

FAT 308

T

Der Rollwiderstand von
Nutzfahrzeugreifen unter
zeitvarianten Betriebsbedingungen

O

Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen

Forschungsstelle
IPW automotive GmbH
Hannover

Autor
Matthias Bode

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Bildverzeichnis	4
Formelzeichenverzeichnis	5
1 Einleitung	7
2 Rollwiderstandskoeffizient	10
3 Versuchsfahrzeug	13
4 Messtechnik.....	16
5 Nebenwiderstände	19
5.1 Definitionsmerkmale Reifen-Rollwiderstand MTL.....	20
6 Versuchsprogramm	22
6.1 Testprozeduren	22
6.2 Versuchsobjekte	25
7 Versuchsbedingungen	28
8 Ergebnisse	31
8.1 Warmlauf $v=\text{const.}$	31
8.2 Stationärer Rollwiderstand.....	42
8.3 Zeitvariantes Verhalten – der Zyklus RDC.....	48
8.4 Gegenüberstellung der Rollwiderstände stationär vs. zeitvariant (RDC).....	53
9 Resümee.....	60
Anhang.....	63
Literaturverzeichnis	69

Bildverzeichnis

BILD 1: ROLLWIDERSTAND – DAS VERKEHRSSZENARIO SETZT DIE AKZENTE	7
BILD 2: TROMMELPRÜFSTAND DER FA. DUNLOP MIT PRÜFREIFEN	10
BILD 3: PRINZIPIELLER AUFBAU DES MTL	13
BILD 4: MOBILE TIRE LAB (MTL).....	14
BILD 5: AUSZUG AUS MESSTECHNIK AM MOBILE TIRE LAB (MTL).....	16
BILD 6: BETEILIGTE WIDERSTÄNDE	19
BILD 7: REIFEN-ROLLWIDERSTAND MTL - DEFINITION	20
BILD 8: TESTPROZEDUREN	22
BILD 9: PRÜFSTANDSMESSUNGEN	23
BILD 10: REIFENLISTEN	25
BILD 11: REIFENPREPARATION	26
BILD 12: PRÜFGELÄNDE.....	28
BILD 13: ÄUßERE TEMPERATURBEDINGUNGEN BEI DER TESTDURCHFÜHRUNG	29
BILD 14: ÜBERGANGSVERHALTEN REIFENTEMPERATUR WARMLAUF BEI $v=CONST.$ @ $T_U=25^{\circ}C$ (INDOOR)	32
BILD 15: WARMLAUF $v=CONST.$ (60KM/H) – TEMPERATURENTWICKLUNG U. ZEITKONSTANTEN	33
BILD 16: WARMLAUFCHARAKTERISTIK – ROLLWIDERSTAND VS. KERNTemperatur (INDOOR)	33
BILD 17: WARMLAUF 22,5“ – ÜBERGANGSVERHALTEN ‘INDOOR VS. OUTDOOR’	34
BILD 18: WARMLAUF 17,5“ – ÜBERGANGSVERHALTEN ‘INDOOR VS. OUTDOOR’	36
BILD 19: ÜBERGANGSVERHALTEN ROLLWIDERSTAND ‘INDOOR’ 17,5“ ($v=60KM/H$)	37
BILD 20: ÜBERGANGSVERHALTEN ROLLWIDERSTAND ‘INDOOR’ 22,5“ ($v=60KM/H$)	39
BILD 21: THERMOGRADIENTEN‘OUTDOOR VS. INDOOR’	40
BILD 22: ENTWICKLUNG DER GASTEMPERATUR ÜBER DER GÜRTELKANTENTEMPERATUR	41
BILD 23: RADGRUPPE 17,5“ – STATIONÄRE ROLLWIDERSTÄNDE.....	44
BILD 24: RADGRUPPE 22,5“ – STATIONÄRE ROLLWIDERSTÄNDE.....	45
BILD 25: BEISPIELHAFTE VERLÄUFE VON ZUSTANDSGRÖßEN - ZYKLUS ‘RDC’(I UND II).....	48
BILD 26: FAHRZYKLUS RDC – ROLLWIDERSTAND @ TEMPERATUR.....	49
BILD 27: RDC – MITTLERE ROLLWIDERSTÄNDE IN STATIONÄREN INTERVALLEN	51
BILD 28: ROLLWIDERSTÄNDE UND KERNTemperaturen – BEISPIELHAFTER VERGLEICH (17,5“)	53
BILD 29: RADGRUPPE 17,5“ – ERGEBNISWERTE ROLLWIDERSTÄNDE.....	54
BILD 30: ENTWICKLUNG DER REIFENKERNTemperatur BEIM RDC (17,5“).....	55
BILD 31: ROLLWIDERSTÄNDE UND KERNTemperaturen - BEISPIELHAFTER VERGLEICH (22,5“)	56
BILD 32: RADGRUPPE 22,5“ – ERGEBNISWERTE ROLLWIDERSTÄNDE.....	57
BILD 33: ENTWICKLUNG DER REIFENKERNTemperatur BEIM RDC (22,5“).....	58
BILD 34: RDC – ROLLWIDERSTANDSZUNAHME BEZOGEN AUF STATIONÄRWERTE (OUTDOOR)	59
BILD 35: STATIONÄRE ROLLWIDERSTANDSQUOTIENTEN (INDOOR VS. OUTDOOR)	61

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, siehe auch RRC	[-]
c_α	Schräglaufsteifigkeit (cornering stiffness)	[N/°]
F_R	Reifen-Rollwiderstandskraft	[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]
K	Normierungsfaktor Trommeldurchmesser	[-]
p	Fülldruck Reifen	[bar]
p_{ISO}	Fülldruck Reifen auf Trommelprüfstand nach ISO	[bar]
RRC	Rolling Resistance Coefficient, siehe c_R	[-]
T_L	Temperatur Luftumgebung	[°C]
T_F	Fahrbahntemperatur	[°C]
T_G	Materialtemperatur (Gürtelkante)	[°C]
T_U	Umgebungslufttemperatur (lokale Wetterstation)	[°C]

Verwendete Abkürzungen

AK4	-	Arbeitskreis 4
C2-tyres	-	Reifen der Kategorie ‘light commercial vehicle tyres‘
C3-tyres	-	Reifen der Kategorie ‘heavy commercial vehicle tyres‘
CAN	-	Controller Area Network (Bussystem)
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
CPC	-	ContiPressureCheck©
DAQ	-	Datenerfassung
DOT	-	Reifenidentifikationsnummer
FAT	-	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
IPW	-	IPW automotive GmbH, Hannover
LI	-	Lastindex
MTL	-	Mobile Tire Lab (Rollwiderstandsmessfahrzeug für LKW Reifen)
RDC	-	Regional Delivery Cycle
WL	-	Warmlauf

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die experimentellen Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt “Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter instationären Betriebsbedingungen“, durchgeführt nach Beauftragung von zwei separaten, jedoch ähnlichen Teilprojekten 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, auf bestimmte offene Fragen zum zeitvarianten Reifenrollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen verlässliche Antworten zu bekommen.

Das Besondere an der Aufgabe: Es handelt sich bei diesem Projekt zwar um eine Fortsetzung von bereits mehrjährig im AK4 verfolgten Grundlagenarbeiten, bei denen stets die Rollwiderstände unter realen Umgebungsbedingungen im Fokus standen, aktuell jedoch wurde erstmals der Gedanke eines nahverkehrsorientierten zyklischen Betriebsfalls in eine Outdoor-Testprozedur umgesetzt und anschließend über eine breite Reifenpalette angewendet.

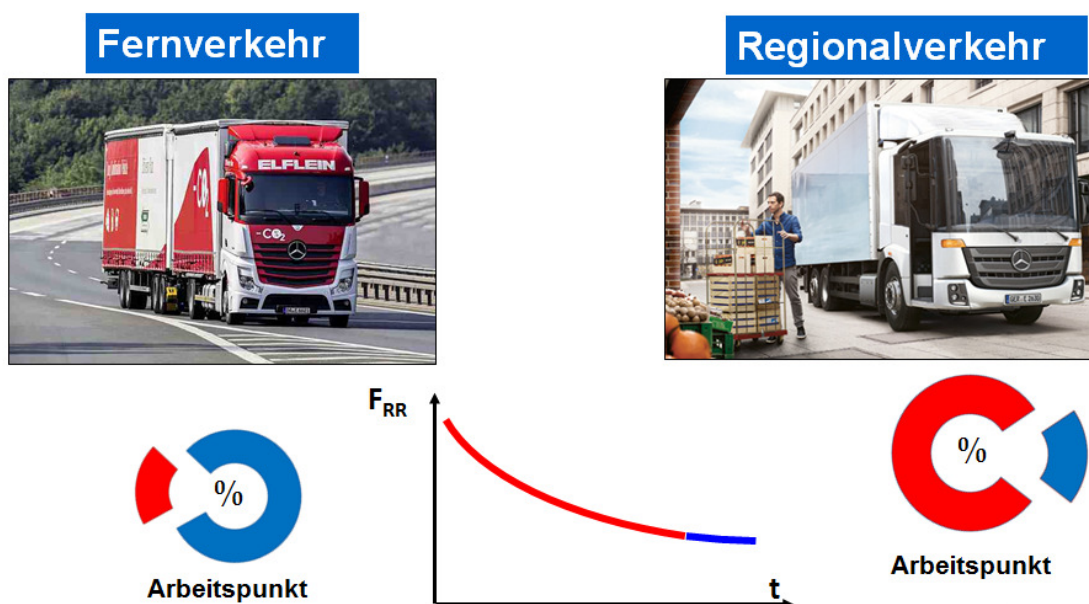


Bild 1: Rollwiderstand – das Verkehrsszenario setzt die Akzente

Ein wichtiges Segment im Straßengüterverkehr ist der regionale Verteilerverkehr. Im Rahmen einer standardisierten CO₂-Emissionsbewertung muss dieser Zweig ebenso individuell berücksichtigt werden wie beispielsweise der des Fernverkehrs. Beide Realitäten unterscheiden sich gravierend im Fahrwiderstandsprofil (**Bild 1**). Der Fahrzyklus, zu dem inhaltlich auch eine Beschreibung der Topologie des Geländes gehört, übt einen maßgeblichen Einfluss auf den die Fortbewegung bedingenden Energieaufwand aus, wie ebenso auch die bei jeglicher Geschwindigkeitsänderung wirksamen Trägheitskräfte sich darin niederschlagen.

Dieser zuletzt genannte Aspekt spielt bei den Überlegungen zum tatsächlichen Rollwiderstand keine Rolle, auch nicht die topografische Situation. Ein Schlüsselmerkmal, ausschließlich mit Blick auf den Rollwiderstand des Reifens, ist abgesehen von den einflussreichen Betriebsparametern Last und Fülldruck, eindeutig der Zusammenhang von >Fahrgeschwindigkeit vs. Zeit<, für den gemeinhin die Bezeichnung Geschwindigkeitsprofil verwendet wird.

Ein im Rahmen der jüngsten EU-Anstrengungen zur Erfassung und Bewertung von CO₂-Emissionen bekannt gewordener Fahrzyklus ist der Regional Delivery Cycle (RDC). Zentrales Element in diesem Zyklus, der einen typischen oder sogar repräsentativen Verteilerverkehrseinsatz abbilden soll, ist der definierte Geschwindigkeitsverlauf, welcher auf definierten Zeitintervallen mit $v = \text{const.}$ beruht, aber auch Pausen sowie Übergangsphasen für Beschleunigung/Verzögerung berücksichtigt. Dieser Verlauf wurde als Muster für den im vorliegenden Projekt vorgesehenen Zyklus vereinbart.

Nach einer auf die Erfordernisse der Versuchspraxis mit geringen strukturellen Änderungen vorgenommenen Anpassung des RDC Geschwindigkeitsverlaufs fand die modifizierte Testprozedur bereits im Jahr 2016 eine intensive Anwendung bei Rollwiderstandsuntersuchungen in realer Umgebung (Prüfgelände). In Verbindung mit dem für derartige Untersuchungen prädestinierten Messfahrzeug Mobile Tire Lab (MTL) des Forschungsnehmers IPW bestätigte der RDC-Test erfolgreich die an diese neue Outdoor-Testvariante geknüpften Erwartungen. Welche Objekte wurden inzwischen damit untersucht?

Nach einer ersten Beauftragung von Seiten der FAT über ein Programm mit 5 Reifen der Dimension 22,5“ (C3) fand ein Jahr darauf eine Fortsetzung dieser Untersuchungen statt, nun allerdings unter Einbindung von 5 Reifen der Größe 17,5“ (C2).

Im vorliegenden Bericht stehen nicht allein die mit diesen 10 Versuchsobjekten erzielten Ergebnisse des Aufgabenschwerpunktes RDC-Test im Fokus, sondern außerdem in bemerkenswertem Umfang auch die Resultate von flankierenden Untersuchungen mit Stationär- oder auch Übergangscharakter. Diese enthalten die für beabsichtigte Referenzbetrachtungen notwendigen Informationen. Darunter fallen sowohl im Prüfgelände auf realer Fahrbahn durchgeführte Outdoor-Messreihen mit $v = \text{const.}$ 60 km/h als auch

zahlreiche Indoor-Messungen, welche wissenschaftlich motiviert in Eigeninitiative des Forschungsnehmers unter standardisierten Testbedingungen auf einer 2m Trommelanlage als Extra erfolgten.

Während bei den vorangegangenen Arbeiten zur Thematik Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen weit überwiegend das Reifenverhalten unter stationären Prozessbedingungen infrage stand, was aufgrund der hohen Affinität zum Betriebsfall >Fernverkehr< auch nicht abwegig erscheint, soll mit dem im Vordergrund dieser Untersuchung stehenden Betriebsfall >Regionalverkehr< mittels der beschriebenen RDC-Betrachtungsweise ein verbesserter Realitätsbezug hergestellt werden.

Dementsprechend wird im Vergleich zu den auf einem lang andauernden Warm-up basierenden Stationärwerten der konventionellen Rollwiderstandsprüfung eine Veränderung erwartet, wobei noch unbekannt ist, ob bzw. in welchem Maße es dabei zu Grenzüberschreitungen in Bezug auf die nominierte Rollwiderstandsklasse kommt. Damit ist ein wesentliches Ziel der Forschungsarbeit erwähnt, aber gleichzeitig sollen auf diesem Wege die ergebnisrelevanten Zusammenhänge zwischen thermischem Zustand und Rollwiderstand des Reifens vertieft werden.

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 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 Be-

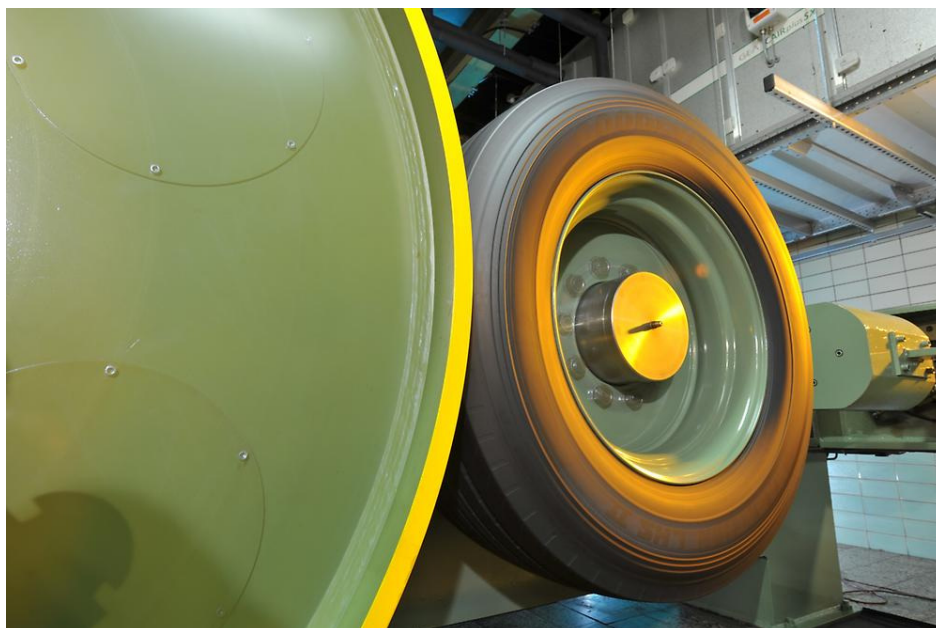


Bild 2: Trommelprüfstand der Fa. Dunlop mit Prüfreifen

lastung 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 (C3) sein thermisches Gleichgewicht im Inneren und auch mit der Umgebung auf jeden Fall erreicht hat; denn erst dann verhardt 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, unabhängig vom Speed-Index.

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.

Neben der Bezeichnung c_R wird ebenfalls das international bekannte Akronym RRC verwendet, wobei die Abkürzung für 'Rolling Resistance Coefficient' steht.

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 ist. 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.

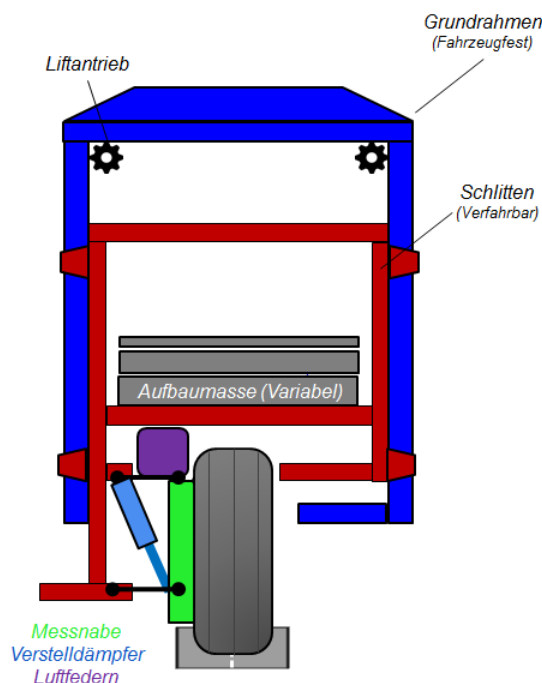


Bild 3: Prinzipieller Aufbau des MTL

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 Kraft-

messzellen 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 beabsichtigt 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.

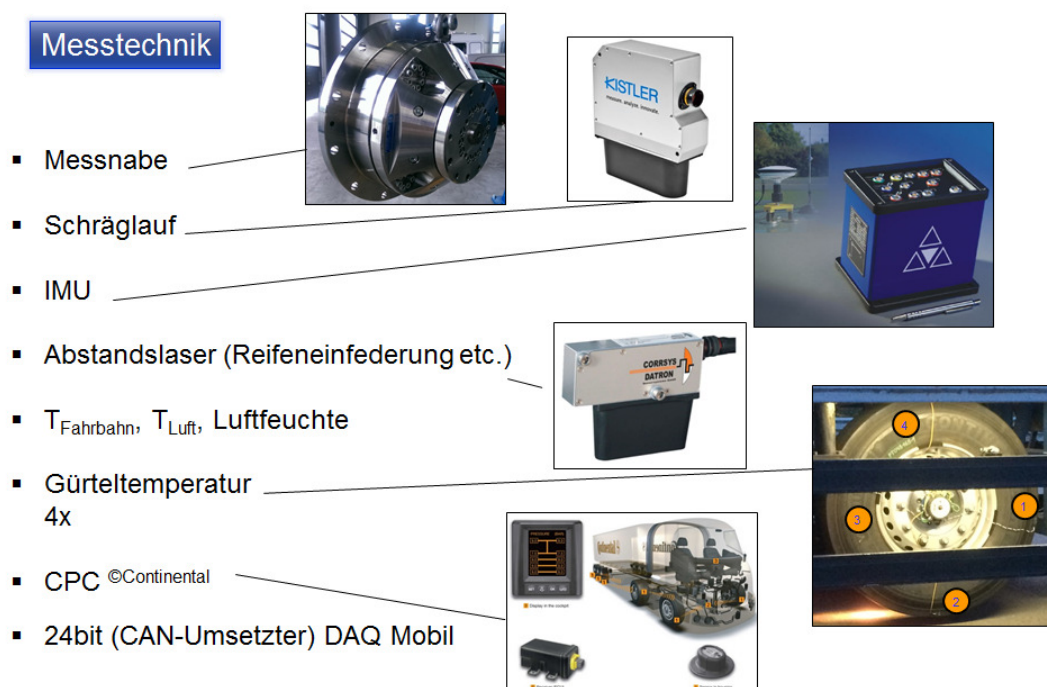


Bild 5: Auszug aus Messtechnik am Mobile Tire Lab (MTL)

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 1 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, punktuell '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. In **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.

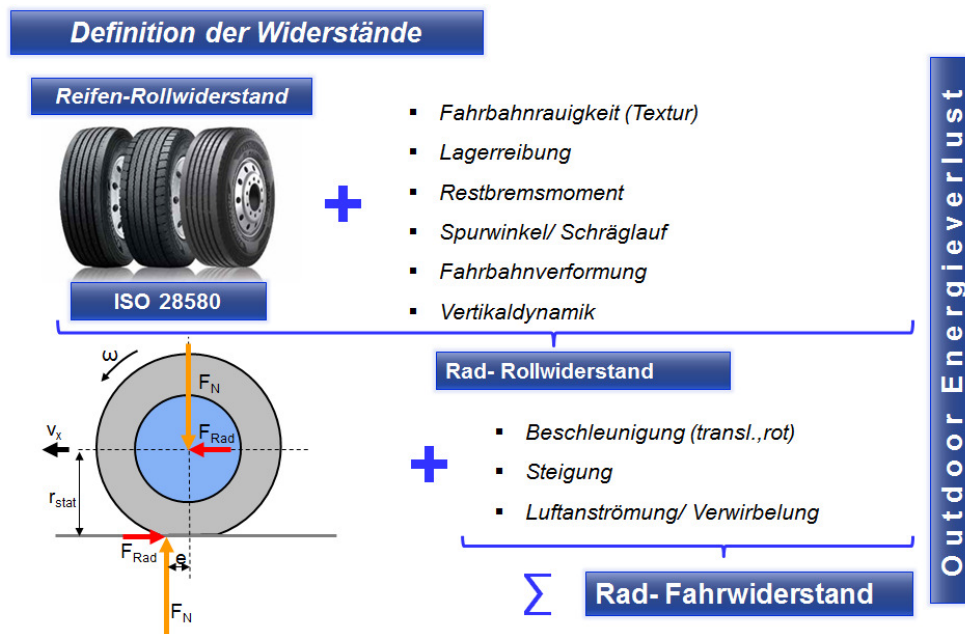


Bild 6: Beteiligte Widerstände

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.

