

Rollwiderstandsoptimierung am A+S-Netz RoWi

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017
(VIF2017)

Jänner 2020



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Gieffinggasse 4
A – 1210 Wien

 **AIT**
AUSTRIAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY
TOMORROW TODAY

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Rollwiderstandsoptimierung am A+S-Netz RoWi

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2017)

AutorInnen:

DI Roland SPIELHOFFER
DI Dr. Martin KRIEGISCH
DI Reinhard WEHR
DI Dr. Denitsa OSICHENKO
DI Dr. Cornelia LEX
DI Dr. Andreas HACKL
Christoph SCHERNDL

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugtechnik

KURZFASSUNG

An die Fahrbahndecken des hochbelasteten übergeordneten Straßennetzes werden verschiedene Anforderungen gestellt. Neben der erwarteten Dauerhaftigkeit der Konstruktion sind weitere Gebrauchseigenschaften definiert: Griffigkeit, Ebenheit in Längs- und Querrichtung, ausreichender Wasserabfluss, Rollgeräusch etc. Die gleichzeitige Optimierung dieser Eigenschaften ist gegenwärtig Gegenstand der Forschung.

Während es in der EU für Reifen seit 2012 eine Klassifizierung der Rollwiderstands-Eigenschaften gibt, ist für Fahrbahnoberflächen oder spezifische Bauweisen keine vergleichbare Systematik bekannt. Die beeinflussenden Größen bzw. Wellenlängenbereiche für den Rollwiderstand von Fahrbahnen erstrecken sich von der Makrotextur bis zur Längsebenheit. Für die Messung des Rollwiderstandes von Fahrbahnen sind verschiedene Verfahren beschrieben, es existieren derzeit aber nur zwei Messgeräte (Anhänger) in Europa, die ausschließlich in Forschungsprojekten verwendet werden. Verschiedene Forschungsprojekte, vor allem in Skandinavien, beschäftigen sich mit der Rollwiderstands-Optimierung von Asphalt-Bauweisen und der Umsetzung in Teststrecken.

Im Projekt RoWi wurden folgende Ziele verfolgt: Analyse der Literatur zur Messung des Rollwiderstandes von Fahrbahnen, zum Zusammenhang Rollwiderstand und Spritverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß sowie zu Initiativen zur Optimierung des Rollwiderstandes von Fahrbahnen. In diesem Zusammenhang wurden die vorhandenen Fahrbahndecken am ASFINAG-Netz analysiert, um die Deckenarten zu identifizieren, bei denen die Optimierung der Deckengestaltung den größten Hebel zur CO₂-Reduktion aufgrund verringerten Rollwiderstandes bieten. Weiters wurde eine Methode zur Messung des Rollwiderstandes mittels direkter Kraftmessung in der Achse des rollenden Rades entwickelt. Auf verschiedenen Deckschichtarten wurden Rollwiderstandsmessungen durchgeführt und die beeinflussenden Eigenschaften Textur und Längsebenheit sowie Temperaturen erhoben.

Die Auswertung der Messungen sowie deren Vergleich mit internationalen Forschungsprojekten zeigen, dass der Einfluss des Rollwiderstandes auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge gering ist (Anteil an der Summe der Fahrwiderstände im Bereich 4 % bis 7 %). Optimierte Fahrbahndecken weisen bis zu 7 % geringeren Rollwiderstand auf. Erfahrungen zur Mischgutoptimierung existieren für SMA-Decken in Dänemark, bei denen eine Verringerung der Makrotexturtiefe umgesetzt wurde. Die erwarteten Potenziale zur Treibstoffreduktion bei flächendeckendem Einsatz dieser optimierten Decken liegen bei 0,4 - 1,8 %. Bei den Messungen zeigte sich, dass der größte Einflussfaktor die Reifentemperatur ist (die auf den Reifeninnendruck wirkt), der den Einfluss der Fahrbahn weit überwiegt.

Als Empfehlung für den Straßenerhalter ergibt sich, die Makrotextur der Deckschichten zu begrenzen sowie die Längsebenheit zu optimieren.

ABSTRACT

Different requirements are placed on the road surfaces of the highly level road network. In addition to the expected durability of the construction, further usage properties are defined: skid resistance, evenness in longitudinal and transverse direction, sufficient water drainage, rolling noise etc. The simultaneous optimisation of these properties is currently the subject of research. While there has been a classification of rolling resistance properties for tyres in the EU since 2012, no comparable system is known for road surfaces or specific construction methods. The influencing variables or wavelength ranges for the rolling resistance of road surfaces extend from macrotexture to longitudinal evenness. Various methods for measuring the rolling resistance of road surfaces are described, but there are currently only two measuring devices (trailers) in Europe that are used exclusively in research projects. Various research projects, mainly in Scandinavia, are concerned with the rolling resistance optimisation of asphalt construction methods and their implementation in test tracks.

