Achse, wenn das Rad der gegenüberliegenden Achsposition die gleiche Eigenschaften aufweist, wie in **Bild 27** für eine positive Gesamtspur (Vorspur) skizziert. Dort an der linken Achsseite addieren sich Schräglauf- und Plysteer-Seitenkraft, an der rechten hingegen wirken diese antimetrisch und mindern somit die resultierende Lateralkraft. Hinsichtlich der vorgestellten partiellen Asymmetrie des Spurwiderstandes ergibt sich daraus eine Aufhebung, wenn die Achse als ganzes System mit beiden Rädern gemeinsam betrachtet wird.

Unabhängig ob Vor- oder Nachspur, bei gleichem Plysteer-Betrag auf beiden Seiten ist der achsweise Spurwiderstand in beiden Fällen gleich hoch. Dass die vorgestellte Situation nicht als zwingend, sondern als Sonderfall angesehen werden sollte, ergibt sich aus der in Wirklichkeit nur ausnahmsweise anzutreffenden Übereinstimmung von 2 Rädern in Bezug auf gleichermaßen vorhandene Nullseitenkräfte. Bei hochwertiger Reifenqua-

lität und dementsprechend nur geringen Kraftbeträgen ist der Aspekt der Nullseitenkräfte in Zusammenhang mit dem Widerstandseinfluss nahezu unbedeutend.



**Bild 27:** Achsweisen Betrachtung der einwirkenden Radkräfte

## 10 Resümee

In dem hier berichteten Projekt wurde das von IPW automotive GmbH entwickelte Spezialfahrzeug Mobile Tire Lab ('MTL') für Rollwiderstands-Messreihen in natürlicher Fahrumgebung eingesetzt. Dem bearbeiteten Aufgabenpaket liegt eine Beauftragung der Forschungsgemeinschaft Automobiltechnik (FAT) zugrunde.

Die vom Arbeitskreis 4 unter Leitung des Obmanns, Herrn Bernd Lange, beschlossenen Leistungsinhalte umfassen insgesamt 2 Teilaufgaben, die als Stufentest und Spurwinkeltest deklariert sind. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht ein Standard Trailerreifen der Dimension 385/65 R22.5 mit integrierter Druck- und Temperatursensorik.

Mit dem Arbeitsschwerpunkt >Stufentest< verbinden sich Rollwiderstandsmessungen auf trockener Asphalt-Fahrbahn bei konstanter Fahrgeschwindigkeit, allerdings nacheinander in Stufen von 85, 15, 50 km/h in festen Zeitintervallen über insgesamt 4 h Dauer unterbrechungsfrei durchgeführt. Variationsparameter: Fülldruck und Radlast.

Die sämtlich auf dem Ovalrundkurs des Dekra Prüfgeländes in Klettwitz durchgeführten Messreihen wurden in Eigenregie des Auftragnehmers durch Prüfstandsmessungen ergänzt. Hierbei konnte ein und dasselbe Reifenexemplar in klimatisierter Umgebung auf einer Trommelanlage gezielt nachuntersucht werden.

Die durchgeführte Ergebnisanalyse beruht auf einer Einteilung in Zustandsgruppen:

- Warmlauf bei  $v = \text{const. } 85 \text{ km/h}$  als instationärer Vorgang
- Übergangsverhalten als  $v$ -Sprung abwärts/aufwärts, ein transientes Ereignis
- Stationäres Verhalten

**Warmlauf.** Die Gegenüberstellung von Indoor- und Outdoortest konstatiert deutlich divergierende Reifentemperaturen, selbst der charakteristische Zusammenhang von Temperatur und Rollwiderstand unterscheidet sich qualitativ wie auch quantitativ.

**$v$ -Sprung.** Eine abrupte Geschwindigkeitsänderung hat zur Folge, dass der thermische Gleichgewichtszustand unmittelbar gestört wird, wobei eine anschließend höhere Hysteresefrequenz den Rollwiderstandskoeffizienten sofort hochsetzt, während eine reduzierte Fahrgeschwindigkeit den Widerstand absenkt. Die Reduktion ist auf den Effekt eines Wärmeüberschusses zurückzuführen, was erhebliche Rollwiderstandsunterschiede (vorher/nachher) auslösen kann, die allerdings nur vorübergehend bestehen bleiben.