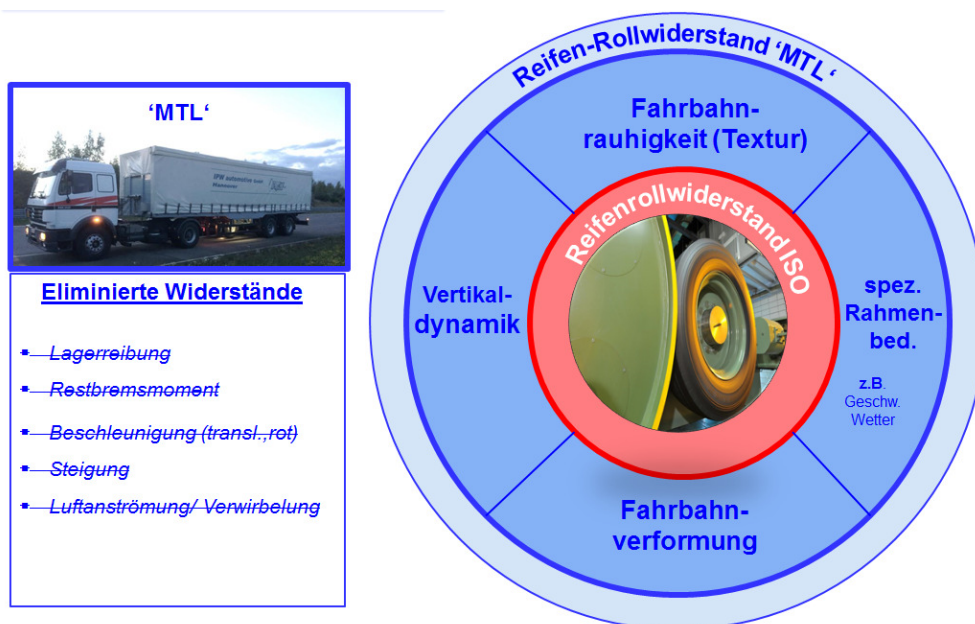


Bild 7: Reifen-Rollwiderstand MTL - Definition

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 Anbeginn 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 zentra-

le 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

6.1 Testprozeduren

Entsprechend des Untersuchungsschwerpunkts >Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen im regionalen Verteilerverkehrseinsatz< steht ein entsprechend festgelegter Fahrzyklus mit definiertem Geschwindigkeitsprofil im Mittelpunkt des Testplans. Der zeitliche Ablauf dieses als Regional Delivery Cycle (RDC) bezeichneten Tests geht aus dem unteren Teil von **Bild 8** hervor.

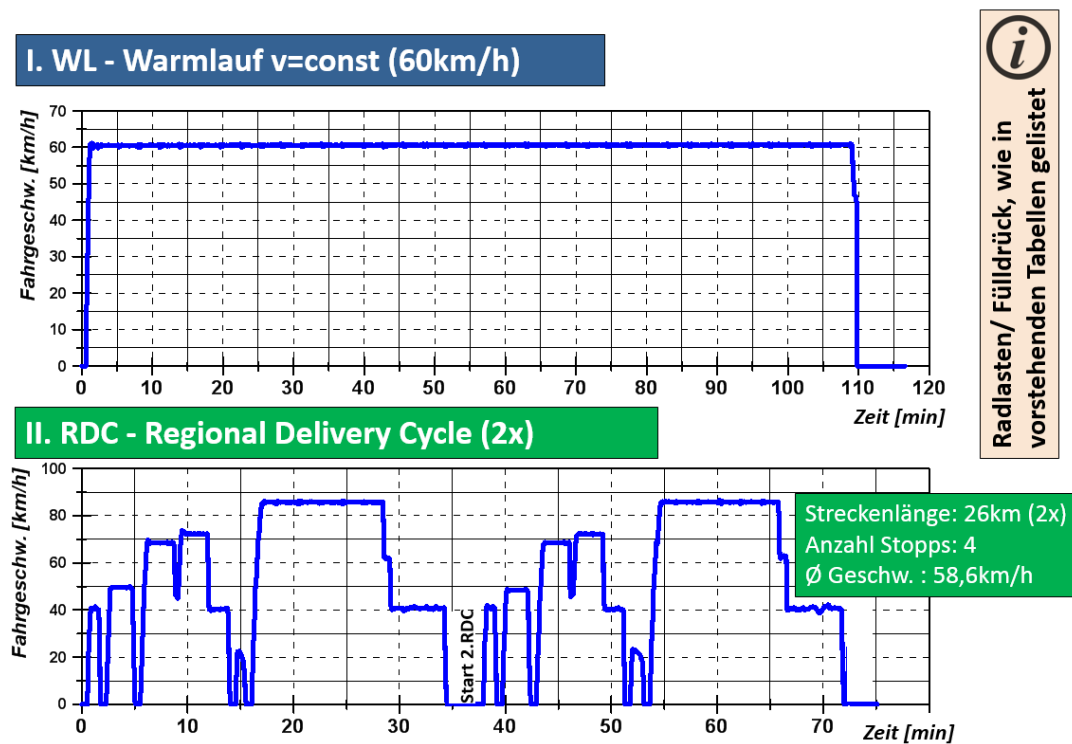


Bild 8: Testprozeduren

Die aus 10 stationären Intervallen und 4 Stoppssegmenten aufgebaute Grundstruktur des RDC-Tests verkörpert mit den berücksichtigten Geschwindigkeitsstufen $v=\text{const}$. offensichtlich keine rein innerstädtische Nutzung, sondern auch ein Fahren auf Schnellstraßen – impliziert durch das Intervall $v=85$ km/h. Die theoretische Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei 58,6 km/h, der genaue Wert hängt von den tatsächlichen Ablä-

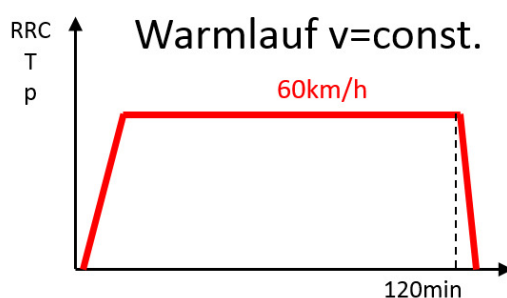
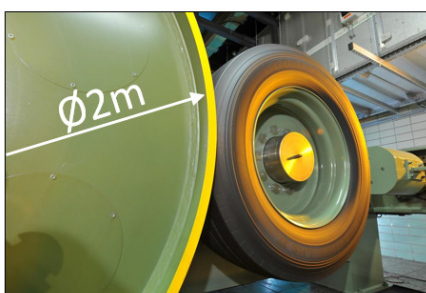
fen ab, womit die instationären Vorgänge *Beschleunigung* und *Verzögerung* primär gemeint sind.

Ebenfalls müssen bei der Umsetzung die lokalen Streckenbedingungen auf dem befahrenen Prüfgelände-Rundkurs berücksichtigt werden, da sich beispielsweise Kurvenpassagen, insbesondere Steilkurven(!), nicht als reguläre Messabschnitte eignen. Dementsprechend ist ein auf die Ortsverhältnisse und den beabsichtigten Grad der Profilumsetzung zugeschnittener Testablaufplan eine grundlegende Voraussetzung für reproduzierbare Betriebsbedingungen. Intern als >Fahranweisung< bezeichnet, konnte über eine ständige Visualisierung per Display eine ausgezeichnete Wiederholbarkeit des Zyklusablaufs erreicht werden.

Wie in Bild 8 dargestellt, gehört zur vereinbarten RDC-Testprozedur ein Wiederholungslauf, der sich dem 1. Lauf, welcher mit kaltem Reifen startet, unterbrechungsfrei anschließt. Somit unterscheiden sich beide Läufe durch zum Zeitpunkt des Starts thermisch unterschiedliche Reifenzustände. Davon betroffen sind natürlich auch die Fülldrücke, deren Gemeinsamkeit jedoch der identische Kaltfülldruck ist. Jeder Zyklus erstreckt sich über eine Streckenlänge von 26 km.

Um bei der geplanten Gegenüberstellung von Rollwiderstandswerten neben dem Übergangverhalten auch die konventionelle Prozesskategorie 'Stationär' einbinden zu können, war der Outdoortest >Warmlauf $v=\text{const.}$ < bereits im Stadium des Projektentwurfs als geeignete Ergänzung bzw. zur Untermauerung der RDC-Ergebnisse festgelegt worden. Bei der Durchführung über mehr als 100 Minuten Dauer (Bild 8) werden identische Radlasten und Fülldrücke wie beim RDC berücksichtigt.

III. Messungen auf Trommelprüfstand







Parameter	Wert
	$T_{\text{Umgebung}} = 25^{\circ}\text{C}$
	$v = 60\text{km/h}$
	$p = \text{variabel}$
	Radlast = variabel

Bild 9: Prüfstandsmessungen

Ein dritter Block im Versuchsprogramm – der in Eigenregie des Auftragnehmers hinzugefügt wurde – beinhaltet Labormessungen auf einem Außentrommelprüfstand (2m) in klimatisierter Umgebung bei konstant 25°C Lufttemperatur. Die Darstellung in **Bild 9** drückt aus, dass dieser Basistest als Pendant zum >Outdoor-Warmlaufstest $v=\text{const.}$ < konzipiert ist. Einheitliche Betriebsparameter für beide, auch hier ist eine Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h vorgesehen, ergeben die Möglichkeit zu einer beabsichtigten Referenzierung der Outdoor-Ergebnisse.

Von den 3 vorgestellten Testprozeduren erfordern nur die beiden erstgenannten ein für den Straßeneinsatz geeignetes Messwerkzeug, welches mit dem zuverlässigen MTL (Mobile Tire Lab) und einer bewährten Verfahrenstechnik zur Verfügung stand. Eine Besonderheit ist allerdings darin zu sehen, dass erstmals die kleine Reifengröße 17,5“ bei weitgehend ausgeschöpftem Freigang zu untersuchen war, was sich nachträglich als unproblematisch herausstellte.

6.2 Versuchsobjekte

Bei den untersuchten Reifen handelt es sich um eingerollte Neureifen, die durchnummeriert von 1-10 in **Bild 10** bezeichnet sind, auch technische Zusatzinformationen sind darin aufgelistet.

Testobjekt Reifen 17,5“: Parameter, Eckdaten								
Rad Nr	Typ	Tragfähigkeit kg	INDEX	Felgenbreite	CPC + Temperatur Gürtellage	Vorgabe Radlast kg	Vorgabe Druck bar	Labelklasse
1	CO 225/75 R17.5 Hybrid LS3 Steer /neu	1850 (7,5 bar)	129 M	6,75		1600	7,5	5,1 - 6,0
2	CO 225/75 R17.5 Hybrid LS3 Steer / abgeraut	1850 (7,5 bar)	129 M	6,75		1600	7,5	Mindest-Profil-tiefe
3	CO 225/75 R17.5 Hybrid LD3 Drive / neu	1850 (7,5 bar)	129 M	6,75		1600	7,5	6,1 - 7,0
4	MI 225/75 R17.5 X Multi D Drive / neu	1850 (7,25 bar)	129 L	6,75		1600	7,25	6,1 - 7,0
5	MI 225/75 R17.5 X Multi Z Steer/Drive/ neu	1850 (7,25 bar)	129 L	6,75		1600	7,25	6,1 - 7,0

Testobjekt Reifen 22,5“: Parameter, Eckdaten								
Rad Nr	Typ	Tragfähigkeit kg	INDEX	Felgenbreite	CPC + Temperatur Gürtellage	Vorgabe Radlast kg	Vorgabe Druck bar	Labelklasse
6	CO 385/65 R22.5 Hybrid HT3 Trailer	4500 (9,0 bar)	160 K	11,75		4040	9,0	4,1 - 5,0
7	MI 315/70 R22.5 Multiway 3D XDE Drive	3750 (9,0 bar)	154/150L	9,00		2760	8,0	6,1 - 7,0
8	CO 315/70 R22.5 Hybrid HS3 Steer	3750 (9,0 bar)	154/150L	9,00		3500	8,5	5,1 - 6,0
9	MI 315/70 R22.5 X Line Energy D Drive	3750 (9,0 bar)	154/150L	9,00		2760	8,0	4,1 - 5,0
10	CO 385/65 R22.5 EcoPlus HT3 Trailer	4500 (9,0 bar)	160K	11,75		4040	9,0	<4,0

Annahme fiktiver Sattelzug

VA: 7 t @ 8,5 bar
HA: 11 t @ 8,0 bar
TA: 8 t @ 9,0 bar

Bild 10: Reifenlisten

Die Reifen vom Typ Steer, Drive, Trailer aus dem Lieferprogramm der beiden Hersteller Continental und Michelin sind bezüglich der Nutzung für den Regional- und/oder Fernverkehr deklariert, wobei sowohl die Auswahl als auch die Definition der Betriebsparameter in enger Absprache mit dem Obmann des AK4 erfolgte. Die notierten Lastannahmen basieren auf fiktiven Fahrzeugmodellen. Für Vergleichszwecke war einer von fünf Reifen der Dimension 17,5“ beim Reifenhersteller auf eine Profiltiefe von 3,5 mm abgeraut worden, danach stand dieser sogenannte Bruderreifen in angefahrenem Zustand zur Verfügung.

Neben den Vorgaben hinsichtlich der Betriebsparameter Radlast und Fülldruck, soll die Aufmerksamkeit des Lesers auf die beiden Oberbegriffe CPC[®] und Labelklasse gelenkt werden. Mit CPC[®] verbindet sich der Hinweis auf eine gezielte Vorbereitung aller bereitgestellten Reifen mit einer im Reifinneren integrierten Temperatur-Sensorik. Neben der Gastemperatur registriert das vor Montage der Felgen installierte CPC-Modul auch den Reifendruck, wobei die Datenübertragung über eine stabile Funkstrecke erfolgt



Bild 11: Reifenpreparation

(Bild 11).

Eine technische Herausforderung im Hinblick auf das Realisieren einer sowohl exakten Messung als auch einer langandauernden Betriebszuverlässigkeit ist die zur Temperaturmessung im Material an der Gürtelkante angewandte Methode ‘Thermoelement-Einschub’. Wie aus dem Bildausschnitt erkennbar, ist prinzipiell damit zu rechnen, dass in dieser lokalen Reifenzone unterhalb des Laufstreifens eine relativ hohe thermische

Belastung auftritt. Ein Merkmal des hohen Energieaufkommens zwischen den Gürtellagen sind entsprechend hohe Materialtemperaturen - vor allem in der Randzone. Um im Falle von Kabelbruch nicht auf diese besonders interessierenden Kerntemperatur-Messwerte verzichten zu müssen, werden vorsorglich im Abstand von 120° über den Umfang verteilt insgesamt 3 Sensoren implementiert.

Zurück zum erwähnten Begriff Labelklasse. Bei den in der äußeren rechten Spalte der Reifenlisten eingetragenen Labelklassen fällt eine breite Palette von A bis D in Bezug auf die 22,5“ Räder auf, während diese bei der kleineren Radgröße 17,5“ nur von C bis D reicht. Alle Angaben sind recherchiert aus frei zugänglichen Quellen, z.B. Produktbeschreibungen.

7 Versuchsbedingungen

Alle mit dem MTL als Outdoor-Test konzipierten Messreihen fanden auf der Innenspur des für die Aufgabe sehr geeigneten Rundkurses innerhalb des Dekra Prüfgeländes in Klettwitz statt. Die Fahrbahndecke der mehrspurigen Fahrbahn ist aus Asphalt gefertigt, eben und schlaglochfrei, mit einer unauffälligen mittelfeinen Oberflächentextur. Ein besonderes Merkmal der ausschließlich in trockenem Zustand benutzten Ovalstrecke sind die beiden Messgeraden von über 2 km Länge, siehe Geländeinformation in **Bild**

Prüfgelände – Ovalrundkurs Dekra

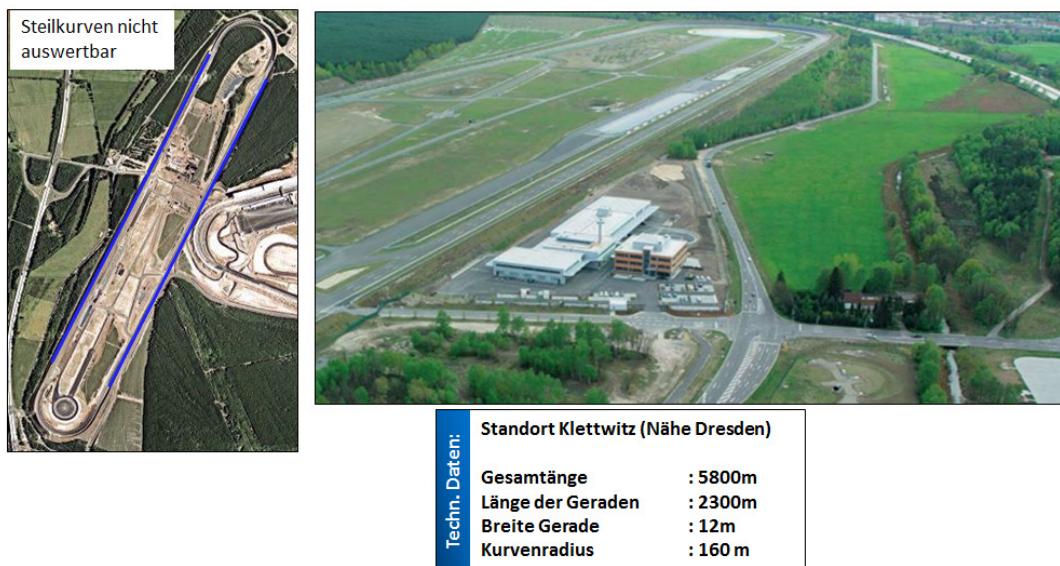


Bild 12: Prüfgelände

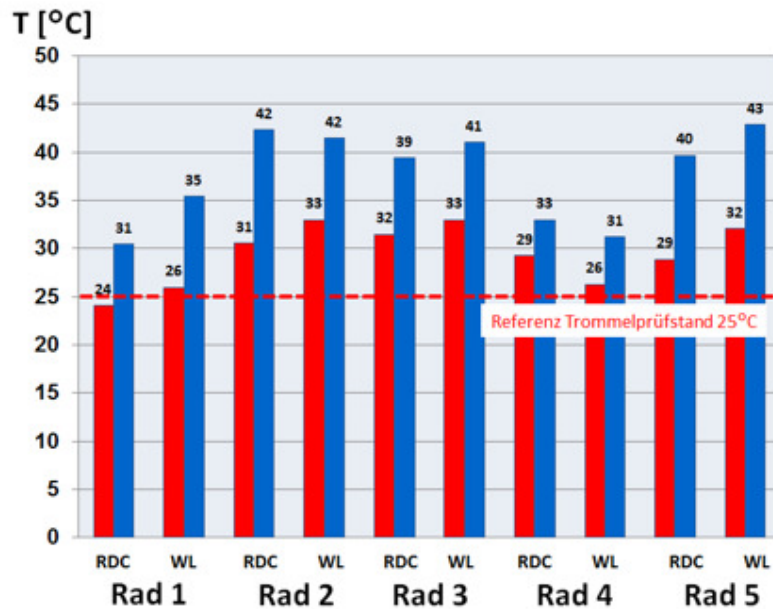
12.

Die maßgeblichen Wetterdaten zum Zeitpunkt der vor Ort durchgeführten Messfahrten – beide 5er Radgruppen wurden jeweils en bloc in verschiedenen Jahreszeiten untersucht – sind von einer stationären Wetterstation auf dem Gelände umfassend aufgezeichnet worden. Nachweisbar lagen die Umgebungstemperaturen im 3. Quartal beim >Testblock 17,5“< deutlich höher als im 4. Quartal bei der Untersuchung der Radgröße 22,5“.

Aus den Aufzeichnungen der direkt vor dem Prüfrad des MTL installierten Sensoren für Fahrbahn- und Luftstromtemperatur sind die in **Bild 13** hinterlegten Diagramme ent-

standen. Es ist daraus leicht erkennbar, dass sich die thermischen Umgebungsbedingungen zwischen den beiden Versuchsblöcken erheblich unterscheiden.