The following objectives were pursued in the RoWi project: Analysis of the literature on measuring the rolling resistance of road surfaces, on the relationship between rolling resistance and fuel consumption or CO₂ emissions, and on initiatives to optimise the rolling resistance of road surfaces. In this context, the existing road pavements on the ASFINAG network were analysed in order to identify the pavement types where optimisation of the pavement design offers the greatest leverage for CO₂ reduction due to reduced rolling resistance. Furthermore, a method for measuring the rolling resistance by means of direct force measurement in the axle of the rolling wheel was developed. Rolling resistance measurements were carried out on various types of surface courses and the influencing properties texture and longitudinal evenness as well as temperatures were recorded.

The evaluation of the measurements and their comparison with international research projects show that the influence of the rolling resistance on the energy consumption of the vehicles is low (share of the sum of the driving resistances in the range 4 to 7 %). Optimised road surfaces have up to 7 % less rolling resistance. Experiences with mix optimization exist for SMA pavements in Denmark, where a reduction of the macrotexture has been implemented. The expected potential for fuel reduction when these optimized pavements are used throughout the country is 0.4 - 1.8 %. The measurements showed that the biggest influencing factor is the tire temperature (which affects the tire internal pressure), which far outweighs the influence of the road surface. The recommendation for the road maintainer is to limit the macrotexture of the surface courses and to optimise the longitudinal evenness.

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
1 Aufgabenstellung	8
1.1 Gesamtziel	8
1.2 Methodik des Vorgehens	10
2 Stand der Technik.....	12
2.1 Messmethode und Messgeräte.....	17
2.1.1 Labortrommel-Methode	17
2.1.2 Stationäre Drehmomentmethode (Steady State Wheel Torque Method).....	22
2.1.3 Ausrollmessung (Coastdown method)	22
2.1.4 Kraftstoffverbrauchsverfahren (Fuel Consumption).....	22
2.1.5 Anhänger methode (Trailer Method)	23
2.1.6 Zusammenfassung Messgeräte.....	31
2.2 Zusammenführung von Erkenntnissen aus Vorprojekten.....	32
2.2.1 Bisherige Studien mit Schwerpunkt Rollwiderstand	32
2.2.2 Forschungsprojekte mit Schwerpunkt Rollwiderstand	34
2.2.3 Deutsche Projekte für die Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen.....	39
2.2.4 Dänische Projekte mit Schwerpunkt Rollwiderstand	43
2.3 Prognosemodelle Rollwiderstand.....	49
2.3.1 Frühere Erfahrungen und Erkenntnisse	49
2.3.2 Sensitivitätsanalyse	55
3 Analyse der Deckenbauweisen.....	59
4 Messmethode Rollwiderstandsmessung.....	62
4.1 Versuchsfahrzeug.....	62
4.2 Messtechnik.....	62
4.2.1 Messsensorik.....	62

4.2.2	Datenübertragung.....	68
4.2.3	Datenaufzeichnung.....	69
4.2.4	Montage der Messeinrichtung.....	69
4.3	Kalibrierung der Messeinrichtung.....	70
4.4	Modell zur Temperaturkorrektur des Messreifens	71
4.4.1	Messungen für das Korrekturmodell des Messreifens.....	71
4.4.2	Weg- und Fahrtrichtungsabhängigkeit	71
4.4.3	Druck und Temperatur - Allgemein	72
4.4.4	Druck und Temperatur - RoadSTAR.....	74
4.4.5	Zusammenfassung und Ausblick	76
5	Erfassung Oberflächeneigenschaften.....	78
5.1	Durchführung der Messungen	78
5.2	Analyse der Messdaten	80
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	82
6.1	Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche und dem Messprogramm.....	82
6.2	Handlungsempfehlungen für den Straßenerhalter.....	83
7	Zusammenführen der Ergebnisse	85

1 AUFGABENSTELLUNG

1.1 Gesamtziel

An die Fahrbahndecken des hochbelasteten übergeordneten Straßennetzes werden verschiedene Anforderungen gestellt. Diese müssen eine hohe Verkehrssicherheit leisten, umweltfreundlich sein, sowie eine Optimierung des Kraftstoffverbrauchs ermöglichen. Diese Anforderungen liegen in einem engen Zusammenhang mit den Gebrauchseigenschaften wie Griffbarkeit, Ebenheit in Längs- und Querrichtung, ausreichender Wasserabfluss, Rollgeräusch etc. Die gleichzeitige Optimierung dieser Eigenschaften ist gegenwärtig Gegenstand der Forschung. In den letzten Jahren ist die Reduktion des CO₂-Ausstoßes und des Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge ein viel diskutiertes Thema. Dabei spielt auch der Rollwiderstand eine wichtige Rolle. Bis dato war die Reduktion des Rollwiderstandes der Fahrbahn noch nicht im Fokus des Interesses. Mit der Einführung des Reifenlabels in der EU-Verordnung EC1222 [29] im November 2009 existiert eine Bewertung des Rollwiderstandes von Reifen (Abbildung 1). Dieser wird auf einem Laborprüfstand mittels einer rotierenden Stahltrommel bestimmt und dieses Verfahren ist standardisiert in der ECE-Regelung 117 [30].