**Stationäres Verhalten.** Unter dem Einfluss einer gegenüber der Standardprüfung ungünstigeren Wärmesituation liegen die mit der mobilen Prüfanlage auf der Asphaltbahn festgestellten Rollwiderstände oberhalb davon. In Kombination daran beteiligt sind abweichende Zustände bei Verformungsarbeit (Hysterese), Wärmeverteilung und Materialtemperatur, aber auch Textureinfluss/Latschkontakt (Reibung) und insbesondere die

grundverschiedene Luftanströmung zählen zu den relevanten Wirkmechanismen. Ein offener Punkt bleibt weiterhin eine validierte Bezifferung der jeweiligen Anteile einzelner Komponenten am finalen Ergebnis. Nur letzteres wird von beiden Prüfvarianten eruiert – mit Erfolg, wie sich zeigt. Eine verbesserte Auflösung der das Ergebnis bestimmenden kausalen Zusammenhänge wäre indes zukünftig wünschenswert.

Der geringe Geschwindigkeitseinfluss auf den Stationärwert des Rollwiderstandes wurde auf der Trommelanlage erwartungsgemäß bestätigt. Punktuelle Kontrollen auf der Straße weisen auf einen übertragbaren Trend dieser schwach degressiven Abhängigkeit hin, wenngleich eine deutliche Zunahme der Reifentemperatur über der Geschwindigkeit erkennbar wird. Der weitgehend lineare Zuwachs verschiebt sich unter dem Einfluß einer veränderten Reifeneinfederung (Radlast/Fülldruck) quantitativ.

Wie haben sich die im Matrix-Versuchsprogramm berücksichtigten Variationsparameter Radlast und Fülldruck in Bezug auf den Rollwiderstandskoeffizienten bemerkbar gemacht? Als Antwort auf diese Frage darf ein Hinweis auf die bereits fachbekannten empirischen Zusammenhänge mit exponierten Druck- bzw. Radlastrelationen nicht fehlen. Entsprechend potenziert mit den Werten  $-0,1$  bzw.  $-0,2$  prägen sich leicht degressiv fallende Verläufe mit steigender Variabler (Druck/Last) aus, deren Charakteristik sich auch in den punktuellen Tests ‘auf der Strasse’ tendenziell abbildet. Da es hierbei zu keiner absoluten Übereinstimmung kommt, ist grundsätzlich den nicht über alle Versuche hinweg identischen Umgebungsbedingungen geschuldet, aber auch den verfahrenstechnischen Grenzen einer notwendigen extrem hohen, absoluten Messgenauigkeit.

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] **Bode, O., Bode, M.:** “Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen“, FAT Schriftenreihe Nr. 255 (2013)
- [2] **ISO 28580:** “Passenger car, truck and bus tyres – Methods of measuring rolling resistance - Single point test and correlation of measuring results”, ISO 28580 (2009)
- [3] **Bode, O.** “Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn”, FAT Schriftenreihe 285 (2016)
- [4] **Krehan, P.:** “Reifenrollwiderstandsmessung auf der Straße“, VDI Berichte Nr. 778 (1989), S. 233 ff
- [5] **Sandberg, T.:** “Heavy Truck Modeling for Fuel Consumption Simulation and Measurements”, Linköping Studies in Science and Technology, Thesis No. 924 (2001)
- [6] **Janssen, M. L., Hall G. L.:** “Effect of Ambient Temperature on Radial Tire Rolling Resistance”, SAE Paper No. 800090 (1980)

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2012)

Nr.	Titel
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbern aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013
251	Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
252	Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
253	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
254	Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
255	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
256	Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
257	Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
258	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
259	Erweiterung des Korbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
260	Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwind einfluss, 2013
261	Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013

- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
- 273 UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
- 274 Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
- 275 Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
- 276 Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
- 277 Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
- 278 Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
- 279 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
- 280 PCM from iGLAD database, 2015
- 281 Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
- 282 Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
- 283 Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
- 284 Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
- 285 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
- 286  $\chi$ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016



- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2018

**VDA** | Verband der  
Automobilindustrie

**FAT** | Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik

Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)