Wetterbedingungen 17,5"



Temperaturen

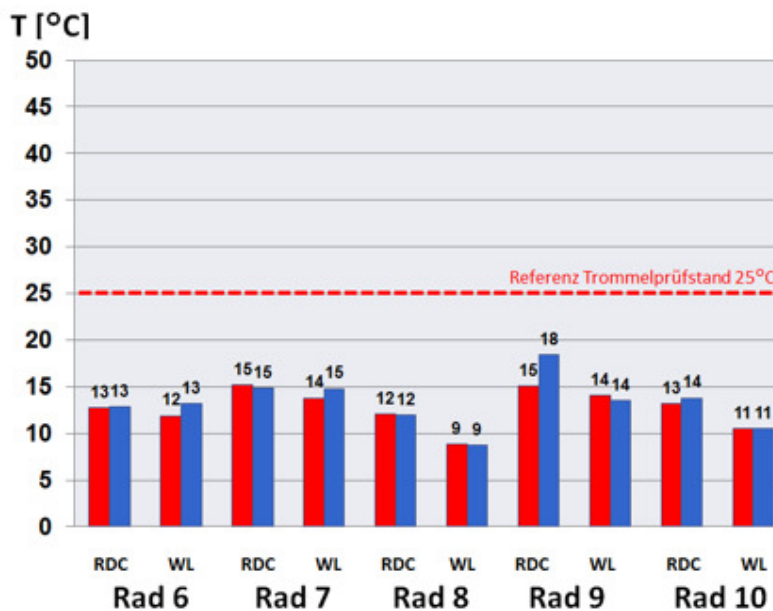
T_Umgebung



T_Fahrbahn



Wetterbedingungen 22,5"



Temperaturen

T_Umgebung



T_Fahrbahn



Bild 13: Äußere Temperaturbedingungen bei der Testdurchführung

Ausgehend von der eingezeichneten Referenz-Temperaturlinie ist eine eindeutige Zuordnung möglich, die in Bezug auf den Labormaßstab einfacherweise nur 2 Zustände bezeichnen muss: a) Temperaturniveau oberhalb und b) Temperaturniveau unterhalb der Referenz. Diese grobe Einteilung der angetroffenen äußeren Testbedingungen darf zunächst als hinreichende allgemeine Bewertung angenommen werden, für ein tieferes Verstehen von beispielsweise divergierenden Rollwiderständen zwischen Labor und Straße werden im Folgenden ohnehin die Beobachtungen zum inneren Wärmezustand des Reifens bevorzugt.

Abschließend bemerkenswert ist dem Verfasser der Hinweis auf die 'outdoor' nicht generell vorhandenen, jedoch grundsätzlich möglichen deutlichen Temperaturunterschiede von Fahrbahn und Luftanströmung (Bild 13) - eine Differenz, die unter klimatisierten Laborbedingungen in dieser Art und Weise nicht existiert.

8 Ergebnisse

8.1 Warmlauf $v=const.$

Der standardisierte Rollwiderstandstest nach ISO 28580 sieht vor Beginn der eigentlichen Messung eine thermische Konditionierung bei konstanter Prüfgeschwindigkeit vor, hier als Warmlauf bezeichnet, dessen Dauer je nach Reifenkategorie unterschiedlich lang festgelegt ist, siehe Tabelle 2.

Tyre Type	Passenger Car	Truck and Bus	
		LI \leq 121	LI $>$ 121
Loadindex			
Rim Code	All	All	< 22.5 \geq 22.5
Warm-up Duration	30 min	50 min	150 min 180 min

Tabelle 2: Auszug aus ISO 28580 (Warm-up Duration)

Übertragen auf die in diesem Projekt eingesetzten Nutzfahrzeugreifen in den Größen 17.5 und 22.5“- mit Lastindizes größer 121 - müssten für den Warmlauf 150 (180) Minuten als Zeitfenster angesetzt werden, wenn eine Ermittlung des stationären Rollwiderstandsbeiwertes unter regulären Prüfbedingungen beabsichtigt wäre. Mit dem langandauernden Warmlauf unter konstanten Testbedingungen soll sichergestellt werden, dass sich der Reifen vor Beginn der Messung zweifelsfrei im Zustand thermischen Gleichgewichts befindet, da der Rollwiderstand erst im Beharrungszustand der Wärmeflüsse zeitinvariant ausgeprägt ist.

Anders als unter regulären Testbedingungen üblich wurde der Reifenwarmlauf nicht mit 80 km/h durchgeführt, sondern entsprechend dem spezifischen Zweck der Untersuchung mit einer geringeren Fahrgeschwindigkeit von nur 60 km/h. Organisatorische Gründe zwangen zu einer verkürzten Warmlaufdauer, welche bei den durchgeführten Outdoor-Tests 100 Minuten betrug. Im Sinne einer hinreichenden Näherung lässt sich das Vorgehen rechtfertigen, da der Übergang zwischen den Zuständen ‘Reifen kalt‘ und therm. Beharrungszustand‘ in dieser Zeitspanne bereits weitgehend abgeschlossen ist. Analytierte Zeitkonstanten des Rollwiderstands bei Warmläufen längerer Dauer haben das grundlegend bestätigt, aber auch unvermeidbare natürliche Schwankungen im Bereich der äußeren Umgebungsbedingungen können den Nutzen enger gefasster Zeitfenster durchaus begründen.

Ein exemplarisches Beispiel für den zügigen Anstieg von Innendruck, Material- und Gastemperatur im Reifentorus während des Warmlaufprozesses und den allmählichen Übergang auf ein konstantes Niveau ist in **Bild 14** über der Zeitachse dargestellt. Auf einer 2m Außentrommel in klimatisierter Umgebung bei konstanter Radlast und Umfangsgeschwindigkeit untersucht, sind für die betrachteten Zustandsgrößen degressive Verläufe mit asymptotischer Ausprägung festgestellt worden - eine Charakteristik, die für ein stabiles Übergangsverhalten typisch ist. Diese Eigenschaft gilt offensichtlich sowohl für die im Weiteren im Mittelpunkt stehende Geschwindigkeitsstufe von 60 km/h als auch für die hier ebenfalls aufgeführten Varianten 25 und 80 km/h.

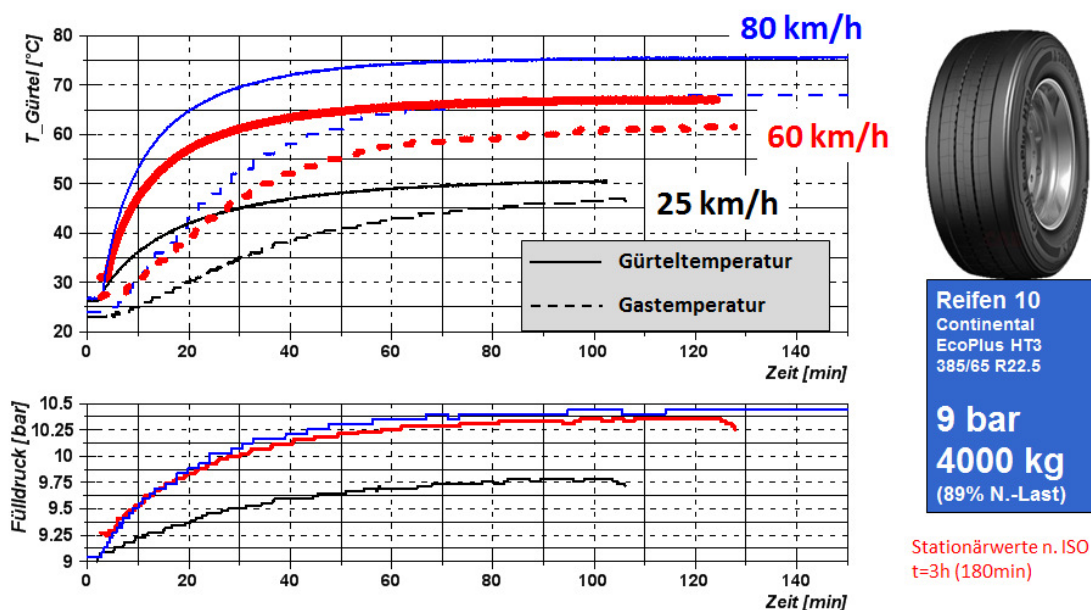


Bild 14: Übergangsverhalten Reifentemperatur
Warmlauf bei $v=\text{const.}$ @ $T_U=25^\circ\text{C}$ (indoor)

Wie bereits in [1] vorgestellt, steigen die Stationärwerte der Materialtemperatur (Gürtelkante) annähernd linear zur Umfangsgeschwindigkeit an. Dieser unter konstanten Umgebungsbedingungen im Labor ermittelte Zusammenhang ist allerdings nicht in jedem Fall eindeutig auf den Outdoor-Betrieb übertragbar, da dort schwankende bzw. variierende Umgebungstemperaturen, ebenso wie auch Fahrtwindeinflüsse, die resultierende Materialtemperatur von Fall zu Fall mehr oder weniger beeinflussen können. Die zeitliche Entwicklung der Kerntemperatur kann durch eine Zeitkonstante beziffert werden, deren Zuordnung aus **Bild 15** hervorgeht. Der für den 22,5“ Trailerreifen ermittelte Wert von 24 Minuten bis zum Erreichen der als Kriterium definierten Schwelle (90% v.E.) liegt deutlich über dem der Größe 17,5“, wobei der Hinweis nicht fehlen darf, dass sich die Massen beider Reifendimensionen um mehr als den Faktor 2 unterscheiden - die Reifengewichte stehen im Verhältnis von 64:25 zueinander.

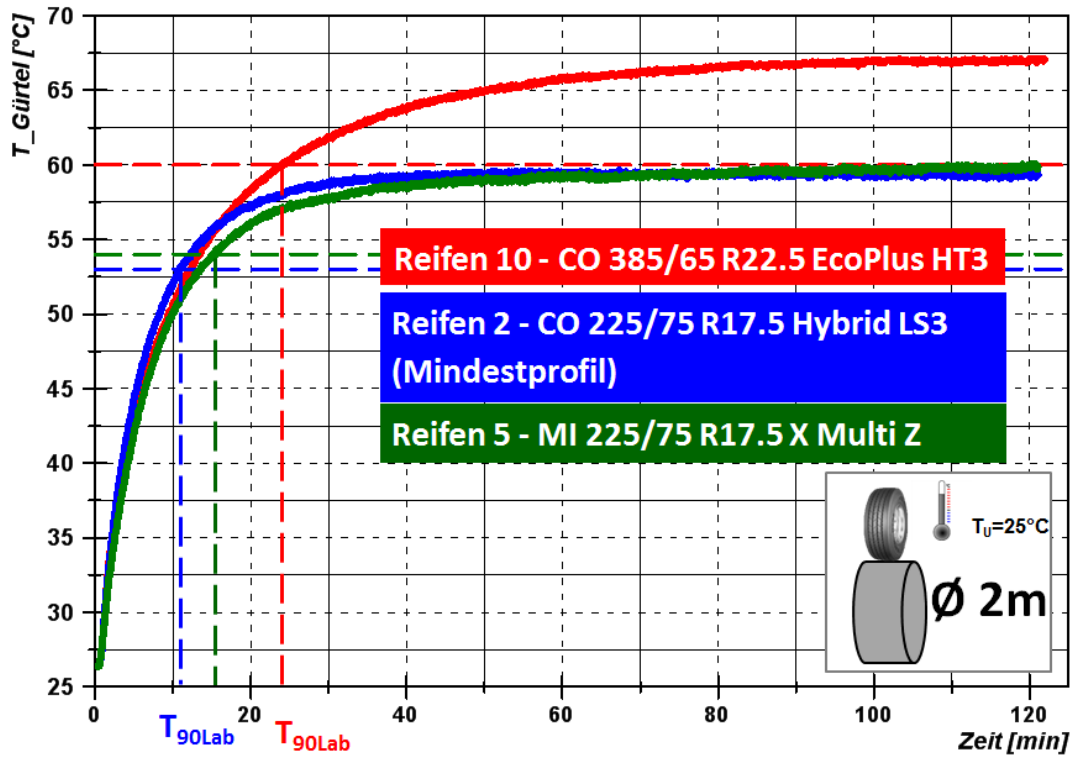


Bild 15: Warmlauf $v = \text{const.}$ (60km/h) – Temperaturentwicklung u. Zeitkonstanten

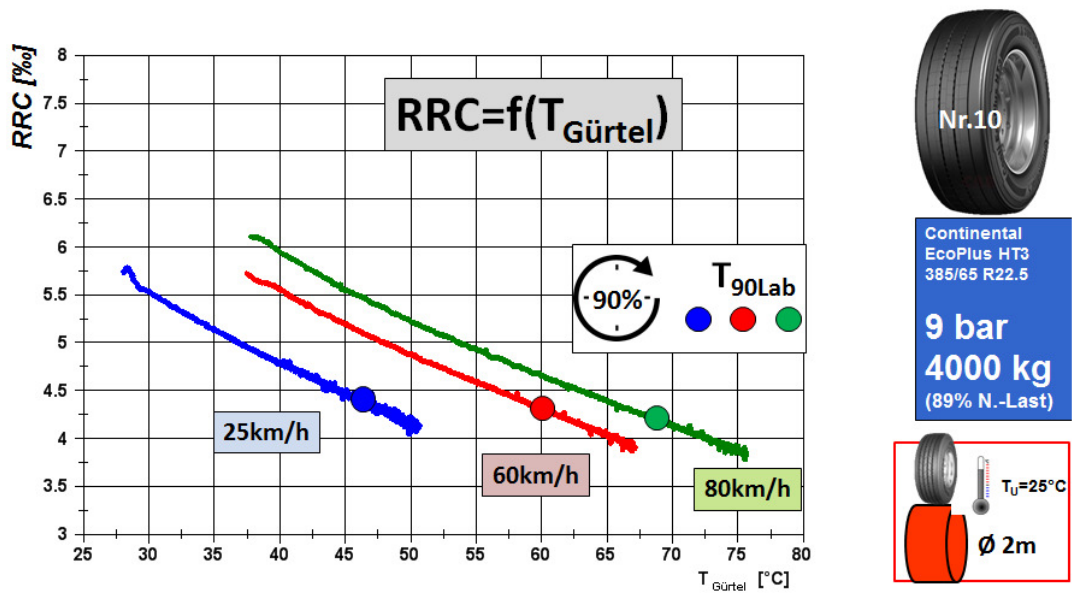


Bild 16: Warmlaufcharakteristik – Rollwiderstand vs. Kerntemperatur (indoor)

Welche Bedeutung die Materialtemperatur hinsichtlich des auftretenden Rollwiderstandes einnimmt, demonstriert die Darstellung der Abhängigkeit dieser beiden Zustandsgrößen in **Bild 16**.

Wie bereits aus den Temperaturverläufen bekannt, entwickeln sich unter den konstanten Bedingungen des Warmlaufs im Labor nicht nur allmählich stationäre Temperaturwerte, sondern hinter dem selbstablaufenden Übergangsprozess verbirgt sich erkennbar der Trend, dass der Rollwiderstand mit steigender Temperatur fällt. Hierbei besteht ein enger Zusammenhang zur Kern- bzw. Materialtemperatur. Zu beobachten ist dieses typische Verhalten offensichtlich in jeder Geschwindigkeitsstufe, wo weitgehend ähnliche Gradienten identifiziert wurden. Die festgestellte charakteristische Abhängigkeit $RRC=f(T_G)$ ist zwar strenggenommen nicht linear ausgeprägt, allerdings demonstriert der Kurvenabschnitt zwischen $T_{90\text{Lab}}$ und den stationären Endwerten einen proportionalen Zusammenhang zwischen beiden Größen.

Im Gegensatz zu den konstanten Testbedingungen im Labor mit weitgehend identischen Temperaturwerten für Raumluft und auch Fahrbahnkontakt variieren diese auf dem Prüfgelände nicht nur zueinander, sondern auch das Temperaturniveau ist von der spezifischen Wettersituation vor Ort abhängig. Bei der exemplarischen Gegenüberstellung in **Bild 17** liegt das Temperaturniveau der Fahrbahn bei nur 10°C , was entsprechende Konsequenzen bei der Materialtemperatur zur Folge hat. Allerdings ist die gegenüber dem Labortest um 20 Kelvin abgesenkte Reifentemperatur nicht allein darauf zurückzuführen, sondern grundsätzlich ist eine verringerte Walkarbeit daran mitbeteiligt, die in Verbindung mit der auf realer Fahrbahn ebenen Ausbildung des Reifenlatsches niedriger angesiedelt ist als beim Abrollen auf einer gekrümmten Trommel.

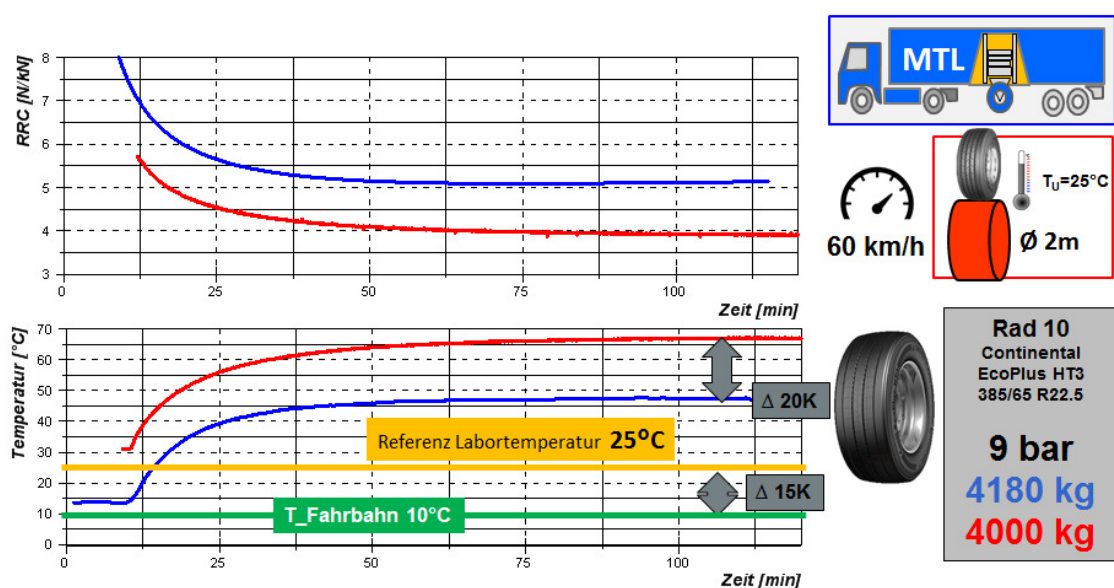


Bild 17: Warmlauf 22,5“ – Übergangsverhalten ‘indoor vs. outdoor‘

Höhere Wärmeverluste sind unter den vorliegenden MTL-Bedingungen natürlich auch durch die kühlere Luftumgebung bedingt, nicht zuletzt aber auch eine Folge der Fahrtwind-Luftanströmung an sich.

Aus den abweichenden äußeren Temperaturbedingungen, einschließlich der erwähnten Nebeneffekte, ergeben sich beim Vergleich 'indoor vs. outdoor' unterschiedlich hohe Reifen-Rollwiderstände. Eine immer beteiligte Einflusskomponente darf hierbei nicht vergessen werden: Die unterschiedlichen Unebenheiten bzw. Rauigkeiten (Texturen) der jeweiligen Oberflächen Stahl/Asphalt erzeugen jeweils spezifische Energieverluste, deren Beitrag keine spürbaren Temperaturverschiebungen im Reifen selbst auslöst, jedoch nach allgemeinem Wissensstand und eigenen Erfahrungen den Rollwiderstand um über 20% anheben kann. Darin unberücksichtigt sind spezifische Widerstandseffekte aus einer Fahrbahnverformung, auf deren Einfluss bereits in FAT_285 [4] ausführlich eingegangen wurde.

Rückschlüsse auf die Höhe des wirksamen Anteils der Textureinwirkung lassen sich aus den hier abgebildeten Verläufen jedoch nicht ziehen. Ebenso wenig ist auch der Verlustbeitrag von Radlastschwankungen separierbar, welche am Prüfstand durch starre Radanbindung von vornherein ausgeschlossen werden. Auf der relativ ebenen Prüfstrecke fallen die dynamischen Radlastschwankungen in Verbindung mit angepasster Bedämpfung jedoch vernachlässigbar gering aus.

Lassen sich die unterschiedlich hohen Niveaus der Rollwiderstände von beiden Testvarianten auch zuverlässig quantitativ erklären? Die unterschiedlichen Versuchsbedingungen in den Testsituationen a) Labortest auf gekrümmter Stahltrommel und b) Outdoor-test auf ebener Asphaltfahrbahn lassen sich derzeit noch nicht in abgesicherten Schritten auf einen vergleichstauglichen gemeinsamen Bezugszustand übertragen, deshalb im Folgenden ein erster Erklärungsversuch.

Die Analyse für den im Fokus stehenden Trailerreifen soll mit der in Bild 16 vorgestellten Eigenschaftskurve $RRC=f(T_G)$ und einem Gedankenexperiment begonnen werden. Basis hierfür ist die These: Hätte der Reifen im Labor infolge einer abgekühlten Umgebung statt des stationären Wertes von 67°C nur eine Materialtemperatur von 47°C erreicht, so wäre der Wert von RRC bei 5 ‰ stagniert. Die objektive Feststellung 'Outdoor' (Bild 17), dass bei diesem Temperaturzustand tatsächlich ein Stationärwert von geringfügig mehr als 5 ‰ Rollwiderstand erzeugt wird, lässt hinsichtlich der Energieverlustanteile den Schluss zu, dass der Bonus "ebener Fahrbahnkontakt" und der Malus "Fahrbahnrauigkeit" sich in dieser realistischen Betriebssituation weitestgehend aufheben. Die gegensätzlichen Wirkungen neutralisieren sich in diesem Fall, zumindest annähernd.

Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen sei deutlich betont, dass anders als bei der vorangestellten Betrachtungsweise der bekannte empirische Zusammenhang zur Be-

rücksichtigung thermisch identischer Testbedingungen bei der standardisierten Rollwiderstandsprüfung

$$\frac{f_{R,ISO}}{f_R} = 1 + K * (T_{Umgebung} - 25^{\circ}C)$$

mit $K=0,006$ für Reifen mit $LI>121$ gültig für $20^{\circ}C < T_{Umgebung} < 30^{\circ}C$

allein dafür benutzt wird, um das Untersuchungsergebnis auf eine feste Raumtemperatur zu normieren - auf einen Bezugswert von international einheitlich $25^{\circ}C$.