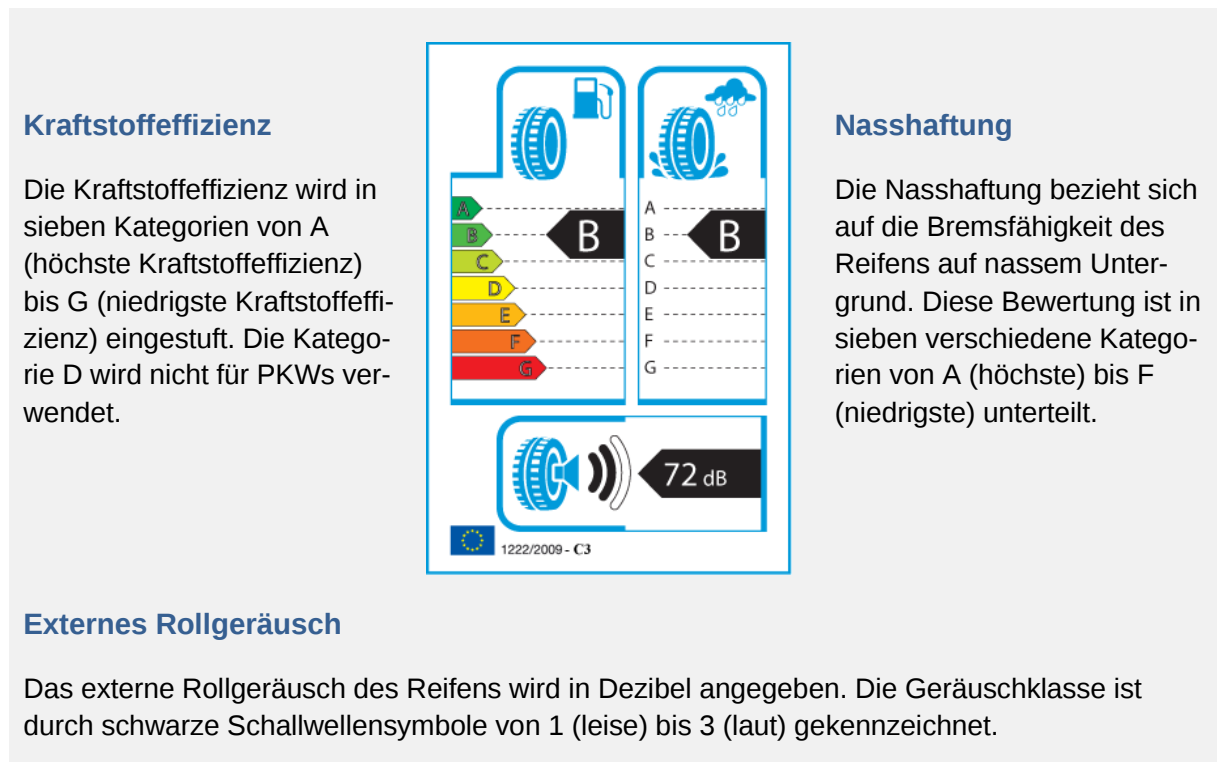


Abbildung 1: Informationen zur Reifenkennzeichnung gemäß EC 1222/2009 bzw. ECE 117

(Quelle: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1222&from=EN>, abgerufen am 09.10.2019; [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X1123\(03\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X1123(03)&from=EN), abgerufen am 09.10.2019)

Für die Messung des Rollwiderstandes existieren verschiedene Verfahren, die im Detail in Kapitel 2.1 beschrieben sind. Bislang ist nur die Labormessung standardisiert, für die Fahrbahn ist derzeit noch kein Verfahren weit genug entwickelt. Verschiedene Forschungsprojekte beschäftigen sich mit dem Thema Rollwiderstandsoptimierung und -messung und zeigen vielversprechende Ergebnisse. Ein Schwerpunkt ist dabei, vor allem in Skandinavien, den Rollwiderstand von Asphaltbauweisen zu verbessern und eine Umsetzung dieser Bauweisen in Teststrecken. Neben den Messmethoden ist auch die Prognose des Rollwiderstandes aus anderen Oberflächeneigenschaften von Interesse. Derzeitige Prognosemodelle für den Fahrbahn-Rollwiderstand basieren auf Kennwerten wie MPD (Mean Profile Depth) und IRI (International Roughness Index), die vielfach in Pavement Management-Systemen vorliegen.