Im Gültigkeitsbereich dieser linearen Abhängigkeit bedeutet eine als Beispiel angenommene Abweichung von 10 Kelvin bei der Raumlufttemperatur eine Rollwiderstandskorrektur um 6 Prozent. Der Ansatz für diese nachträgliche, thermisch relevante Korrektur des Testergebnisses beim Verfahren nach beispielsweise ISO 28580 darf nicht verwechselt werden mit der Abhängigkeit $RRC=f(T_G)$. Die Kausalität bei diesem 'inneren' Zusammenhang von thermischem Zustand einerseits und Rollwiderstand andererseits ist unvergleichbar, was u.a. auch im Wert des Gradienten zum Ausdruck kommt. Eine Abweichung von 10 Kelvin bei der Materialtemperatur korrespondiert im linearen Teil des finalen Kurvenabschnitts mit einer Rollwiderstandsänderung von ca. 15%.

Eine erste Antwort darauf, ob die Rollwiderstandskoeffizienten sich kaum unterscheiden, wenn, wie im Gedankenmodell angenommen, in beiden Testszenarien tatsächlich gleichhohe Materialtemperaturen bestehen, eröffnet sich durch die Darstellungen in **Bild 18**. Zufällig liegen dort, es handelt sich um die Radgröße 17,5“, identische Temperaturzustände in Bezug auf das Material (Gürtelkante) vor, trotz sehr unterschiedlicher äußerer Umgebungsbedingungen während der beiden differenten Testläufe.

Notwendigerweise sind die konstanten Betriebsparameter statische Radlast und Fahrge-

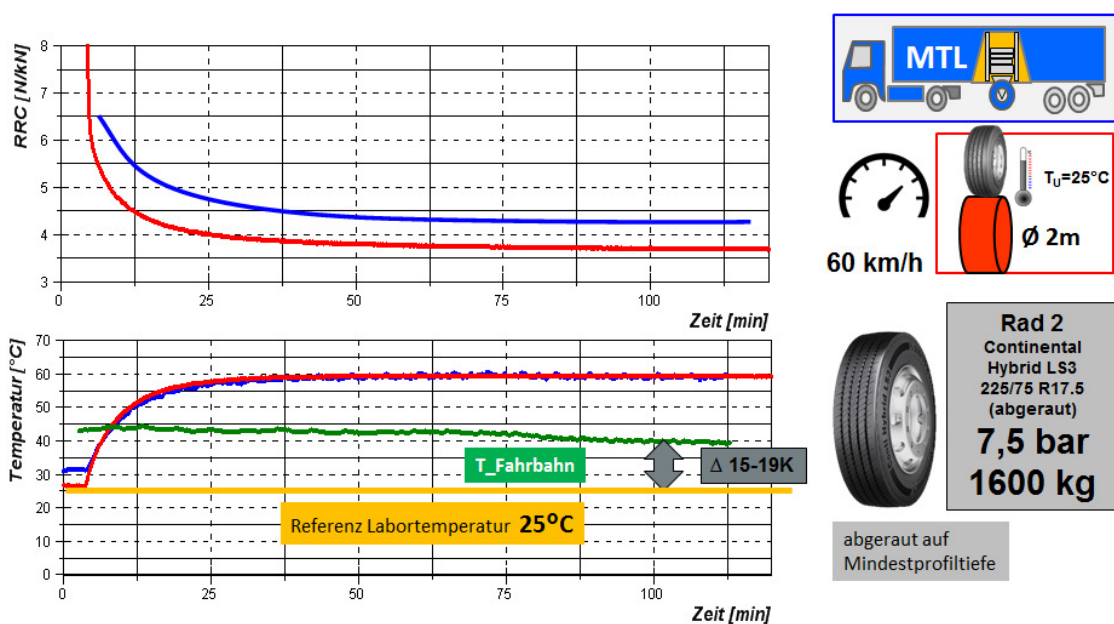


Bild 18: Warmlauf 17,5“ – Übergangsverhalten 'indoor vs. outdoor'

schwindigkeit größengleich, ebenso wie auch identische Kaltfülldrücke von 7,5 bar eine Übertragbarkeit ermöglichen. Unter diesen Voraussetzungen erfüllt die Gegenüberstellung der Rollwiderstandsverläufe – ausgedrückt durch die Abkürzung RRC – in der Tat die aus dem zuvor behandelten Fall geweckten Erwartungen einer vermuteten Übereinstimmung beider Bewegungswiderstände, was jedoch nur näherungsweise der Fall ist. In der sich abzeichnenden stationären Phase des Rollwiderstandes besteht keine vollständige Übereinstimmung zwischen den Betragswerten, jedoch darf die geringe absolute Differenz von ca. 0,6 ‰ als Abweichung sachlich nicht überbewertet werden. Das der auf Asphaltfahrbahn mittels MTL gemessene Widerstand trotz der identischen Materialtemperaturen höher liegt, ist möglicherweise Effekten geschuldet, die sich aus besonderen Begleitumständen ergeben:

- Reifen mit geringer Profiltiefe – sehr niedriges Rollwiderstandsniveau
- Radienverhältnis Reifen/Trommel bei Radgröße 17,5“ geringer als bei 22,5“
- Reaktion auf Textureinfluss

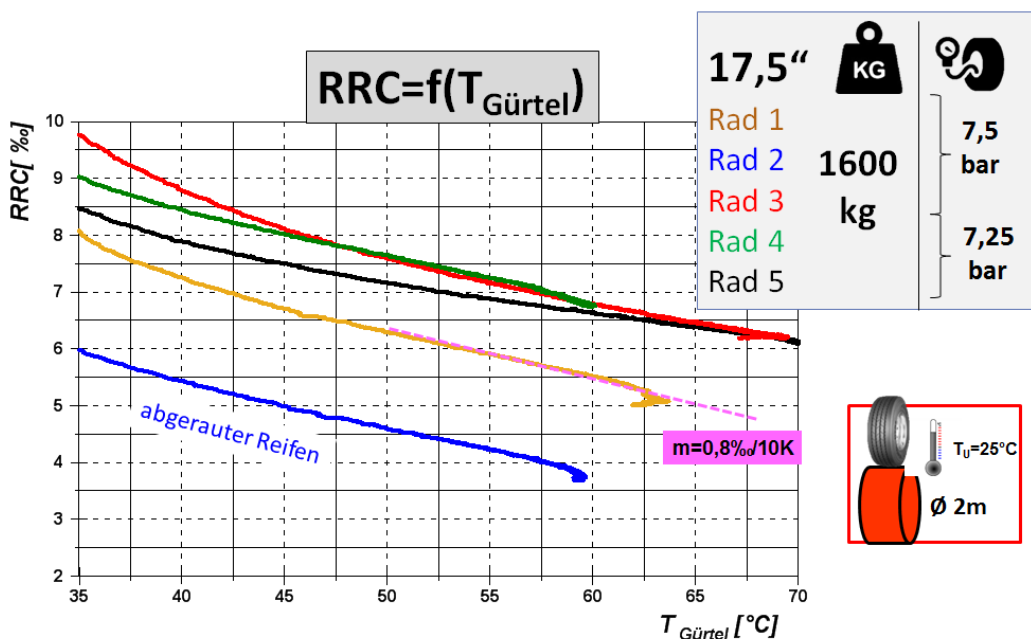


Bild 19: Übergangsverhalten Rollwiderstand ‘indoor‘ 17,5“ (v=60km/h)

Die Anmerkung unter a. soll darauf hinweisen, dass der eingesetzte abgeraute Reifen mit der Bezeichnung Rad 2 einen gegenüber dem Neureifen (Rad 1) erheblich reduzierten, sehr niedrigen Rollwiderstand aufweist. Während des Warmlaufs war dieser Effekt über das gesamte Temperaturband hinweg erkennbar, siehe **Bild 19**. Der enorme Profilhöheneinfluss auf den Rollwiderstand ist bekannt, er wurde so zuvor auch an Reifen der Dimension 22,5“ nachgewiesen [5]. Der im Labor ermittelte Stationärwert von nur 3,8 ‰ wurde kontrolliert und bestätigt. Unter Berücksichtigung einer Fehlertoleranz von nur 0,5 ‰ (abs) für die ‘Testmethode MTL‘ reicht die Messgenauigkeit jedoch nicht

aus, um die vorgestellte geringe Abweichung zwischen Trommel und MTL zuverlässig interpretieren zu können.

Mit der Anmerkung unter b. verbindet sich die bekannte Erfahrung, dass bei einer kleinen Reifengröße die Rollwiderstandsdifferenz zwischen dem auf einer konventionellen Außentrommel und dem auf einer ungekrümmten Fahrbahn erzielten Ergebnis geringer als bei großen Reifen ist. Die Auswirkung der unterschiedlichen Kontaktbedingungen drückt sich in dem Zusammenhang

$$K = \sqrt{\frac{R_{Trommel}}{(R_{Trommel} + r_{Reifen})}}$$

aus. Ein entsprechender zahlenmäßiger Überschlag mit einem Trommeldurchmesser von 2m führt auf folgende Einflussfaktoren:

Raddimension	Einflussfaktor K	
	Übertragung Trommel / Ebene	
17,5"	0,86	
22,5"	0,82	

Ein wissenschaftlicher Nachweis für die Gültigkeit der Übertragungsformel besteht auch für Reifen der Kategorie C2 (C3) noch nicht, jedoch theoretisch wäre somit auf der ebenen Straße ein um 14% reduzierter Rollwiderstand hilfsweise annehmbar. Offensichtlich stehen dieser auf reduzierten Walkarbeitsverlusten basierenden Reduktion des Rollwiderstandes jedoch in der realen Betriebsumgebung Verluste entgegen. Vorrangig handelt es sich dabei um Auswirkungen von Fahrbahnrauigkeiten.

Erheblich mehr als beim Abrollen auf einer glatten Stahltrommel wird dem Reifen auf einer texturierten Fahrbahn im Bereich der Kontaktfläche Energie entzogen. Einerseits kann dort ein differierender, mehr oder weniger intensiver Wärmeübergang stattfinden, andererseits kommen hierfür reibungsspezifische Effekte in Frage. Dieser Sachverhalt begründet beispielsweise die Notwendigkeit, einen von der konventionellen glatten Stahltrommel abweichenden Sonderbelag im Prüfprotokoll der Standardprozedur nach ISO 28580 ausweisen zu müssen. Zu den auf realen Fahrbahnen festgestellten Texturauswirkungen auf die Höhe des Rollwiderstandes gibt es Untersuchungen, die sich überwiegend auf Reifen der Kategorie C1 beziehen, jedoch nur wenige mit dem Fokus auf größere Räder. Feine kurzweilige Rauigkeiten, die als Mikrotextrur eingestuft werden, sind hinsichtlich Rollwiderstand von schwächerer Bedeutung als jene mittlerer Wellenlänge (Makrotextrur). Bemühungen in der Vergangenheit, einen Zusammenhang

zwischen Texturkennwerten und Rollwiderstandsverlusten herzustellen, sind aufgrund der Komplexität schwierig und liefern noch keine universelle Übertragbarkeit.

Aus der Versuchspraxis auf der wenig rauen Asphaltbahn des Prüfgeländes und Gegenüberstellungen mit Trommelläufen ist dem Verfasser bekannt, dass für Reifen (22,5“) im Zustand Vollprofil ein Anteil von 0,6 – 0,9 ‰ als absolute RRC-Differenz vorkommen kann. Bezogen auf einen Reifen mit RRC=5 ‰ beträgt der Texturanteil am Rollwiderstand somit rechnerisch 12-18%. Hingegen nicht hinreichend bekannt ist, ob sich diesbezüglich eine ähnliche Spreizung ergibt, wenn statt eines Reifens im Zustand Vollprofil Reifen mit minimaler Profiltiefe betrachtet werden. Dieser vorangestellt unter c. angemerkt Aspekt kann, was den Einfluss innerhalb der Gegenüberstellung angeht, deshalb nicht zuverlässig in Zahlen ausgedrückt werden.

Nach diesen ersten grundlegenden Erfahrungen wurde das Interesse an weiteren Warmlauftests geweckt, alle der insgesamt 10 messtechnisch präparierten Objekte der Reifenauswahl wurden deshalb zusätzlich zum eigentlichen Versuchsprogramm auf einer Trommelanlage entsprechend untersucht. Die erzielten Ergebnisse gehen getrennt nach Dimension aus den Darstellungen in den **Bild 19** (17,5“), **Bild 20** (22,5“) anschaulich hervor.

Die den Zusammenhang von Materialtemperatur und Rollwiderstand charakterisierenden Verläufe $RRC=f(T_G)$ beschreiben oberhalb von ca. 45°C eine annähernd proportionale Abhängigkeit. Hinweise auf diese typische Ausprägung finden sich übrigens auch schon in weit zurückliegenden Forschungsarbeiten, so beispielsweise 1989 bei Krehan [6] für den Messort Schulter außen. Innerhalb der Reifenpalette auffällig ist, dass die Kurvensteigung von Reifen 5 deutlich flacher als bei den 4 weiteren Exemplaren ist.

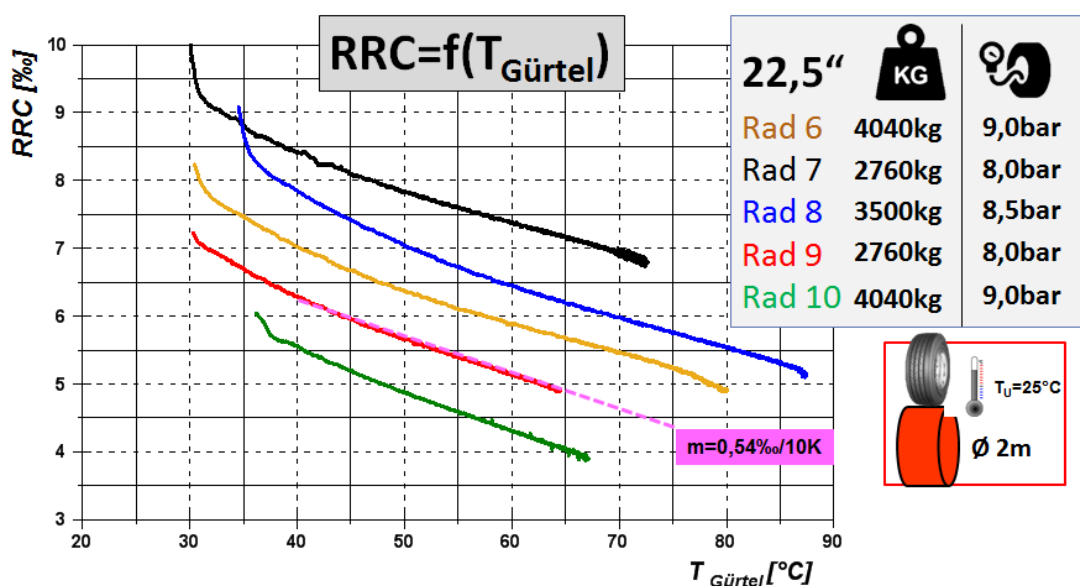


Bild 20: Übergangsverhalten Rollwiderstand ‘indoor‘ 22,5“ (v=60km/h)

Erklärungen für dieses Merkmal konnten nicht in Erfahrung gebracht werden. In den beiden Darstellungen sind 2 Steigungen markiert worden, um den offensichtlich spezifischen Unterschied zwischen den beiden Reifenkategorien zu demonstrieren: 0,8%/10 K (17,5“) vs. 0,52%/10 K (22,5“).

Zusammengefasst ergeben sich daraus für das Übergangsverhalten unter Indoor-Bedingungen der betrachteten 9 Vollprofil-Exemplare die Aussagen:

- i) *Rollwiderstandsänderungen sind frühzeitig, schon vor Erreichen des durch die Zeitkonstante der Materialtemperatur T_{90Lab} definierten Zeitpunktes eindeutig temperaturproportional*
- ii) *bei großen Reifen (C3) ist ein größeres Temperaturdelta als bei kleineren Reifen (C2) erforderlich, um den Rollwiderstand um den gleichen Betrag zu verringern/steigern.*

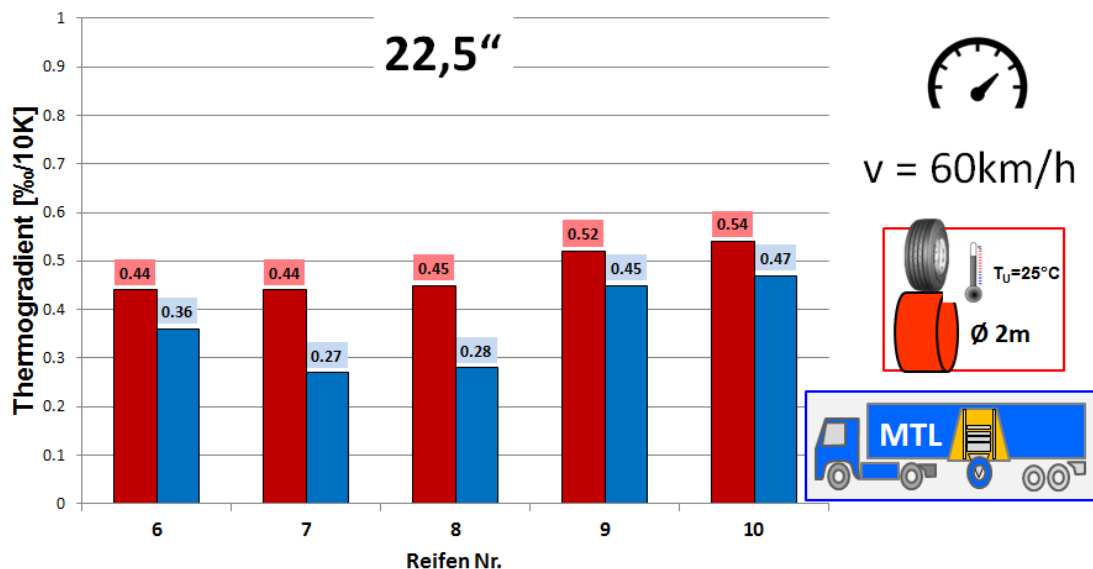


Bild 21: Thermogradienten 'outdoor vs. indoor'

Können die auf der Trommelanlage unter konstanten Umgebungsbedingungen ($T=25^{\circ}\text{C}$) beim Warmlaufprozess gewonnenen Rollwiderstand-Temperaturkennungen auf eine reale Fahrumgebung übertragen werden? Unter Hinweis auf den Vorgängerbericht FAT_304 [7] kann die darin als Einzelfall erstmals vorgestellte schwächere Abhängigkeit von $\text{RRC}=f(T_G)$ im Outdoor-Betrieb durch aktuelle Ergebnisse bestätigt werden. In **Bild 21** sind für die 5 untersuchten Räder der Größe 22,5“ jeweils beide für das Merkmal 'Kennungsgradient' aus den Linearabschnitten ermittelten Werte gegenübergestellt. Der Variantenvergleich, der auf sehr unterschiedlichen äußeren Umgebungstemperaturen beruht, untermauert in dieser Form die Feststellung:

Ein Delta an Rollwiderstand korreliert auf dem Prüfstand (gegenüber der Straße) mit geringerer Veränderung der Materialtemperatur.

Welche Bedeutung dabei von den in beiden Betriebsumgebungen des Reifens unterschiedlichen Wärmeflüssen und einer letztlich abweichenden Wärmeverteilung im Reifen ausgeht, lässt sich nach derzeitigem Stand noch nicht zuverlässig beantworten. Da die komplexen thermo-mechanischen Wechselwirkungen sich zwischen den beiden Testvarianten während des Warmlaufs jedoch nicht gravierend voneinander unterscheiden, erweist sich in den gegenübergestellten Zusammenhängen von Gas- und Materialtemperatur, **Bild 22**.

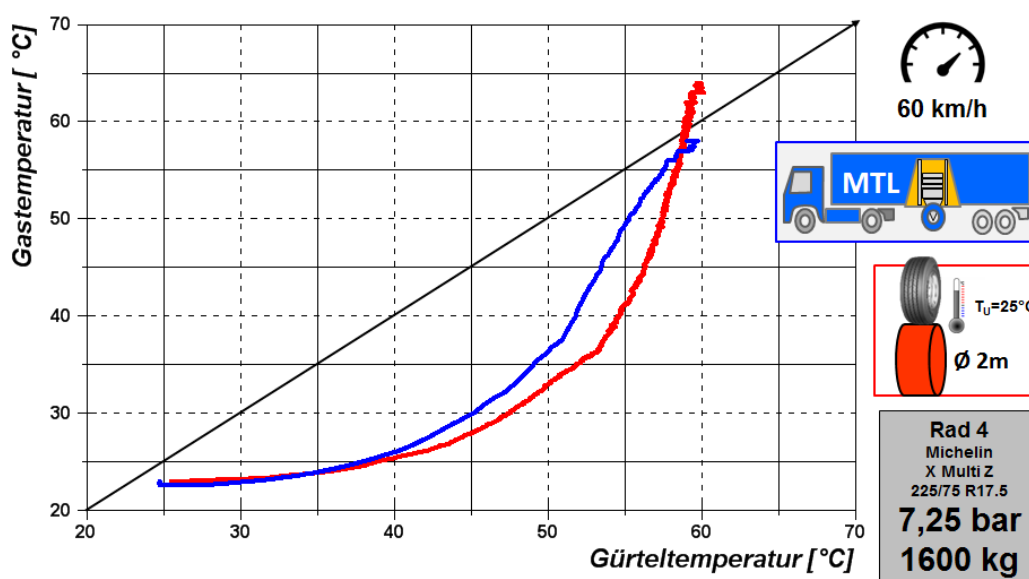


Bild 22: Entwicklung der Gastemperatur über der Gürtelkantentemperatur

Der erkennbare Ablauf einer allmählichen Angleichung von auseinanderliegender Gas- und Materialtemperatur divergiert zwischen den beiden Betriebsituationen (MTL/Prüfstand) nur in geringem Maße. Allerdings vom Trend her befindet sich der Verlauf 'Prüfstand' – wie auch in anderen untersuchten Fällen - über weite Bereiche (rechtsseitig) neben dem Verlauf 'MTL', worin sich eine höhere Materialtemperatur bei gleichen Gastemperaturen während des Warmlaufs ausdrückt. Das bei vergleichbar warmer Umgebung am Prüfstand höhere Beharrungs-Temperaturniveaus vorkommen, ist bereits berichtet worden.

8.2 Stationärer Rollwiderstand

Als Referenzstandard für sämtliche Reifen der im eigentlichen Fokus dieser Untersuchung stehenden Teilaufgabe >Stationärer Rollwiderstand< werden zwei definierte Beharrungszustände herangezogen:

Zustand I: 80 km/h – reguläre Standardbedingungen bzgl. Klassifikation Reifenlabel (nur Trommel)

Zustand II: 60 km/h – Warmlaufbedingungen, Radlasten u. Fülldruck, wie vorgestellt (Trommel vs. MTL)

Während die den Zustand I beschreibenden Rollwiderstandsklassen aus öffentlichen Quellen zur Verfügung standen, mussten die erforderlichen Angaben zu II. aus den beschriebenen Warmlaufuntersuchungen aller 10 Reifen unter Einsatz beider Prüfverfahren selbst ermittelt werden. In Ausnahmefällen, wo die bereits angesprochene verkürzte Testdauer zu offensichtlichen Verfälschungen geführt hätte, wurden mathematische Extrapolationen durchgeführt, was für die Beträge der stationären Werte nur marginale Korrekturen zur Folge hatte.

Aus den Gegenüberstellungen in

Bild 23 (17,5“) und

Bild 24 (22,5“) gehen die für den Stationärfall im Zustand II mit beiden Testverfahren (indoor vs. outdoor) festgestellten stationären Rollwiderstandskoeffizienten beider Reifengrößen übersichtlich hervor. Bei den angegebenen Temperaturwerten handelt es sich um Materialtemperaturen an der Gürtelkante, die stationär unter verschiedenen Umgebungsbedingungen erreicht wurden. Sie sind eine wichtige Information zum Verstehen divergierender Rollwiderstände zwischen >Straße und Labor<.

Unverkennbar liegen die Temperaturwerte des Materials bei den 22,5“ Rädern in der Testsituation ‘Outdoor‘ gegenüber dem Laborniveau erheblich niedriger, während diesbezüglich nahezu übereinstimmende Temperaturlevel bei den 17,5“ Rädern vorliegen. Zurückführen lassen sich die Übereinstimmungen beim betrachteten inneren thermischen Reifenzustand auf sowohl ‘indoor wie outdoor‘ ähnliche äußere Temperaturbedingungen, während sich die hohen Temperaturdifferenzen von bis zu 24 Kelvin im niedrigen Umgebungstemperaturniveau der Outdoor-Messreihe 22,5“ begründen.

Bedingt durch die spezifischen inneren Temperaturzustände ergeben sich auf der Straße niedrigere bis gleichhohe Rollwiderstände (Gruppe 17,5“), oder höhere als auf der Trommel gemessene, wobei letztere Aussage die Objekte der Größe 22,5“ betrifft. Grundlage des Vergleichs sind die Gegenüberstellungen für eine Prüfgeschwindigkeit von 60 km/h in den Kategorien c_{R_60} und MTL_60 .

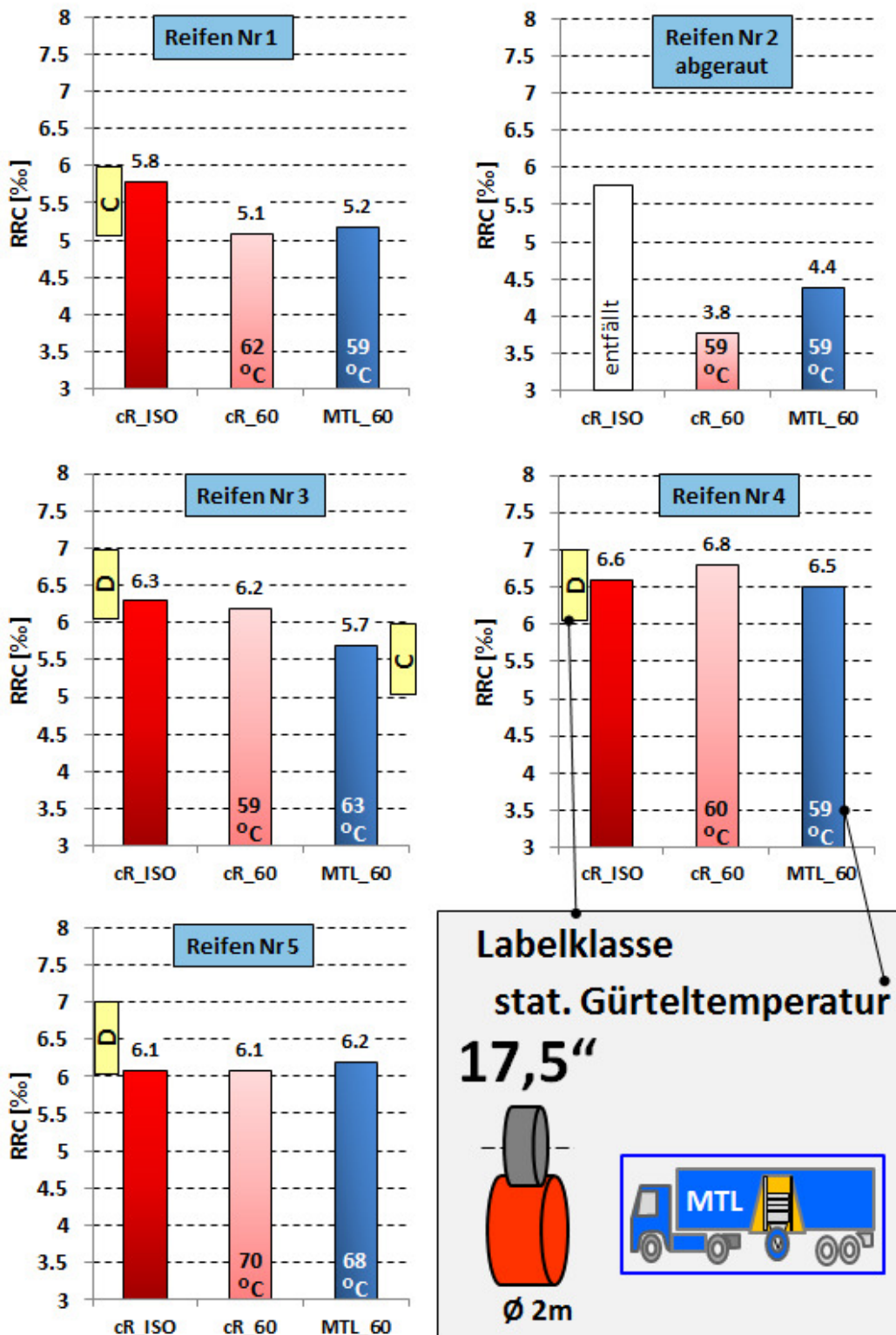


Bild 23: Radgruppe 17,5“ – stationäre Rollwiderstände

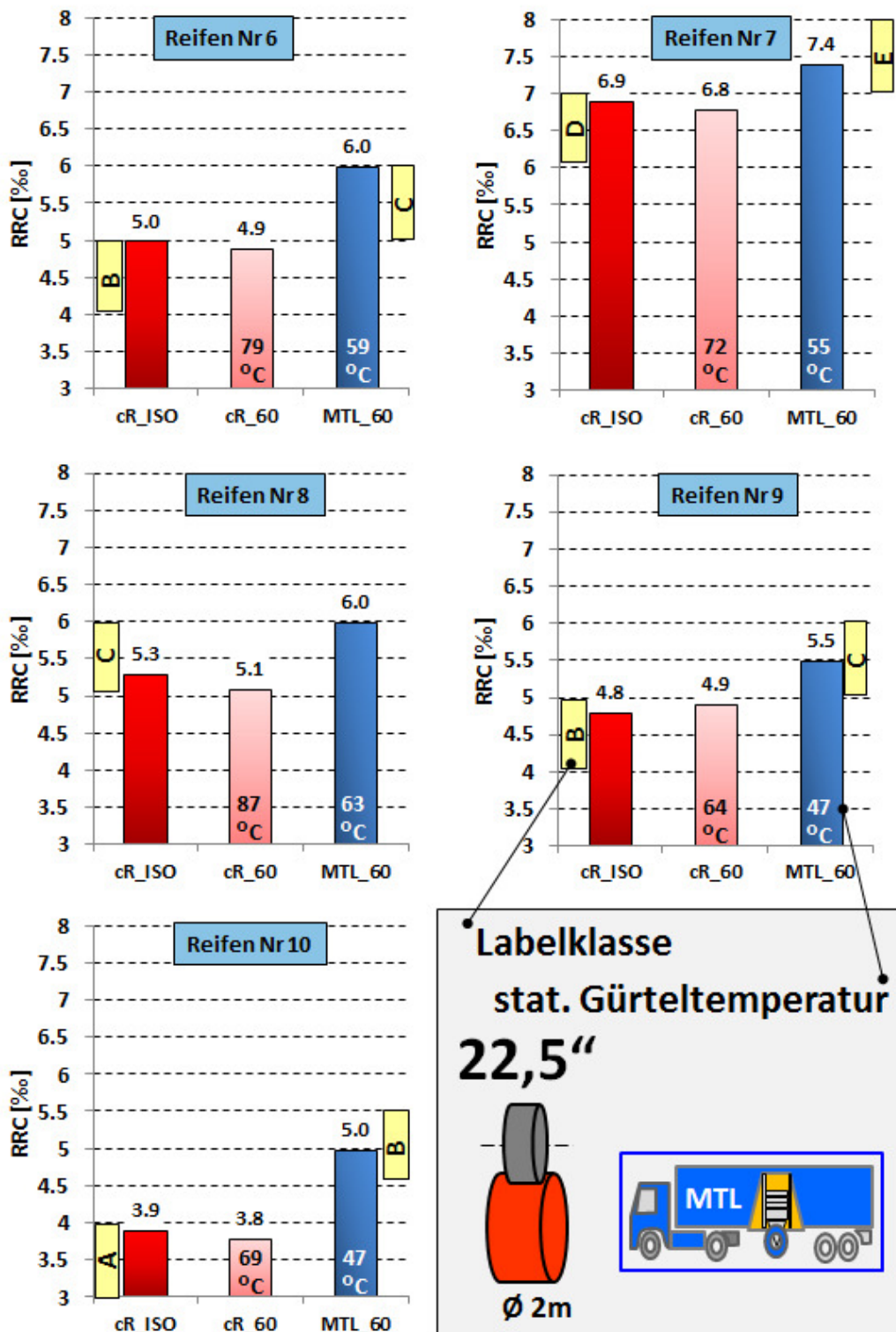


Bild 24: Radgruppe 22,5“ – stationäre Rollwiderstände

Der Vergleich der für $v=60$ km/h ermittelten Rollwiderstände mit den ebenfalls aufgeführten Labelangaben beinhaltet unterschiedliche Prüfbedingungen, was die Frage aufwirft, ob die voneinander abweichenden Umfangsgeschwindigkeiten des Reifens $v=60$ bzw. 80 km/h nicht von vornherein durchgängig eine typische Geschwindigkeitsabhängigkeit als Ergebnistrend aufweisen müssten.

Aus intensiven Erfahrungen zur Abhängigkeit von $RRC=f(v)$ auf der Basis des auf einer 2m Außentrommelanlage im Labor exemplarisch untersuchten Trailerreifens (Rad 10) ist eine fallende stationäre Kennung bekannt geworden [1], die im Kurvenumkehrpunkt bei 85 km/h ein Minimum an Rollwiderstand aufweist und den niedrigeren Geschwindigkeiten zunehmende Werte zuordnet.

Eine geringe Steigung des auch mathematisch formulierten regressiven Zusammenhangs zwischen den Stufen 60 et. 80 km/h drückt folgerichtig aus, dass die nach jeweils 3-stündigem Warm-up festgestellten Stationärwerte sich nur unbedeutend unterscheiden. Vor dem Hintergrund kleinster Differenzen erklärt sich auch, dass bei einer aktuell durchgeführten Kontrolle diese feine Staffelung nicht nachvollzogen werden konnte, was zugleich die gemeinhin endlichen Grenzen der Reproduzierbarkeit von Messwerten, so auch hier beim hochauflösenden Labortest, als kritischen Umstand ins Blickfeld rückt.

Ob die am $22,5''$ Trailerreifen (C3) festgestellte Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollwiderstandes auf andere Reifenausführungen dieser Kategorie übertragbar ist, ist bisher nicht nachgewiesen. Mit Blick auf die Säulenwerte cR_{ISO} und cR_{60} der Radgröße $17,5''$ erscheint es sehr fraglich, ob die regressive Ausprägung und die Lage des Minimums auch für Reifen dieser Kategorie (C2) generell typisch ist. Zwei Stichproben in Form einzelner Labor-Prüfläufe mit den Rädern 4 und 5 haben die kritische Haltung bestätigt. Im Gegensatz zum $22,5''$ Reifen unterscheiden sich bei beiden ($17,5''$) die Materialtemperaturen zwischen den Stufen $v=60$ km/h und $v=80$ km/h nur marginal. Aufgrunddessen wäre für 80 km/h in Verbindung mit der höheren Hysterese Frequenz ein höherer Rollwiderstand zu erwarten, was bei Rad 4 auch eintritt, sich jedoch bei Rad 5 nicht abzeichnet.

Für alle 9 Reifen im Zustand Vollprofil wurden die herstellerseitigen Einstufungen in Labelklassen (ISO) von A bis D durch singuläre Kontrollmessungen einwandfrei bestätigt. Einzelne Abweichungen zwischen den Werten von cR_{ISO} und cR_{60} mit Betragdifferenzen $\Delta RRC > 0,25 \%$ liegen außerhalb der typischen Toleranz, die dem Verfasser von derartigen Untersuchungen in gleicher Laborumgebung bekannt ist. Leider ließ sich die Ursache hierfür nicht exakt ermitteln.

Eine zentrale Aussage der Gegenüberstellung von stationären Rollwiderständen ‘Labor vs. Straße’ ergibt sich aus der Untersuchung der 17,5“ Räder. Basierend auf einem dank hoher Umgebungstemperaturen thermisch einheitlich hohen Temperaturniveau im Reifeninneren (Material) fügen sich die ermittelten Rollwiderstandskoeffizienten in ein und derselben Klasse ein - unabhängig von der Prüfsituation >Trommel oder Strasse<.

8.3 Zeitvariantes Verhalten – der Zyklus RDC

Entsprechend dem in Kapitel 6 vorgestellten Versuchsprogramm, lag der aktuelle Schwerpunkt bei den mittels ‘MTL’ durchgeführten Outdoor-Messreihen auf dem Themenkomplex >Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen im Verteilerverkehrseinsatz<.

Mit Blick auf die beiden Nutzfahrzeugkategorien ‘leicht‘ und ‘schwer‘ sind im Testprogramm die beiden bevorzugten Radgrößen 17,5“ und 22,5“ mit jeweils 5 Exemplaren berücksichtigt worden. Wie zuvor schon beschrieben, wurden beide Gruppen separat auf dem Rundkurs des benutzten Versuchsgeländes untersucht, was auftragsbedingt in zeitlich weit auseinanderliegenden Versuchsblöcken erfolgte.

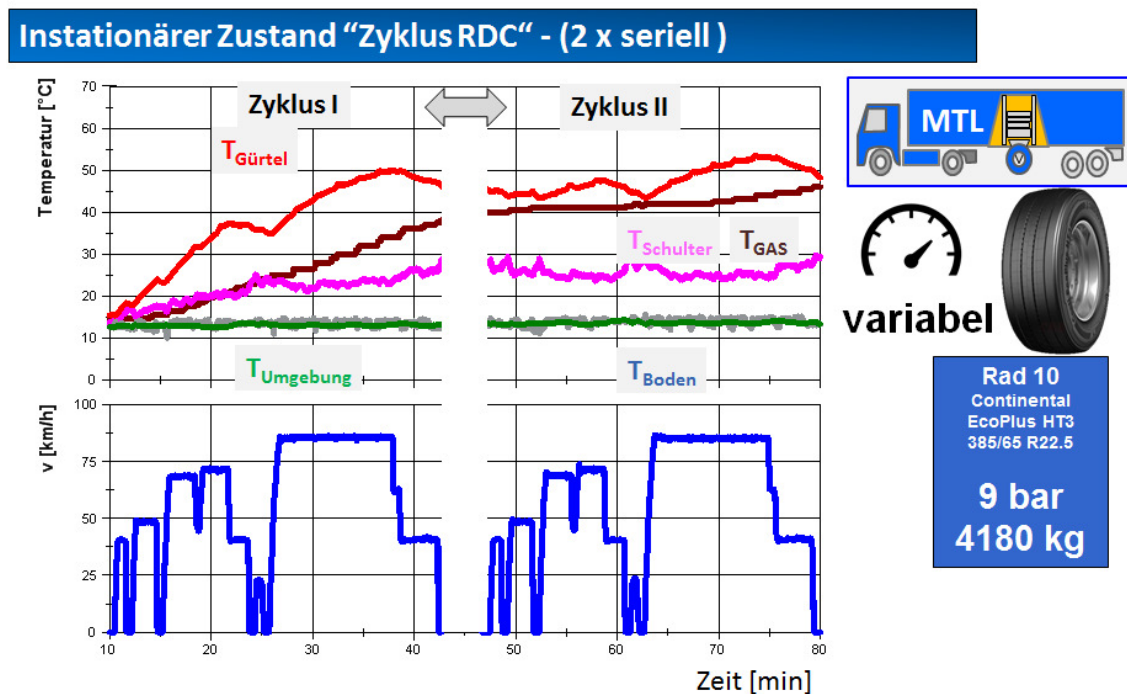


Bild 25: Beispielhafte Verläufe von Zustandsgrößen - Zyklus ‘RDC’(I und II)

Wie das Stichwort *Verteilerverkehr* schon impliziert, unterscheiden sich die Betriebsbedingungen bei der als RDC-Test bezeichneten Aufgabe grundlegend von den fest verankerten stationären Bedingungen einer konventionellen Rollwiderstandsmessung. Aus der veranschaulichten Testdefinition für den Rolling Delivery Cycle ist ersichtlich, dass der steuerbare Betriebsparameter Fahrgeschwindigkeit hierbei keine Konstante mehr ist, sondern – das ist die zentrale Besonderheit - nach einem bestimmten Zeit- bzw. Streckenmuster gezielt variiert wird.

Damit wird einer fiktiven Betriebssituation mit wechselnder Fahrgeschwindigkeit Rechnung getragen, welche nicht mehr stationär, sondern transient geprägt ist. Es ist per

se anzunehmen, dass typische Betriebsbedingungen aus der Nahverkehrsrealität mittels der Methode ‘RDC’ aussagekräftiger als mit $v=\text{const.}$ abgebildet werden. Wobei jedoch unbedingt ein wesentlicher Aspekt anzumerken ist:

Jahreszeitlich unterschiedliche und auch streuende Temperaturumgebungen können den auftretenden Rollwiderstand erheblich beeinflussen und sich somit intensiv auf Outdoor-Testergebnisse auswirken - allerdings ist dieser Einflussparameter in der Versuchspraxis aus bekannten Gründen nicht steuerbar. Für Schlussfolgerungen zum Rollwiderstand im absoluten Maßstab ist es insofern zwingend erforderlich, die umweltseitig beteiligten Rahmenbedingungen in solche Betrachtungen einzubeziehen.

Der RDC wurde mit jedem Reifenobjekt zweimal durchfahren, einmal mit kaltem Reifen (Zyklus I) und im direkten Anschluß daran – quasi unterbrechungsfrei – als Wiederholungslauf (Zyklus II) im Zustand >Reifen warm<, wie beispielhaft in **Bild 25** für Reifen 10 dargestellt.

Die Geschwindigkeitsverläufe beinhalten abschnittsweise konstante Geschwindigkeitsstufen, insgesamt handelt es sich um 10 Intervalle, ein weiteres Merkmal sind 4 kurze Stoppabschnitte von je 30 s Standzeit. Im Folgenden werden ausschließlich die stationären Zeitsegmente im Fokus der Rollwiderstandsanalyse stehen, wo mit $v=\text{const.}$ eindeutig stationäre Betriebsintervalle vorliegen, die kurzen transienten Übergangsphasen verursacht durch Beschleunigung und Verzögerung bleiben unberücksichtigt ebenso auch das extrem kurze Intervall IV.