Die Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes zielten darauf ab, eine innovative Methode zur Messung des Rollwiderstandes zu entwickeln und auf Basis der erhobenen Messwerte und den Ergebnissen der Literaturrecherche Empfehlungen für den Straßenerhalter zu erarbeiten, um den fahrbahnanteiligen Rollwiderstand zu reduzieren. Für das Erreichen des Projektziels wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Ausführliche Literaturrecherche zu den Themen Messmethoden für Fahrbahn-Rollwiderstand, Rollwiderstand und Kraftstoffverbrauch, Prognosemodelle für Rollwiderstand sowie bautechnische Optimierung von Fahrbahndecken zur Reduzierung des Rollwiderstandes.
- Analyse der Deckengestaltung am ASFINAG-Netz, um die Potenziale für die bauliche Optimierung zur Senkung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen aufzuzeigen.
- Entwicklung einer innovativen Methode zur Messung des Rollwiderstandes mittels direkter Kraftmessung in der Achse des rollenden Rades. Es wurde sowohl der Rollwiderstand, als auch die beeinflussenden Fahrbahneigenschaften sowie Umwelteinflüsse erhoben.
- Analyse der erhobenen Daten und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Optimierung des Rollwiderstandes am ASFINAG-Netz.
- Empfehlung für die Rollwiderstands-optimierte Deckengestaltung am A+S-Netz und Einordnung im Spektrum der Dekarbonisierungsmaßnahmen.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Methode entwickelt, die – anders als die derzeit in Anwendung befindlichen – auf der direkten Kraftmessung in der Achse des rollenden Rades aufbaut. Möglich wird diese Messmethode durch Verwendung einer Kraftmessfelge, wie sie derzeit im Automotive-Bereich zur Fahrwerks- und Fahrzeugentwicklung eingesetzt wird. Diese Art der

Messung folgt auch der Messmethodik zur Rollwiderstandsmessung im Labor auf Trommelprüfständen für die Reifenentwicklung.

Weitere innovative Ansätze, die über den derzeitigen Stand der Technik hinausgehen:

- Verzicht auf Anhänger-Konstruktion, damit einhergehend Ausschluss von Messunsicherheit aufgrund aerodynamischer Einflüsse auf die Messgeometrie durch Winkeländerungen in der Anhängerkupplung.
- Kontrollierte, geregelte Belastung der Messeinheit und damit verbundene Steigerung der Wiederholbarkeit der Messungen. Weiters wird damit die aktuelle vertikale Radlast gemessen und kann für jeden Zeitpunkt der Messung angegeben werden. Derzeit verwendete Methoden arbeiten mit statischen Gewichten, die aufgrund von Fahrbahnunebenheiten keine konstanten Vertikalkräfte sicherstellen.
- Erfassung der dynamischen Belastungen der Messeinheit durch Beschleunigungs-Sensor.
- Positionierung aller Messwerte mittels Koppelnavigation. Damit ist die spätere Lokalisierung – auch in Querrichtung am Fahrstreifen – aller erhobenen Parameter sichergestellt.

Aufgrund begrenzter Budgetmittel im Projekt bleiben bei der entwickelten Methode zur Rollwiderstandsmessung jedoch Fragen offen, für die sich weiterer Forschungsbedarf ergibt. Besonders die Temperatureinflüsse machen dadurch, dass sie den Rollwiderstand weitaus mehr beeinflussen, als die Fahrbahneigenschaften, weitere Überlegungen zur Weiterentwicklung der Messmethode notwendig. So könnte z.B. durch Temperatursensorik in der Reifenkarkasse bzw. im Reifenmantel eine bessere Kompensation des Temperatureinflusses gelingen. Ebenso gälte es Einflüsse, die sich aus der Konzeption der Radaufhängung der Messreinrichtung ergeben, noch eingehender zu untersuchen, um diese Einflüsse zu quantifizieren. Die gute Wiederholbarkeit der Messergebnisse zeigt aber die prinzipielle Eignung der Methode.

1.2 Methodik des Vorgehens

Das Projekt startete mit der Erhebung des Stands der Technik (Kapitel 2), wobei die Methoden und Geräte für die Rollwiderstandsmessung im Detail dargestellt sind. Danach werden Erkenntnisse aus Vorprojekten und bisherigen Studien präsentiert. Im selben Kapitel werden auch die derzeit bekannten Modelle zur Prognose des Rollwiderstands dargestellt. Hier konnten wesentliche Grundlagen über den Einfluss der Fahrbahn auf den Energieverbrauch und damit auf den CO₂-Ausstoss von Fahrzeugen erarbeitet werden. Gleichzeitig zeigt sich aus der Literaturrecherche auch, wie begrenzt die Handlungsmöglichkeiten des Straßenerhalters im Gesamtkontext Fahrzeuge-Reifen-Fahrbahn sind.

Im Kapitel 3 werden die vorhandenen Fahrbahndecken am ASFINAG-Netz analysiert und es wurde das Messprogramm für AP4 „Erfassung von Oberflächeneigenschaften“ festgelegt.

Danach wird im Kapitel 4 die Entwicklung der Rollwiderstandsmessung im Detail dargestellt. Zum Aufbau der Messeinrichtung für die Rollwiderstandsmessung wurde der RoadSTAR herangezogen. Im Vergleich zur Griffigkeitsmessung, sind die Anforderungen an die Messtechnik für die Rollwiderstandsmessungen deutlich höher. Aus diesem Grund wurde das Mess-Setup des RoadSTAR vollständig überarbeitet. Im Weiteren wurden im Detail auch die Montage der Messeinrichtung, sowie die Datenübertragung und Datenaufzeichnung im Kapitel 4 beschrieben.

Aufgrund der geringen Kräfte, die während der Rollwiderstandsmessung korrekt gemessen werden sollen, kommt der Kalibrierung der Messeinrichtung besondere Bedeutung zu. Es wurde eine Kalibrieroutine entwickelt und in der Mess-Software implementiert, die die Lage und Orientierung des Koordinatensystems in der Kraftmessfelge bestimmen und die Korrekturwinkel, die sich aufgrund von einbaubedingten Rest-Verdrehungen ergeben, erfasst und der Auswertung zugänglich macht.

Für die In-Situ-Erfassung von Fahrbahn-Rollwiderstand und anderer Oberflächeneigenschaften wurde in Kapitel 5 ein Messstreckenkollektiv zusammengestellt. Zusätzlich zum Rollwiderstandskoeffizienten wurden auf den ausgewählten Strecken die folgenden Parameter erhoben:

- Makrotextur (MPD)
- Längsebenheit (IRI , Δ_{WLP} , σ_{WLP})

Aus der Oberbaudatenbank wurden die folgenden Informationen entnommen:

- Bauweise, Beton oder Asphalt
- Bautype (Feld „S1M“), z.B. SMA, AC Deck
- Herstellungsjahr der Deckschicht (Feld „S1J“)

Alle Messungen fanden mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h ohne Beeinträchtigung des Verkehrs statt. Insgesamt wurden 135,5 km Richtungsfahrbahn erhoben.

Im Kapitel 6 wurden die Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche und dem Messprogramm zusammengefasst. Weiters wurden auch Handlungsempfehlungen für den Straßenerhalter dargestellt. Die Zusammenführung der Ergebnisse mit dem VIF2017-Forschungsprojekt „Dekarbonisierung durch Geschwindigkeitsharmonisierung am A+S-Netz“ (A+S-Decarb) wird im Kapitel 7 beschrieben.

2 STAND DER TECHNIK

Auf ein fahrendes Auto wirken mehrere Widerstandskräfte:

- Luftwiderstand (insbesondere bei hoher Geschwindigkeit)
- Reibungswiderstände (in Getriebe und Motor)
- Schwerkraft (bei Steigungen)
- Massenträgheitskraft (vor allem beim Anfahren und Beschleunigen)
- Rollwiderstand (in der Kontaktzone zwischen Reifen und Untergrund)

Eine grafische Darstellung aller Kräfte ist in Abbildung 2 zusammengefasst.

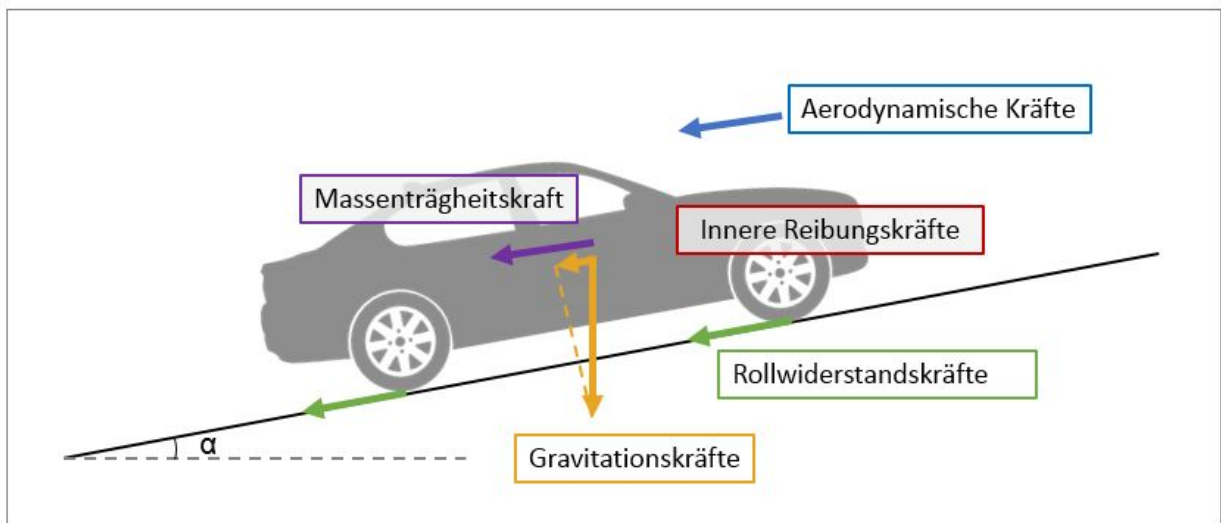


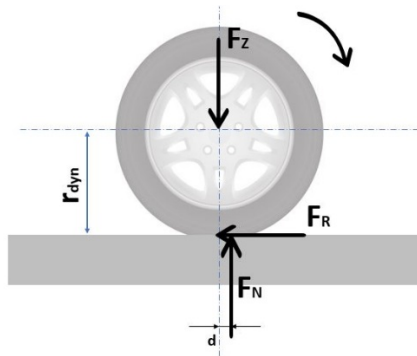
Abbildung 2: Fahrendes Auto und die darauf wirkende Widerstandskräfte (aus MIRIAM D1, adaptiert)

Die auf das Fahrzeug wirkende Gesamtkraft ist die Summe aus Schwerkraft und Widerstandskraft, wobei angenommen werden kann, dass die Widerstandskraft aus: Rollwiderstand, Luftwiderstand, Reibungswiderstand und Massenträgheitskraft.