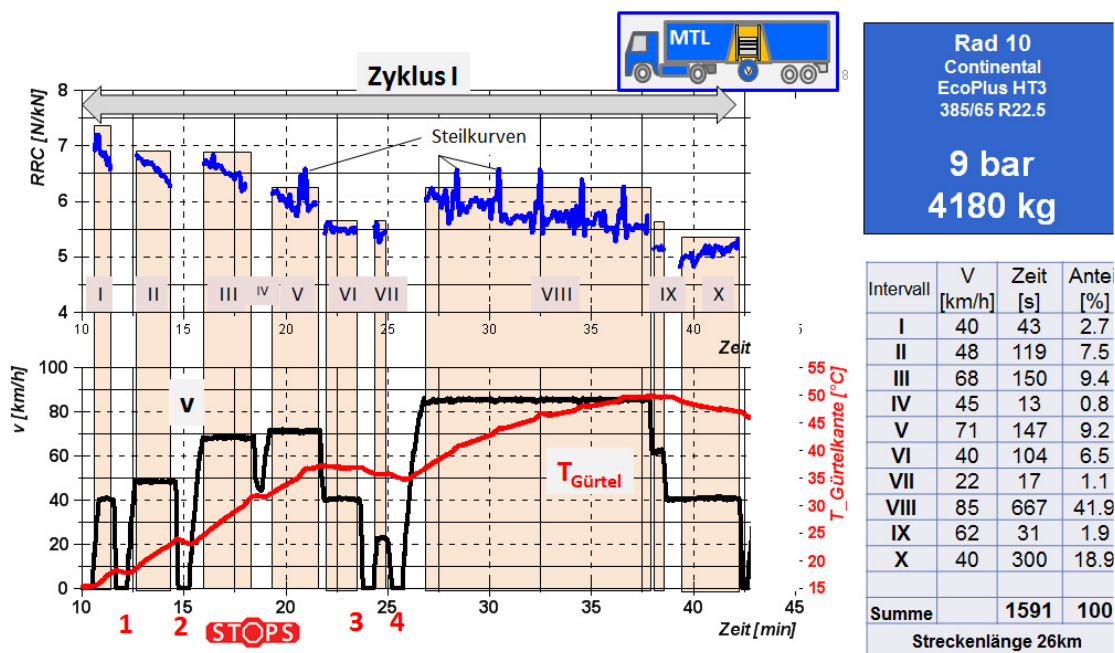


Bild 26: Fahrzyklus RDC – Rollwiderstand @ Temperatur

Auch in der zeitlich gestreckten Darstellung (**Bild 26**), nur Zyklus I ist darin wiedergegeben, erweist sich die Materialtemperatur als nicht kontinuierlich steigend, eine Tendenz, die die Geschwindigkeitssprünge von 'hoch auf tief' begleitet, entsprechend dem verringerten Energieumsatz. Mit 50°C liegt der als Maximum nach 27 Minuten "Warmlaufdauer" erreichte Temperaturwert ca. 19 Kelvin unterhalb des Temperaturniveaus, welches unter stationären Bedingungen bei $v=\text{const. } 60 \text{ km/h}$ beim Labortest mit diesem Reifen erreicht wurde.

Ein Wert, der sogar 12°C unter der Schwelle rangiert, die das Merkmal $T_{90\text{Lab}}=62^\circ\text{C}$ kennzeichnet. Im Wiederholungslauf, begonnen mit dem Startzustand 'Reifen warm', steigt die Reifentemperatur am Messort Gürtelkante nur wenig höher, erreicht werden maximal 53°C (**Bild 27**). Wenngleich über 70 Minuten Testdauer verstrichen sind, liegt der Spitzenwert der Materialtemperatur auch dann noch deutlich unterhalb dem vom Labortest bekannten Stationärwert, was im Rahmen abweichend thermischer Umgebungsbedingungen keinesfalls ungewöhnlich ist, wie bereits von Vergleichen der stationären Temperaturwerte (Labor vs. Straße) bekannt.

Besser als über die singuläre thermische Zustandsbeschreibung >Maximalwert der Materialtemperatur< kann im Betriebsfall 'Fahrzyklus' der über ein Zeit- oder Wegfenster berechnete Mittelwert die für den Rollwiderstand relevante Temperatursituation indizieren. Die für beide Zyklen getrennt aufgelisteten zeitbezogenen Mittelwerte der Reifentemperatur unterscheiden sich erwartungsgemäß sehr deutlich, siehe nachfolgende **Tabelle 3**.

Reifen 10	Temperatur an der Gürtelkante [°C]		
	Ref. 'Trommel 60 km/h' Stationär	Zyklus I	Zyklus II
Maximum	69	50	53
Mittelwert	--	37,6	47,8

Tabelle 3 Kerntemperaturwerte <stationär vs. zeitvariant>

Das tiefere Niveau der Mittelwerte wirft die Frage auf: Welche Auswirkungen auf den Reifenrollwiderstand hat beim RDC die sich gegenüber dem stationären Standardverfahren abhebende thermische Gesamtsituation?

Aus dem Rohverlauf des Rollwiderstandes (Bild 26) geht zu Beginn ein eindeutig fallender Trend hervor, wie vom stationären Warmlauf bekannt und für die Phase zunehmender Reifenerwärmung typisch.

Das hohe Anfangsniveau von über 7 %o verringert sich über der Zeit, allerdings ist der Verlauf aufgrund der wechselnden Geschwindigkeitsstufen unstetig. Als bemerkens-

werte Zäsur im Kurventrend tritt der 4te Stopp in den Vordergrund, wo der zurückgegangene Widerstand nach der Unterbrechung sprunghaft von $RRC=5,4\text{‰}$ auf über 6‰ hochschnellt. Hintergrund dieses Effekts sind jene Wechselwirkungen, die bereits im Kapitel >Übergang v-Sprung< des Berichts FAT_304 [1] vom Verfasser beschrieben wurden.

Der schnelle Übergang von einer niedrigen auf eine hohe Geschwindigkeitsstufe führt grundsätzlich zu einer abrupten Rollwiderstandserhöhung, die im weiteren zeitlichen Verlauf allmählich abklingt. Sobald im Reifen ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen höherer Biegewechselfrequenz und Wärmeströmen erreicht ist, verharrt ebenfalls der Rollwiderstand auf einem konstanten Niveau. Ein entsprechender Zwischenzustand scheint am Ende der 12 minütigen Geschwindigkeitsstufe 85 km/h mit $RRC=5,5\text{‰}$ erreicht zu sein (Bild 26).

Der weitere Verlauf von RRC lässt erkennen, dass über die anschließende 2-stufige Reduktion der Reifenumfangsgeschwindigkeit ein gegenteiliger Effekt ausgelöst wird. Der Rollwiderstand geht sprunghaft auf ein tieferes Niveau, steigt allerdings danach sofort wieder kontinuierlich an. Dieses für den Abwärtssprung der Reifendrehfrequenz typische Verhalten ist sowohl auf den Einfluss der Hystereseffrequenz (Biegewechsel etc.) als auch auf den transienten Wärmeüberschuss zurückzuführen.

Offensichtlich besteht im Zeitraum bis zum Versuchsabbruch noch keine statische Balance zwischen den thermo-mechanischen Wechselwirkungen, die ‘Wärmeströme’ sind noch nicht ausgeglichen. Erkennbar daran, dass zwar der auf 5‰ zurückgegangene Rollwiderstand erwartungsgemäß ansteigt, jedoch bei längerer Dauer dieses Betriebsabschnitts (40 km/h) sehr wahrscheinlich noch höher gestiegen wäre.

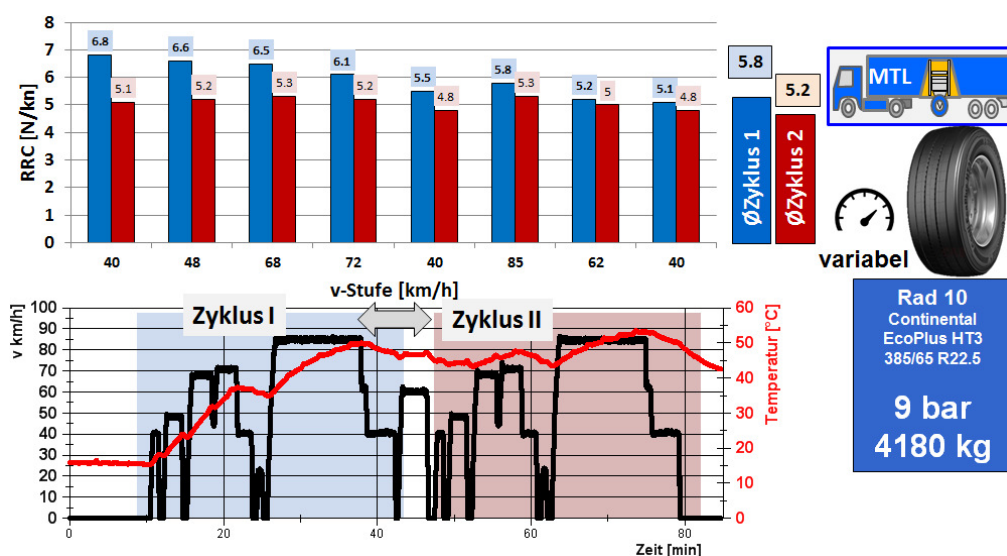


Bild 27: RDC – mittlere Rollwiderstände in stationären Intervallen

Wie sich der Rollwiderstand blockweise über die stationären Intervalle zeitlich entwickelt, lässt sich durch diskrete Ergebniswerte für jede Geschwindigkeitsstufe ausdrücken. Das in **Bild 27** vorgestellte Säulendiagramm berücksichtigt für diese gestufte Übersicht einzelne, intervallbezogene Mittelwerte, während hingegen für die im rechten Bildteil dargestellten Durchschnittsangaben ein Integral über die gesamte Zeitachse des Zyklus‘ verwendet wird. Die beiden Ergebnissäulen beruhen somit auf einem zeitbezogenen Mittelwert des Rollwiderstandes, welcher bei der Rollwiderstandsgegenüberstellung einzelner Reifen als Maßstab herangezogen wird.

Die als \emptyset Zyklus I bzw. \emptyset Zyklus II in Bild 27 bezeichneten Werte kennzeichnen für jeden Zyklus separat den auf einer Länge von 26 km unter den spezifischen Rahmen- und Betriebsbedingungen festgestellten zeitbezogenen mittleren Rollwiderstand. Im dargestellten Beispielfall (Rad 10) unterscheiden sich beide Läufe deutlich voneinander, was ursächlich auf ein unterschiedliches Reifentemperaturniveau zurückzuführen ist. Im Wiederholungslauf ist der Reifen zu Beginn bereits vorgewärmt, deshalb liegt das Temperaturniveau höher. So geht aus **Tabelle 3** eine Differenz von 10 Kelvin den Beispielfall betreffend hervor.

Nach dieser exemplarischen Vorstellung von Messgrößenverläufen und auch Auswertungsschritten soll darauf hingewiesen werden, dass sich eine breite Gegenüberstellung der erzielten reifenspezifischen Ergebnisse im nachfolgenden Kapitel befindet.

8.4 Gegenüberstellung der Rollwiderstände stationär vs. zeitvariant (RDC)

In Bezug auf die Interpretation und auch Aussagekraft der Messergebnisse ist es ein günstiger Umstand, dass sich die thermischen Umgebungsbedingungen zwischen den beiden Outdoor-Versuchsböcken zufällig erheblich unterscheiden, jedoch blockweise nivelliert auftreten. Demzufolge ermöglicht das relativ konstante äußere Temperaturniveau in beiden Gruppen einen direkten Vergleich zwischen den Rollwiderstandswerten stationärer und zeitvarianter Herkunft.

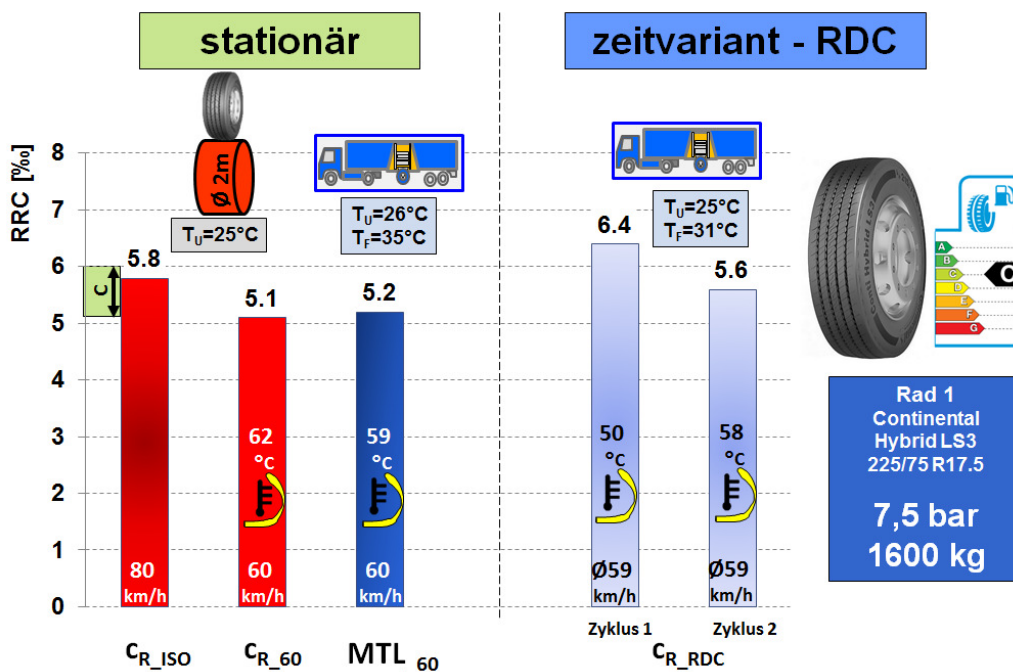


Bild 28: Rollwiderstände und Kerntemperaturen – beispielhafter Vergleich (17,5“)

Stellvertretend für die Testgruppe >Radgröße 17,5“< wird am Beispiel von Rad 1, einem Standard-Lenkreifen, der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Verfahrenszweige >stationär vs. zeitvariant< gezeigt (**Bild 28**). Das zentrale Merkmal in dieser Rädergruppe: Gegenüber der Laboruntersuchung (T_U=25°C) zum Teil deutlich höhere Temperaturen bei den Straßentests. Darauf weist auch die Legende mit den Angaben T_U=26°C bzw. T_F=35°C extra hin.


Vor dem Hintergrund der spezifischen Testbedingungen sind in Bezug auf die Radgruppe 17,5“ folgende, hier sichtbare Verhaltensmerkmale festzustellen:


- der Stationärwert c_{R_60} rangiert in der nominierten Labelklasse
- stationäre Rollwiderstände sind auf Straße und Trommel nahezu gleich hoch
- mittlerer Rollwiderstand im Betriebsfall 'RDC' überragt das Stationärniveau c_{R_60}
- mittlerer Rollwiderstand in Zyklus I überschreitet Labelklasse (Einzelfälle)
- mittlerer Rollwiderstand in Zyklus II nähert sich c_{R_60} an

Die vorstehenden Aussagen werden durch die tabellarische Gegenüberstellung (**Bild 29**) mit Zahlenwerten für die untersuchte 4er Gruppe mit regulärer Profilhöhe belegt. Ein aus der Gruppe hervorzuhebender Sonderfall ist der profilarme Reifen (Rad 2) mit einer von 12 auf 3,5mm verringerten Profilhöhe. Für dieses spezielle Einzelexemplar wurde mittels Labortest eine Rollwiderstandsreduktion von rund 25% ermittelt; eine Größenordnung, welche sich mit vormals an Reifen der Dimension 22,5“ gemachten Erfahrungen deckt [5], jedoch hat sich im aktuellen Fall dieser vermeintliche Vorteil auf der Straße nur abgeschwächt mit einem Delta von 13% dargestellt. Verstärkte Textureinflüsse bei realem, rauem Fahrbahnkontakt könnten eine mögliche Begründung hierfür sein, ohnehin fällt der Rauigkeitsgrad bei kleineren Raddurchmessern (Kategorie C1) bekanntlich stärker ins Gewicht.

Zurück zu den Verhaltensmerkmalen und Bild 28. Bei dem vorgestellten Reifenobjekt (Rad 1), eingeteilt in die Rollwiderstandsklasse C, wurde im Betriebsfall >Zyklus I< ein höherer Rollwiderstand ermittelt. Der Zuwachs an Rollwiderstand gegenüber dem Stationärtest ‘MTL_60‘ um 1,2‰ abs. ist vor allem eine Folge des niedrigeren mittleren Temperaturniveaus (50 zu 59 °C) im zyklischen Betriebsfall.

**17,5“
Räder**

 $T_U=25^{\circ}\text{C}$
 $\varnothing 2\text{m}$










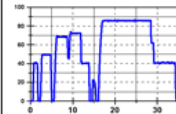
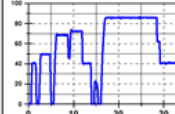
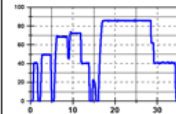
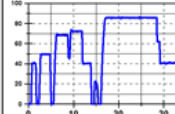
Reifen	Label (ISO) 80 km/h const.		Indoor ‘Prüfst’ 60 km/h const.		Outdoor ‘MTL’ 60 km/h const.		Outdoor ‘MTL’ Zyklus I		Outdoor ‘MTL’ Zyklus II	
	RRC ‰	T _{Gürtel} °C	RRC ‰	T _{Gürtel} °C	RRC ‰	T _{Gürtel} °C	Ø RRC ‰	T _{Gürtel} °C	Ø RRC ‰	T _{Gürtel} °C
										
1	C (5.1-6.0) 5.8	---	5.1	62	5.2	59	6.4	50	5.6	58
2	profilarm	---	3.8	59	4.4	59	5.2	52	4.7	59
3	D (6.1-7.0) 6.3	---	6.2	59	5.7	63	6.9	54	6.0	61
4	D (6.1-7.0) 6.6	59	6.8	60	6.5	59	7.5	53	6.6	59
5	D (6.1-7.0) 6.1	71	6.1	70	6.2	68	7.1	54	6.2	63

Bild 29: Radgruppe 17,5“ – Ergebniswerte Rollwiderstände

Wie es der in **Bild 30** dargestellte Verlauf der Materialtemperatur (Gürtelkante) veranschaulicht, wird beim ersten Lauf im Betriebsfall ‘Zyklus‘ die Temperaturschwelle des Stationärtests (MTL_{60}) sogar überschritten, welche Schlüsse lassen sich daraus ziehen?

Auch hier gilt: *Die ansteigenden Abschnitte im Temperaturverlauf des Reifengürtels sind ein Indikator dafür, dass sich der Reifen in dieser Betriebsphase noch NICHT in einem thermo-mechanischen Gleichgewichtszustand befindet, während ein fallender Verlauf auf eine Überschreitung bzw. einen Wärmeüberschuss hinweist, welcher – wie schon beschrieben – einen transient schwächeren Rollwiderstand auslöst.*

Eine das Rollwiderstandsergebnis begünstigende Temperatursituation betrifft demzufolge die sehr kurzen Intervalle 4, 7, 9 und auch 10, deren Beitrag sich im Gesamtergebnis jedoch nur sehr gering niederschlägt. Die Zeitanteile wurden zuvor in Bild 26 beziffert. Den wesentlichen Teil steuern die Intervalle 1-3, 5 und darüber hinaus vor allem das relativ lange Intervall 8 (85 km/h) bei. Der in diesen Intervallen offensichtlich ‘ungesättigte‘ Wärmezustand steht im Kontext mit einem erhöhten Rollwiderstand - bezogen auf den unter den Bedingungen stationär erreichbaren.

Im relativ niedrigen Niveau der Kerntemperatur begründet sich das höhere Niveau des in Zyklus I aufgetretenen mittleren Rollwiderstandes von 6,4 ‰, ein Wert, der sich der Rollwiderstandsklasse ‘D‘ zuordnen lässt. Im Vergleich zur nominellen Klasse ‘C‘ drückt sich darin eine Klassenüberschreitung aus.

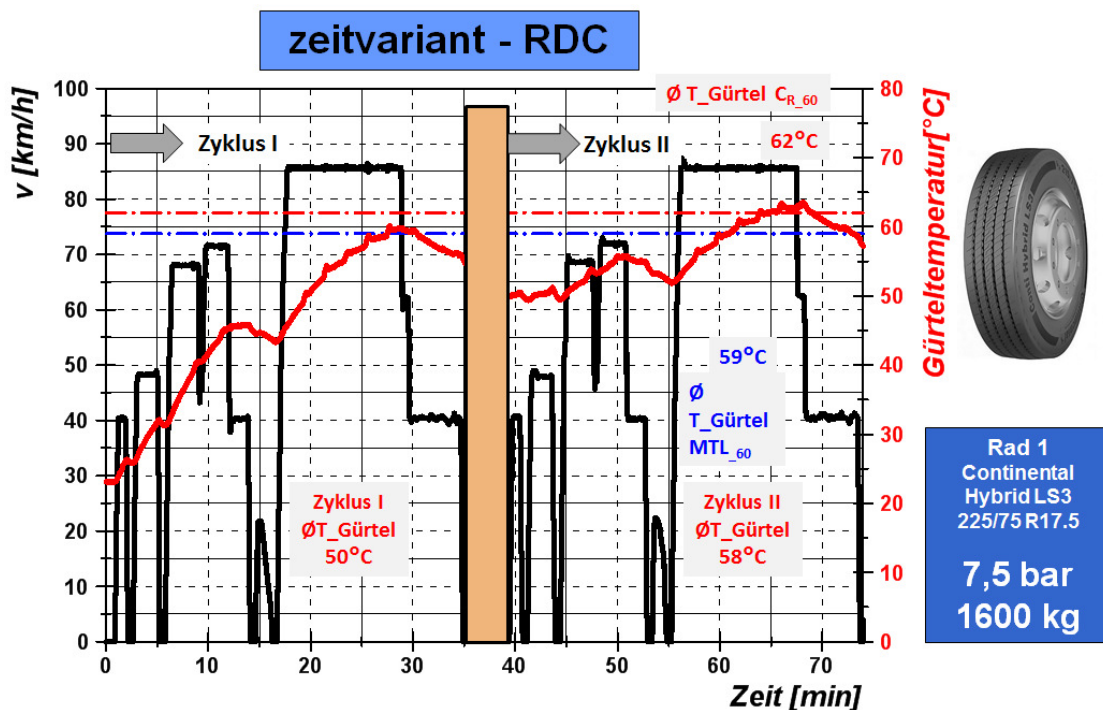


Bild 30: Entwicklung der Reifenkerntemperatur beim RDC (17,5“)

Der enge Zusammenhang von Rollwiderstand und Reifentemperatur wird auch durch die weiteren Veränderungen im Wiederholungslauf sichtbar bestätigt. Als Folge des Startzustandes 'Reifen warm' schreitet in Zyklus II die Temperaturannäherung an die Stationärwerte des Testfalls $v=\text{const.}$ (60 km/h) zügig voran, wodurch der Rollwiderstand weiter zurückgeht. Der über eine Fahrstrecke von erneut 26 km festgestellte Mittelwert rangiert zwar mit 5,6 ‰ deutlich unter dem Wert des ersten Laufes, erreicht jedoch noch nicht das bei 5,2 ‰ angesiedelte stationäre Niveau. Diese Beobachtung entspricht mehrheitlich dem typischen Verhalten der untersuchten Radgruppe.