Rollwiderstand kann als die auf ein Fahrzeug wirkende Kraft definiert werden, die beim Abrollen eines Rades durch die Wechselwirkung zwischen dem Fahrzeug und der Straßenoberfläche verursacht wird.

Der Rollwiderstand wird hauptsächlich durch die Durchbiegung und Verformung des Reifens während des Rollens und die Hysterese des Reifens und der Reifenstruktur verursacht. Andere geringfügige Effekte sind Reibungs- und Adhäsionsverluste in der Kontaktzone zwischen dem Reifen und der Straßenoberfläche.

Laut Definition wird der Rollwiderstand als physikalisches Phänomen gesehen, das zu einem Energieverlust pro zurückgelegter Strecke (Nm/m) führt oder häufiger als Rollwiderstandskraft F_R in [N] (siehe Abbildung 3). Daher kann der Energieverlust als Kraft entgegen der Fahrtrichtung gemessen werden [9].



- F_R - Rollwiderstandskraft [N]
- F_N - Normalkraft (i.d.R. die Gewichtskraft) [N]
- F_Z - Reifenlast [N]
- d - Strecke (Abstand Normalkraft) [m]
- R - Reifenradius [m]

Abbildung 3: Kräfte bei einem rollenden Reifen (aus ROSANNE D3.1, adaptiert)

Die Berechnung der Rollwiderstandskraft F_R erfolgt nach:

$$F_R = c_R \cdot F_N \quad (1)$$

wobei:

- F_R - Rollwiderstandskraft [N]
- c_R - Rollwiderstandskoeffizient (dimensionslos)
- F_N - Normalkraft (i.d.R. die Gewichtskraft) [N]

Der Rollwiderstandskoeffizient (auch Rollwiderstandsbeiwert oder Rollreibungs-beiwert) ergibt sich aus folgender Formel:

$$c_R = \frac{d}{R} \quad (2)$$

wobei:

- c_R - Rollwiderstandskoeffizient (dimensionslos)
- d - Strecke (Abstand Normalkraft) [m]
- R - Reifenradius [m]

Der Rollwiderstandskoeffizient ist dimensionslos, obwohl manchmal das Verhältnis mit Prozent oder Promille ausgedrückt wird.

Bei einem konventionellen Benzinfahrzeug werden je nach Fahrzyklus nur etwa 12% bis 30% der Energie aus dem getankten Kraftstoff verwendet, um es auf der Straße in Bewegung zu bringen (Abbildung 4). Der Rest der Energie geht durch Ineffizienzen von Motor und Antriebsstrang verloren oder wird zum Antreiben von Zubehör verwendet. Bei Autos erhöht eine Verringerung des Rollwiderstands um 5% bis 7% die Kraftstoffeffizienz um 1% [27]. Diese Verbesserungen sind von vielen Faktoren (Straßenparameter, Reifencharakteristiken, Umgebungsbedingungen) abhängig, deswegen können die Rollwiderstands-Verringerung und dadurch auch die Kraftstoffeffizienz variieren.

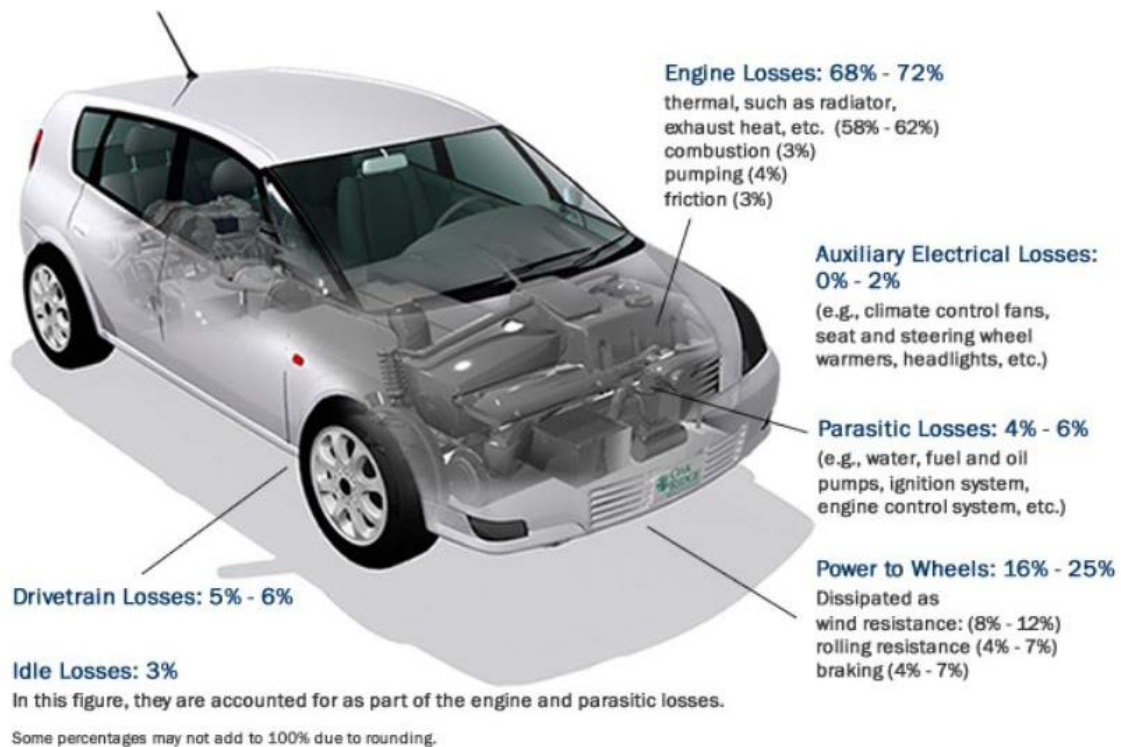


Abbildung 4: Energieverluste in konventionellen Benzinfahrzeugen

(Quelle: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml> abgerufen am 14.10.2019 [27])

Im Artikel „The Surprising Cost Of Rolling Resistance“ [22] werden folgende drei Hauptbeiträge des Rollwiderstands definiert:

- Innere Reibung des Reifenmaterials (85 - 92%).
- Reibung zwischen Reifen und Straße (7% - 10%).
- Luftwiderstand des Reifens (1% - 5%).

Verschiedene physikalische Mechanismen sind für die Widerstandsbeiträge verantwortlich. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt.

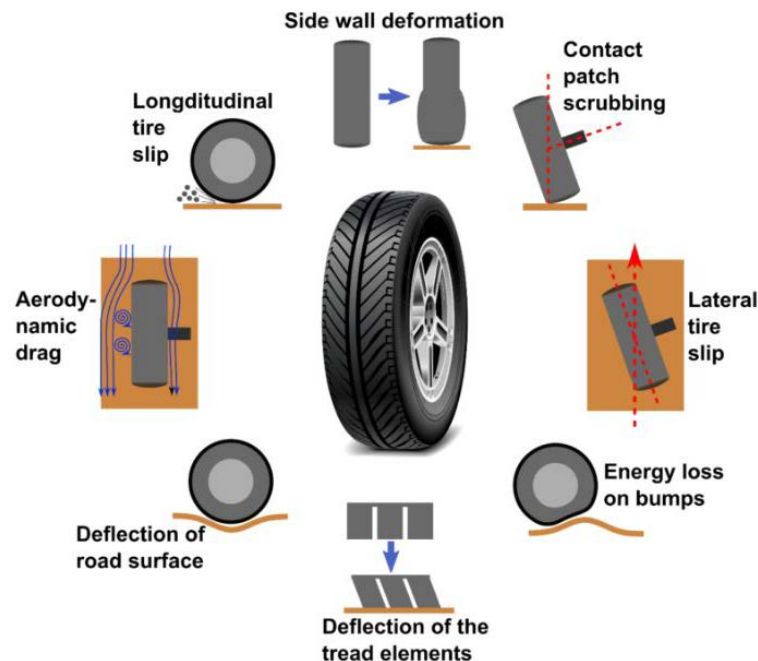


Abbildung 5: Mechanismen, die zum Rollwiderstand von Standardreifen beitragen

(Quelle: <https://dynamon.co.uk/2017/08/30/burning-rubber-the-surprising-cost-of-rolling-resistance/>, abgerufen am 15.10.2019 [22])

Der größte Teil der Energie, die durch den Rollwiderstand verloren geht, wird als Wärme abgeführt, die durch innere Reibung im Gummi entsteht. Wenn ein Reifen rollt, wird er in der Kontaktzone mit der Straße deformiert, bevor er in seine ursprüngliche Form zurückkehrt. Während des Verformungsprozesses müssen sich die Polymerketten, aus denen der Gummi besteht, aneinander vorbeibewegen. Dieser Prozess erzeugt Wärme. Jede Energie, die als Wärme in den Reifen verloren geht, muss aus der vom Motor erzeugten Energie stammen.

Der Rollwiderstand ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Eine Zusammenfassung der Einflussgrößen zeigt Abbildung 6. Diese Faktoren haben in der Regel Einfluss auf mehr als eine der physischen Ursachen. Beispielsweise erhöht eine Erhöhung der Reifenlast den Rollwiderstand aufgrund der inneren Reifendeformation und der Reibung zwischen dem Reifen und der Straße, jedoch nicht aufgrund des Luftwiderstands des Reifens. Während einige dieser Faktoren, wie z. B. die Straßenoberfläche und die Umgebungstemperatur, schwer zu kontrollieren sind, sollten andere, wie z. B. der Reifendruck und das Reifenmaterial, vom Fahrer sorgfältig geprüft und für eine maximale Kraftstoffeffizienz optimiert werden.