Stellvertretend für die Testgruppe Radgröße 22,5“ wird am Beispiel des Trailerreifens (Rad 10) im Folgenden ebenfalls der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Verfahrenszweige >stationär vs. zeitvariant< erläutert (**Bild 31**). Ein wesentlicher Unterschied in Bezug auf die vorangestellte Rädergruppe betrifft die äußeren Testbedingungen, deshalb vorab der Hinweis: Gegenüber der Laboruntersuchung ($T_U=25^\circ\text{C}$) lagen die Umgebungstemperaturen bei den Straßentests deutlich niedriger. Mit den hinterlegten Angaben $T_U=10^\circ\text{C}$ bzw. 13°C soll die Aufmerksamkeit auf diesen besonderen Umstand gelenkt werden.

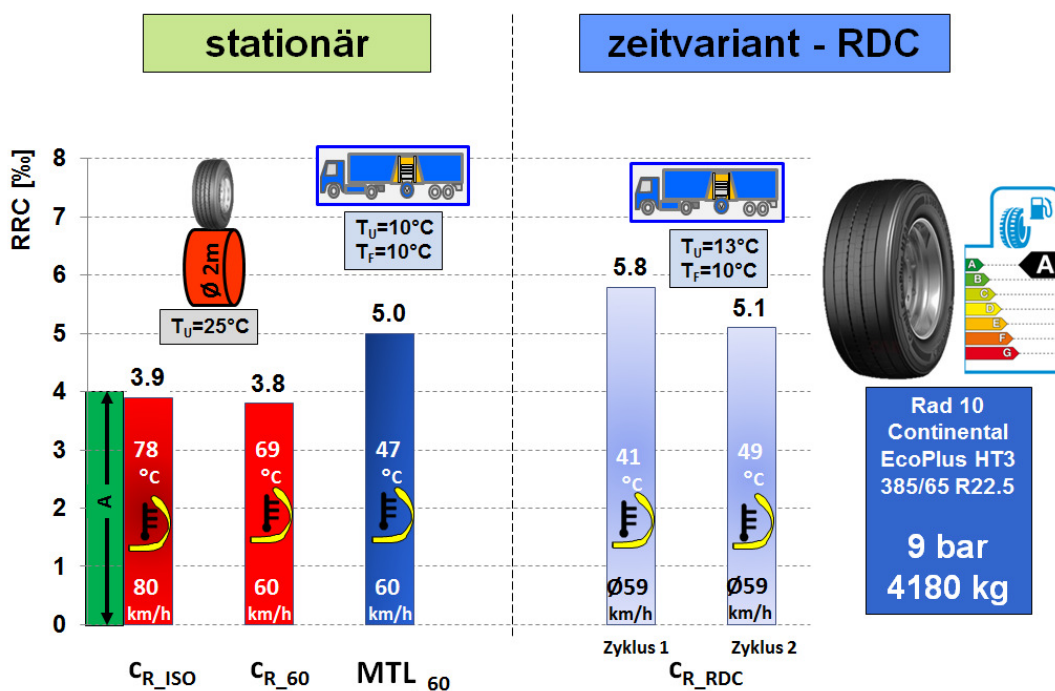




Bild 31: Rollwiderstände und Kerntemperaturen - beispielhafter Vergleich (22,5“)

**22,5“
Räder**


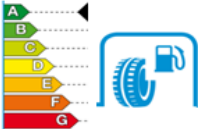




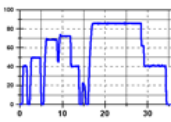
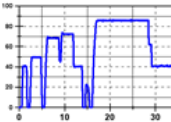
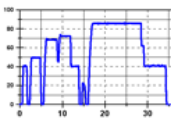
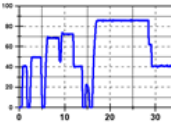
Reifen	Label (ISO) 80 km/h const.		Indoor 'Prüfst' 60 km/h const.		Outdoor 'MTL' 60 km/h const.		Outdoor 'MTL' Zyklus I		Outdoor 'MTL' Zyklus II	
										
	RRC ‰	T _{Gürtel} °C	RRC ‰	T _{Gürtel} °C	RRC ‰	T _{Gürtel} °C	Ø RRC ‰	T _{Gürtel} °C	Ø RRC ‰	T _{Gürtel} °C
6	B (4.1-5.0) 5.0	---	4.9	79	6.0	59	6.3	46	---	---
7	D (6.1-7.0) 6.9	---	6.8	72	7.4	55	7.6	43	6.9	55
8	C (5.1-6.0) 5.3	---	5.1	87	6,0	63	6.3	51	5.8	63
9	B (4.1-5.0) 4.8	---	4.9	64	5.5	47	6.2	38	5.7	47
10	A (≤4.0) 3.9	78	3.8	69	5.0	47	5.8	41	5.1	49

Bild 32: Radgruppe 22,5“ – Ergebniswerte Rollwiderstände

Von den Umgebungsbedingungen betroffen, ergeben sich aus den beobachteten Zustandsgrößen für die untersuchte Radgröße 22,5“ folgende Aussagen:

- der Stationärwert c_{R_60} rangiert in der nominierten Labelklasse
- der stationäre Rollwiderstand auf der Straße ist höher angesiedelt
- mittlerer Rollwiderstand im Betriebsfall 'Zyklus I' überragt das Stationärniveau c_{R_60}
- mittlerer Rollwiderstand in Zyklus I überschreitet Labelklasse
- mittlerer Rollwiderstand in Zyklus II nähert sich c_{R_60} an

Die vorstehenden Aussagen werden durch die tabellarische Gegenüberstellung mit Zahlenwerten für die untersuchte 22,5“ Gruppe belegt (**Bild 32**).

Von den zuvor getroffenen Feststellungen steht die zweite im Widerspruch zu der eingangs für die Gruppe 17,5“ gemachten, weil die dort benutzte Formulierung „stationäre Rollwiderstände sind auf Straße und Trommel nahezu gleich hoch“ hier keinesfalls zutrifft. Bei allen 5 Reifen liegen die 'outdoor' mit dem MTL ermittelten Werte oberhalb

des im Labor gemessenen Niveaus (c_{R_60}). Was ist der Grund dafür? Als Ausgangspunkt rückt das Temperaturgefälle zwischen den beiden Umgebungen ‘indoor/outdoor‘ sofort in den Vordergrund einer Erklärung dieses Phänomens, allerdings ist der tiefere Zusammenhang ohne die gesamte thermomechanische Wirkungskette zu detaillieren, im Temperaturniveau des Materials begründet, dessen Hystereseverluste direkt mit dem Rollwiderstand korrelieren.

In den Verläufen der im Betriebsfall >Zyklus< gemessenen Reifenkerntemperaturen (**Bild 33**) spiegelt sich wider, dass das unter stationären Bedingungen mit $v = \text{const. } 60 \text{ km/h}$ erreichte Temperaturniveau von 47°C nicht nur allmählich erreicht, sondern über kurze Dauer sogar überschritten wird, allerdings liegt diese Temperaturschwelle aufgrund der kühleren Umgebung 20 Kelvin unterhalb der unter Laborbedingungen er-

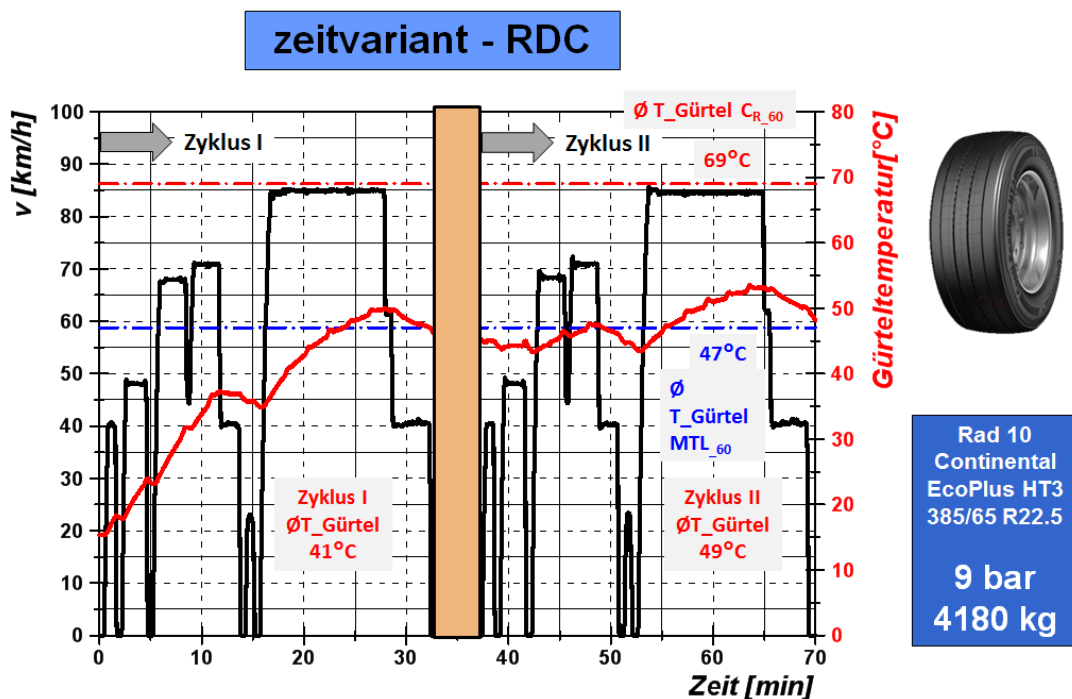


Bild 33: Entwicklung der Reifenkerntemperatur beim RDC (22,5“)

reichen.

Die ansteigenden Abschnitte im Temperaturverlauf des Materials (Reifengürtel) sind auch hier ein Indikator dafür, dass sich der Reifen in dieser Betriebsphase noch NICHT in einem thermo-mechanischen Gleichgewichtszustand befindet, während ein fallender Verlauf auf eine Überschreitung bzw. einen Wärmeüberschuss hinweist. Damit verknüpft ist übergangsweise ein verringerter Rollwiderstand, ein bekannter Begleiteffekt sprunghafter Geschwindigkeitsänderungen in Gestalt von high/low [5].

Eine das Rollwiderstandsergebnis begünstigende Situation wie die letztgenannte, betrifft die sehr kurzen Intervalle 4, 6, 7, 9 und auch 10, deren Beitrag sich im Gesamter-

gebnis jedoch nur gering niederschlägt. Den wesentlichen Teil steuern die Zyklen 1-3, 5 und insbesondere das relativ lange Intervall 8 (85 km/h) bei. Reifen 10 betreffend, geht aus den im Anhang für alle Objekte hinterlegten intervallbezogenen Verteilungen der Rollwiderstandsmittelwerte (Säulendiagramme) hervor, dass die Stufe '85 km/h' im 1. Zyklus mit 5,8 ‰ und im 2. Zyklus mit nur noch 5,2 ‰ besetzt ist.

Der thermische Zustand des Reifens während der Durchführung des Wiederholungszyklus unterscheidet sich – nachdem zuvor eine Fahrstrecke von 26 km bewältigt ist – nur noch in geringem Maße von der stationär geprägten Situation, was sowohl anhand der Temperaturangleichung nahe der Schwelle von 59°C zum Ausdruck kommt als auch in der Gegenüberstellung von Mittelwert (5,1 ‰) und Stationärwert (5,0 ‰) sichtbar wird.

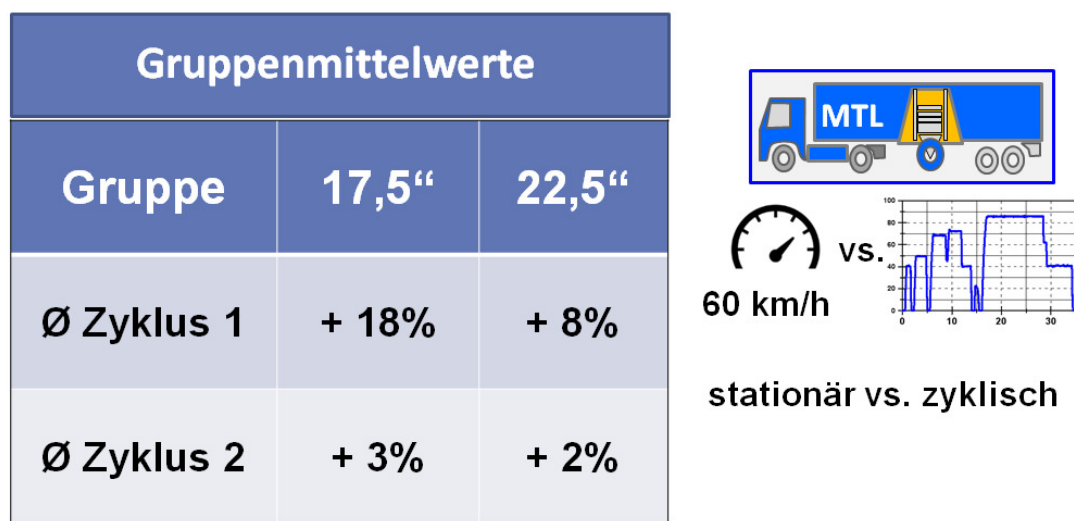


Bild 34: RDC – Rollwiderstandszunahme bezogen auf Stationärwerte (outdoor)

Die separat für jede Radgruppe ermittelten Rollwiderstands-Durchschnittswerte, angegeben in **Bild 34**, der beiden verglichenen Betriebsfälle >stationär vs. zyklisch< lassen erkennen, dass der RDC grundsätzlich zu einem höheren Rollwiderstandsergebnis führt. Allerdings ist die Steigerungsrate von 18% bei den Rädern der Radgruppe 17,5“ deutlich höher ausgefallen als bei den 22,5“. Ob diese Feststellung nicht nur ein zufälliges Ergebnis ist, sondern einen ggfs. größen- oder auch klassenspezifischen Verhaltenstypus widerspiegelt, bleibt zu diesem Zeitpunkt noch unbeantwortet.

9 Resümee

Im Blickfeld der in 2 separaten Arbeitsblöcken durchgeführten Rollwiderstandsuntersuchung standen jeweils 5 Reifenobjekte in den Dimensionen 17,5“ und 22,5“. Das Besondere an der Untersuchung dieser Standardreifen der Kategorie C2 und C3: Alle Rollwiderstandsmessungen fanden ‘outdoor‘ auf realer Fahrbahn unter Verwendung eines speziellen Messfahrzeuges (MTL) sowohl unter stationären Bedingungen mit $v=\text{const.}$ als auch unter zeitvarianter Geschwindigkeitsdefinition in Form eines Regional Delivery Cycles (RDC) statt. Zur Einstufung und Bewertung der dabei erzielten Ergebnisse wurden darüber hinaus konventionelle Messungen auf einem Außentrommelprüfstand in klimatisierter Laborumgebung durchgeführt.

Das erstmals im Versuchsprogramm mit dem MTL berücksichtigte Geschwindigkeitsprofil RDC orientiert sich an einem im regionalen Verteilerverkehr möglichen Szenario mit konstanter Last, einer Kombination aus wechselnden Geschwindigkeitsintervallen unterschiedlicher Dauer, sowie vier Stillstandsphasen. Die Streckenlänge: 26 km. Vom Alltag übertragen: Der Zyklus beginnt nicht erst nach einem warm-up, sondern der Reifen befindet sich beim Start des Prozesses im Zustand ‘kalt‘.

Konträr dazu stehen die an den Fernverkehr angelehnten Testbedingungen mit ebenfalls konstanter Last, jedoch $v=\text{const.}$ und einem von vornherein beabsichtigten Ausschluss aller zeitvarianten Übergangseffekte. Deshalb kann das Standardverfahren für eine definierte Geschwindigkeitsstufe zuverlässige Rollwiderstandsbeschreibungen im stationären Zustand liefern, setzt allerdings eine Vorkonditionierung von bis zu 3h Warmlaufdauer voraus. Entsprechend der Durchschnittsgeschwindigkeit von annähernd 60 km/h beim RDC fanden die stationären Tests ebenfalls bei dieser Geschwindigkeit statt.


Welche Erfahrungen wurden gesammelt?

- die für die Testobjekte nominierten Rollwiderstandsklassen reichen von A-D, jede der Einstufungen wurde auch für den abweichenden Betriebsfall (60 km/h) ‘indoor‘ bestätigt

*- die stationären Rollwiderstände ‘outdoor‘ divergieren umso mehr zu den ‘Laborwerten‘, je mehr sich die thermischen Umgebungsbedingungen voneinander unterscheiden. So sind in Bezug auf die 22,5“ Gruppe relativ niedrige Luft- und Fahrbahntemperaturen bei den Outdoor-Tests für erhöhte Rollwiderstandswerte verantwortlich (**Bild 35**)*

- zwischen Kerntemperatur und Rollwiderstand eines Reifens besteht eine charakteristische Abhängigkeit linearer Prägung; unterschiedliche Gradienten zwischen ‘indoor‘ zu ‘outdoor‘ wurden beobachtet

- identische Kerntemperaturen, 'indoor' wie 'outdoor', erlauben keinen Rückschluss auf gleich hohe Rollwiderstände; krümmungsbedingt entstehen auf einer Trommelanlage höhere Temperaturen, auch die entfallende Fahrtwindanströmung ist ursächlich beteiligt
- der im zyklischen Betriebsfall (RDC) ermittelte mittlere Rollwiderstand liegt gegenüber der Indoor-Messung grundsätzlich höher. Je mehr sich die thermischen Umgebungsbedingungen unterscheiden, desto höher die Differenz der Rollwiderstandswerte
- im zyklischen Betriebsfall kennzeichnet der Gradient des Kerntemperaturverlaufs die Rollwiderstandsentwicklung. Nachweisbar wird in Zyklus I in keinem maßgeblichen Geschwindigkeitsintervall ein thermisches Gleichgewicht erreicht, die Konsequenz daraus sind erhöhte Rollwiderstände beim RDC - bezogen auf die unter stationären Bedingungen festgestellten
- der Vergleich stationär vs. zyklisch weist anhand von Gruppen-Durchschnittswerten für die Radgruppe 17,5“ eine Steigerungsrate von 18% für den Rollwiderstand in Zyklus I nach, bei der Radgruppe 22,5“ beträgt die Rate nur ca. 8%
- im Wiederholungslauf, Zyklus II beginnt mit warmem Reifen, resultieren aus dem angehobenen Niveau der Reifenkerntemperatur kausal folgerichtig niedrigere Rollwiderstandsmittelwerte. Nicht in jedem Fall stimmen diese mit den stationären Referenzwerten überein, die jedoch nur allein die Fahrsituation $v = \text{const. } 60 \text{ km/h}$ nachstellen
- im Wiederholungslauf (Zyklus II) liegen die Rollwiderstände im Mittel nur noch in geringem Grad oberhalb des stationären Niveaus (2-3,4 %)



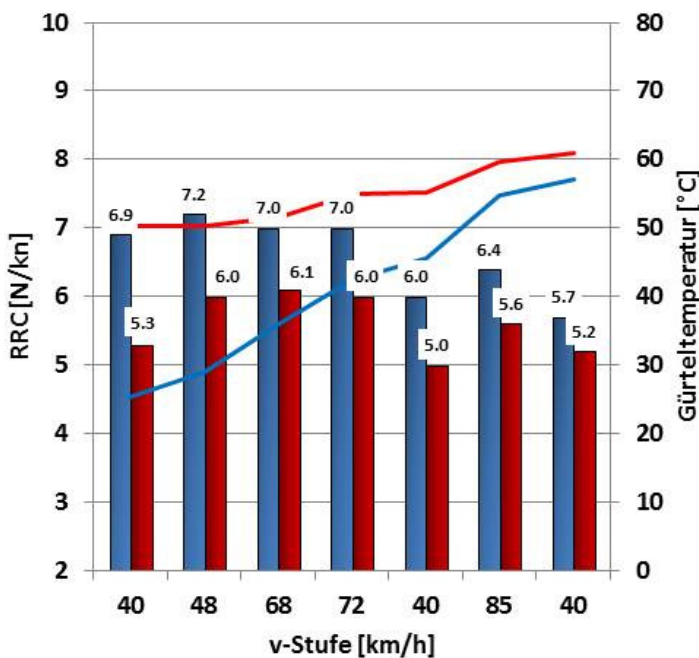
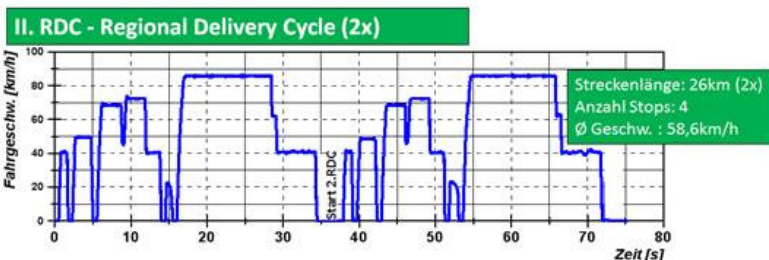
Gruppenmittelwerte (stationär)		
Gruppe	17,5“	22,5“
∅ RRC [‰] indoor	6,1	5,1
∅ RRC [‰] outdoor	5,9 ($\varnothing T_U = 25^\circ\text{C}$)	6,0 ($\varnothing T_U = 12^\circ\text{C}$)

Bild 35: Stationäre Rollwiderstandsquotienten (indoor vs. outdoor)

Die Informationen aus der Gegenüberstellung der beiden Prozesse stationär vs. zeitvariant standen zwar im Fokus der Aufgabenstellung, darüber hinaus haben aber vor allem auch die Vergleiche von ‘Labormessung‘ und ‘Fahrversuch‘ bemerkenswerte Ergebnisse beigestellt, was in **Bild 35** für beide Radgruppen graduell unterschiedlich zum Ausdruck kommt. Dass hierbei die thermischen Umgebungsbedingungen zum Zeitpunkt der Messung eine gravierende Beeinflussung darstellen, sei abschließend erneut betont.

Anhang

17,5" Räder

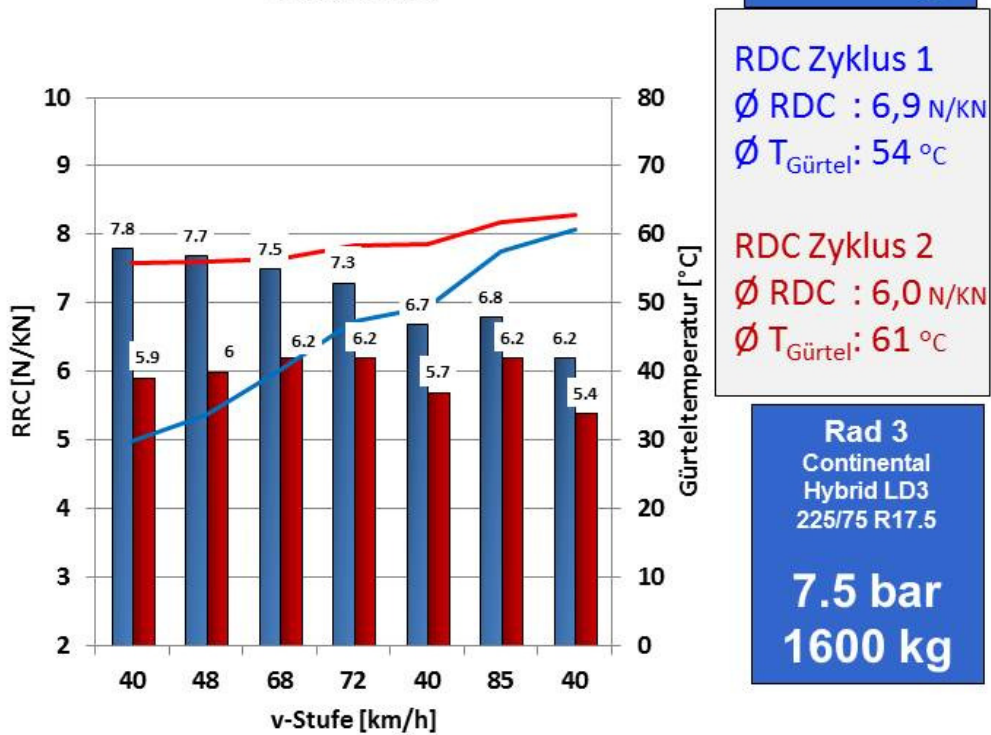
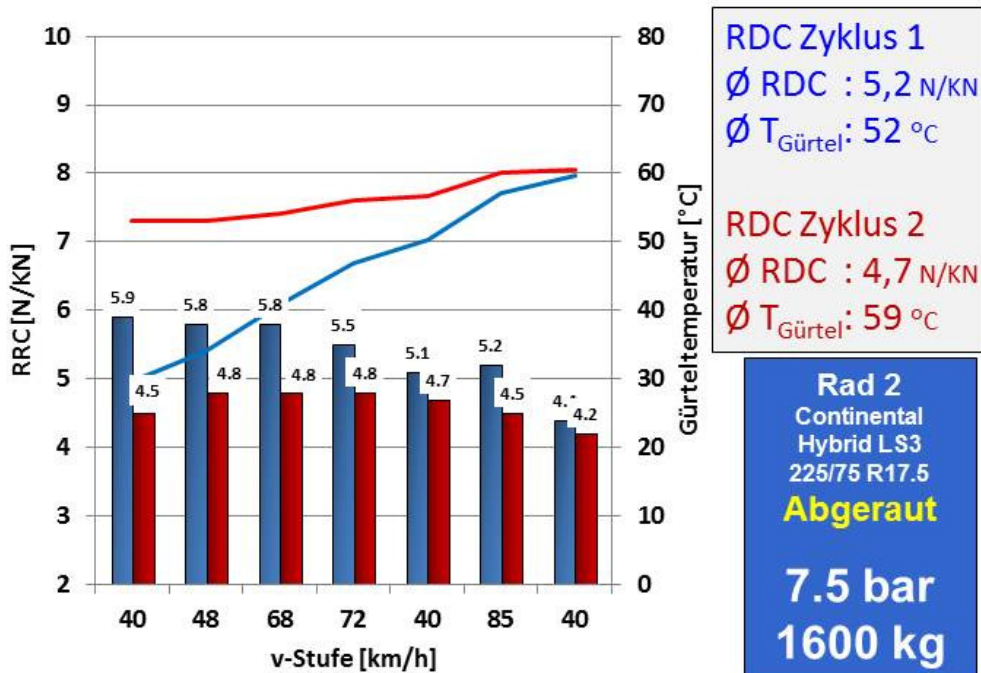


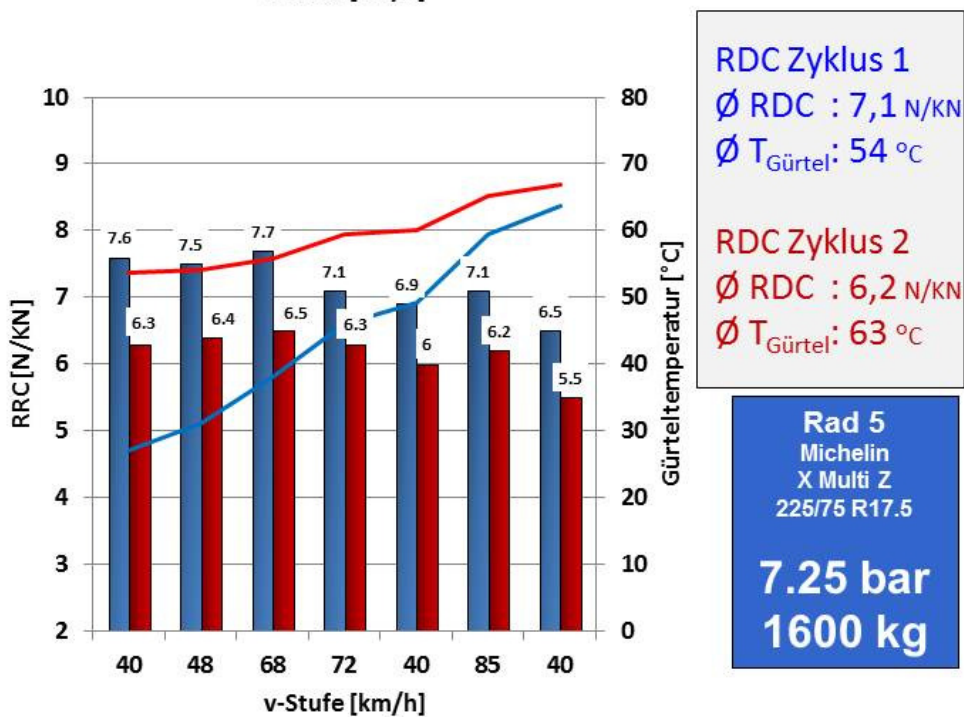
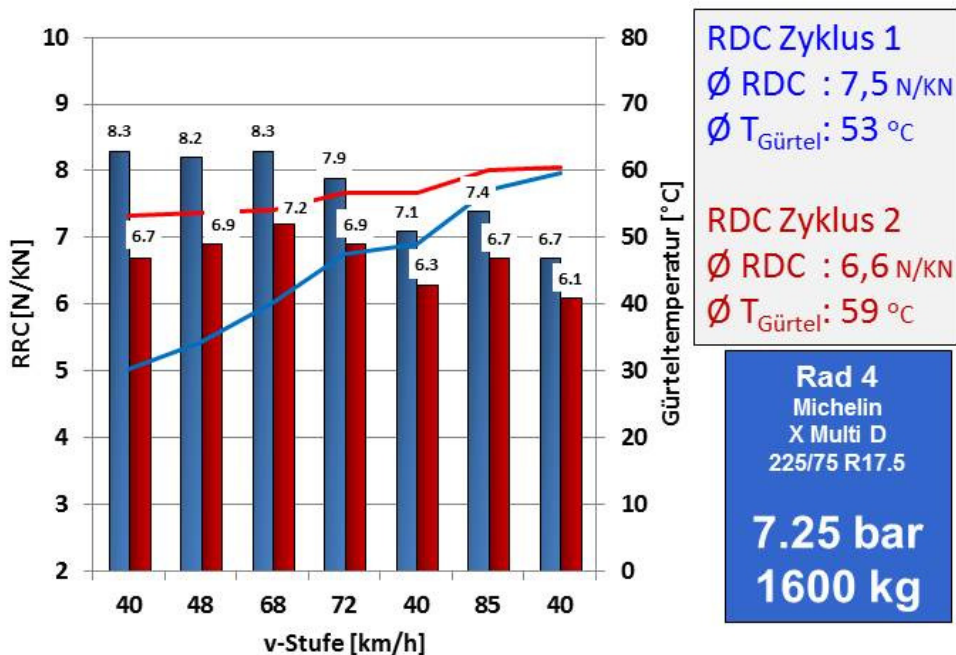
RDC Zyklus 1
 Ø RDC : 6,4 N/kN
 Ø T_{Gürtel}: 50 °C

RDC Zyklus 2
 Ø RDC : 5,6 N/kN
 Ø T_{Gürtel}: 58 °C

Rad 1
 Continental
 Hybrid LS3
 225/75 R17.5

7.5 bar
1600 kg

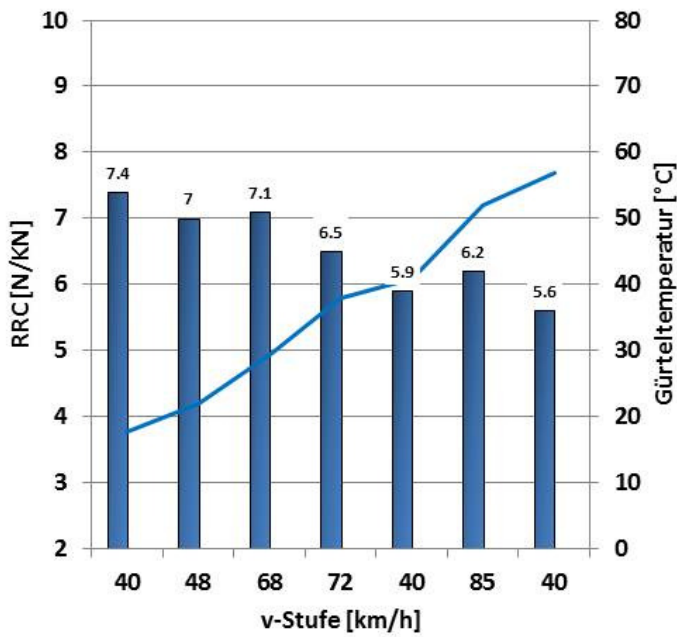
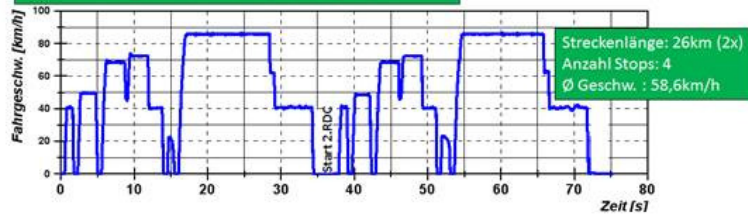




22,5" Räder

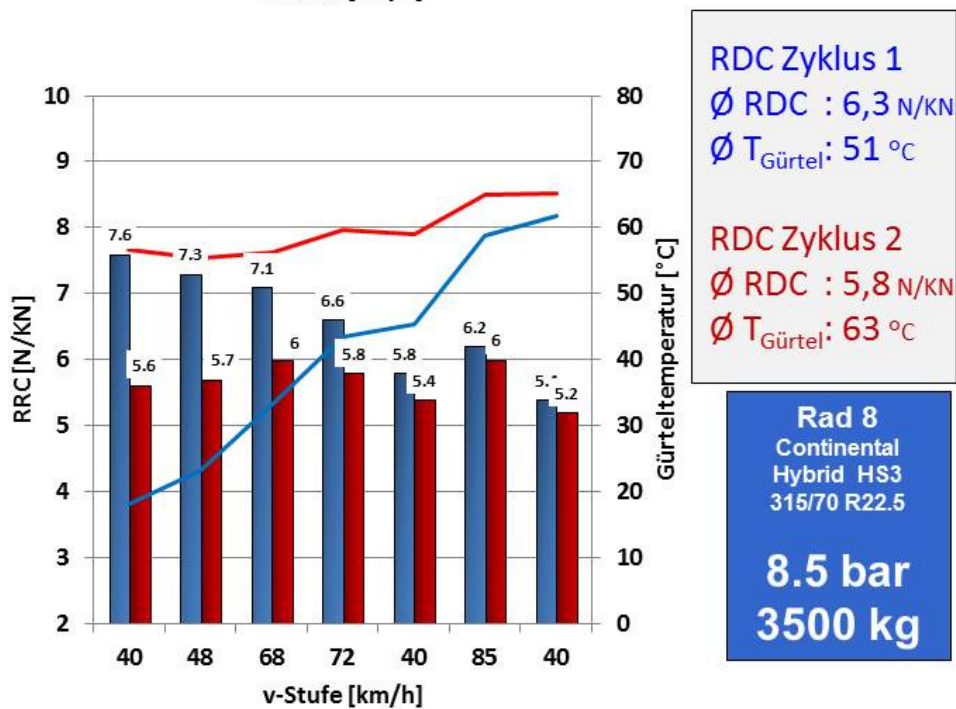
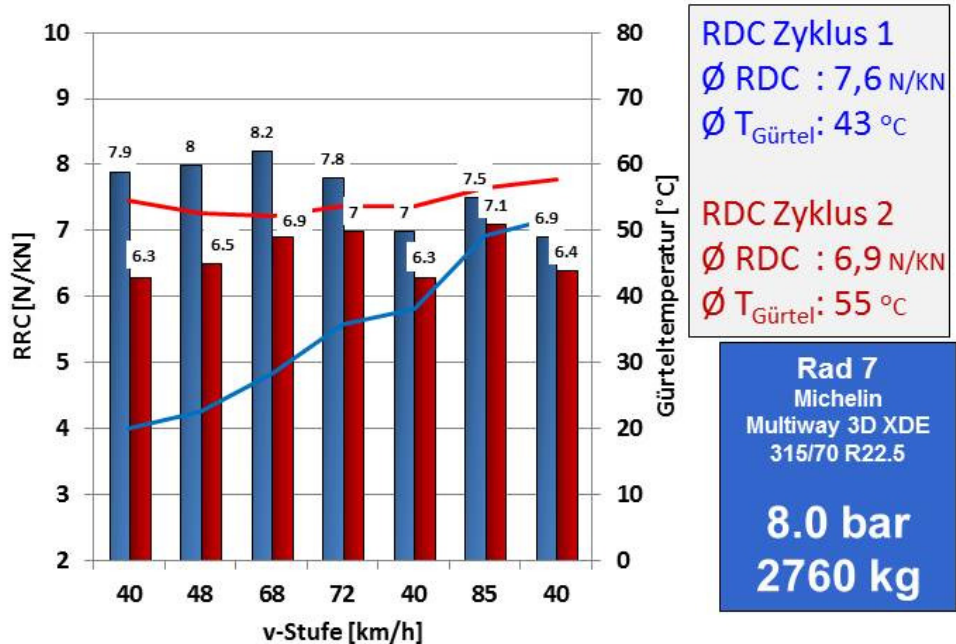


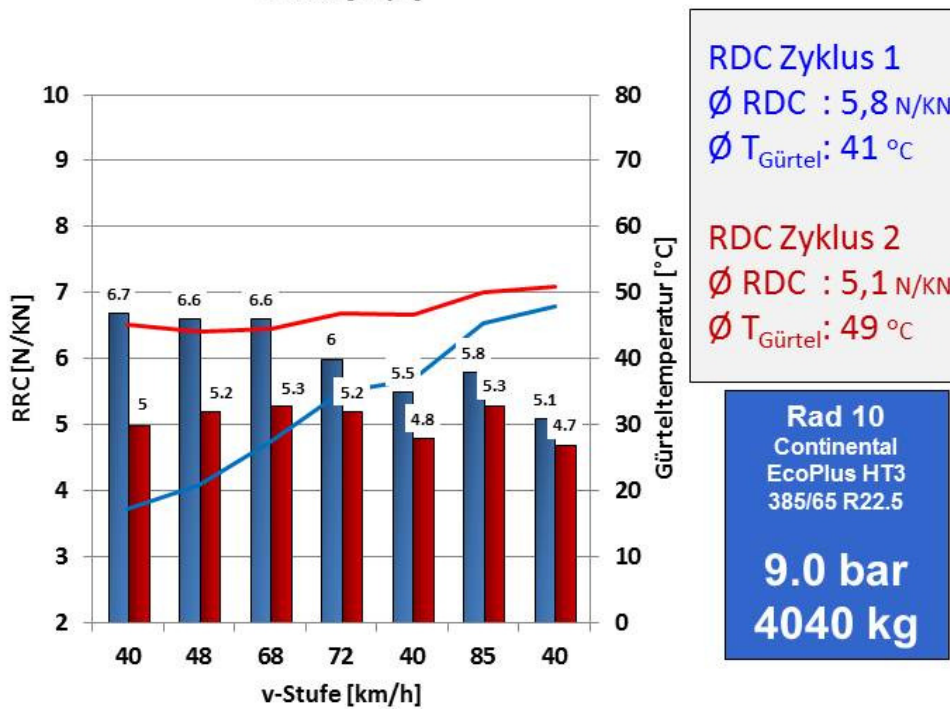
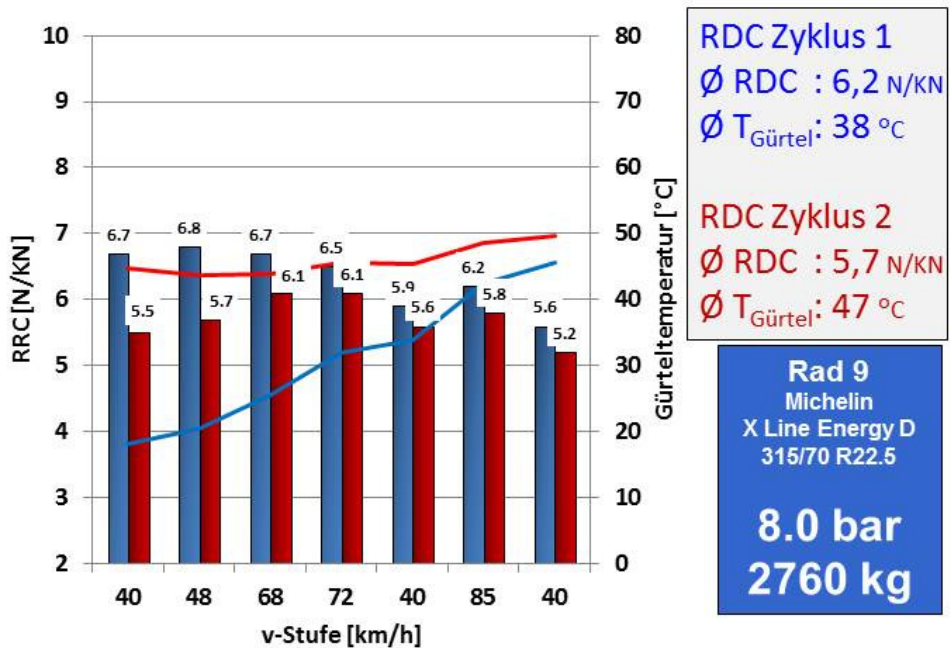
II. RDC - Regional Delivery Cycle (2x)



RDC Zyklus 1
 Ø RDC : 6,3 N/kN
 Ø T_{Gürtel}: 46 °C

Rad 6
 Continental
 Hybrid HT3
 385/65 R22.5
9.0 bar
4040 kg





Literaturverzeichnis

- [1] **Bode, M.** “Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen“, FAT Schriftenreihe 304 (2018)
- [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] **Sandberg, U. et al.:** “Rolling Resistance – Basic Information and State-of-the-Art on Measurement methods“, Report MIRIAM SP1 (2011)
- [4] **Bode, O.** “Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn“, FAT Schriftenreihe 285 (2016)
- [5] **Bode, O., Bode, M.:** “Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen“, FAT Schriftenreihe Nr. 255 (2013)
- [6] **Krehan, P.:** “Reifenrollwiderstandsmessung auf der Straße“, VDI Berichte Nr. 778 (1989), S. 233 ff

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 Seitenwindeinfluss, 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 χ 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
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018

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) 2018

VDA

Verband der
Automobilindustrie

FAT

Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

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