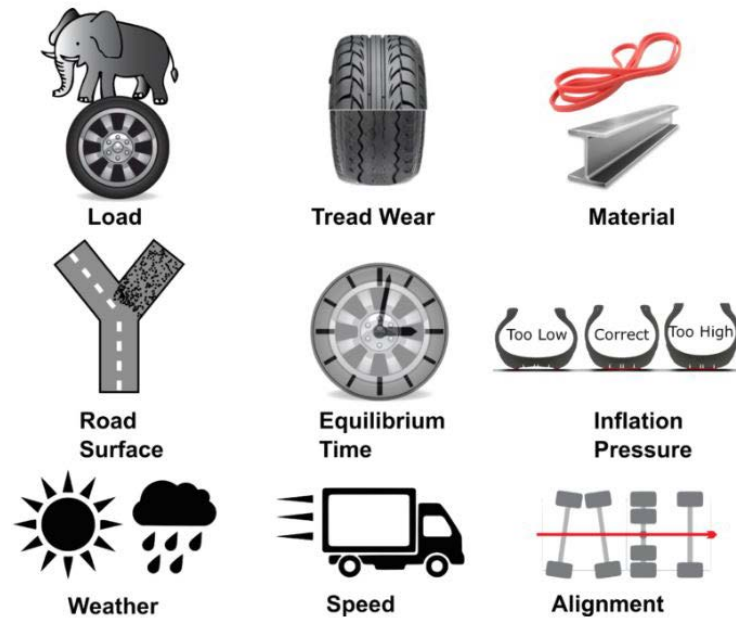


Abbildung 6: Übersicht der wichtigsten Einflüsse auf den Rollwiderstand

(Quelle: <https://dynamon.co.uk/2017/08/30/burning-rubber-the-surprising-cost-of-rolling-resistance/>, abgerufen am 15.10.2019 [22])

In einem Fahrzeugantriebssystem entstehen Widerständen auf verschiedenen Ebenen. Diese werden in dem Projekt MIRIAM (vgl. auch Kapitel 2.2.2) wie folgt definiert und in Abbildung 7 dargestellt:

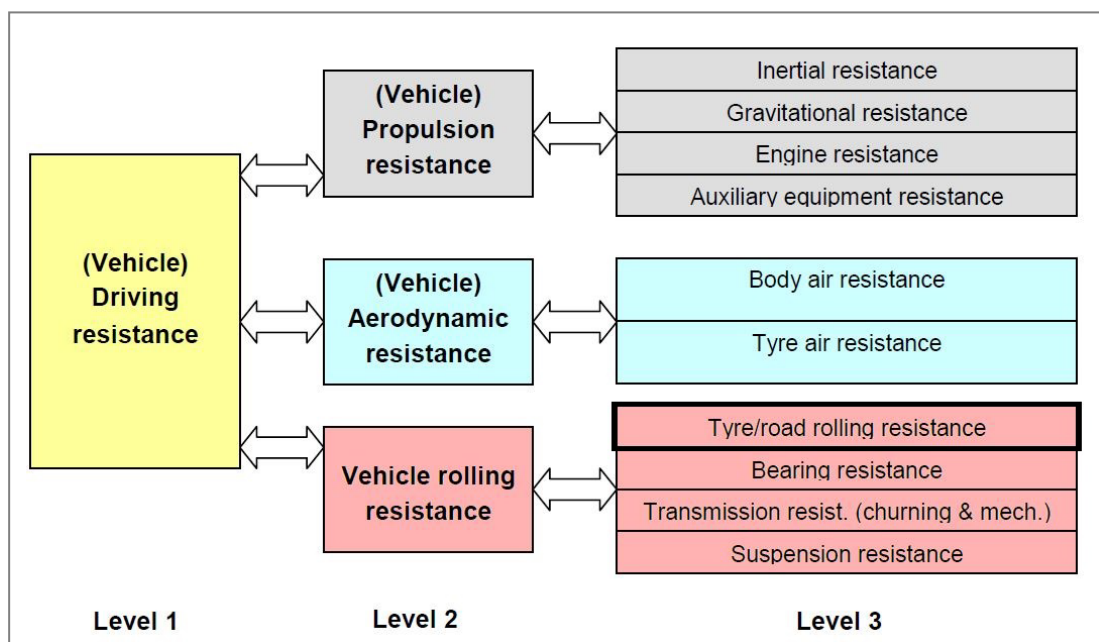


Abbildung 7: Unterteilung der Widerstände im Fahrzeugantriebssystem auf verschiedene Ebenen [7].

2.1 Messmethode und Messgeräte

Für die Messung des Rollwiderstandes existieren derzeit verschiedene Ansätze, die in Abbildung 8 dargestellt sind und auch nachfolgenden beschrieben werden.

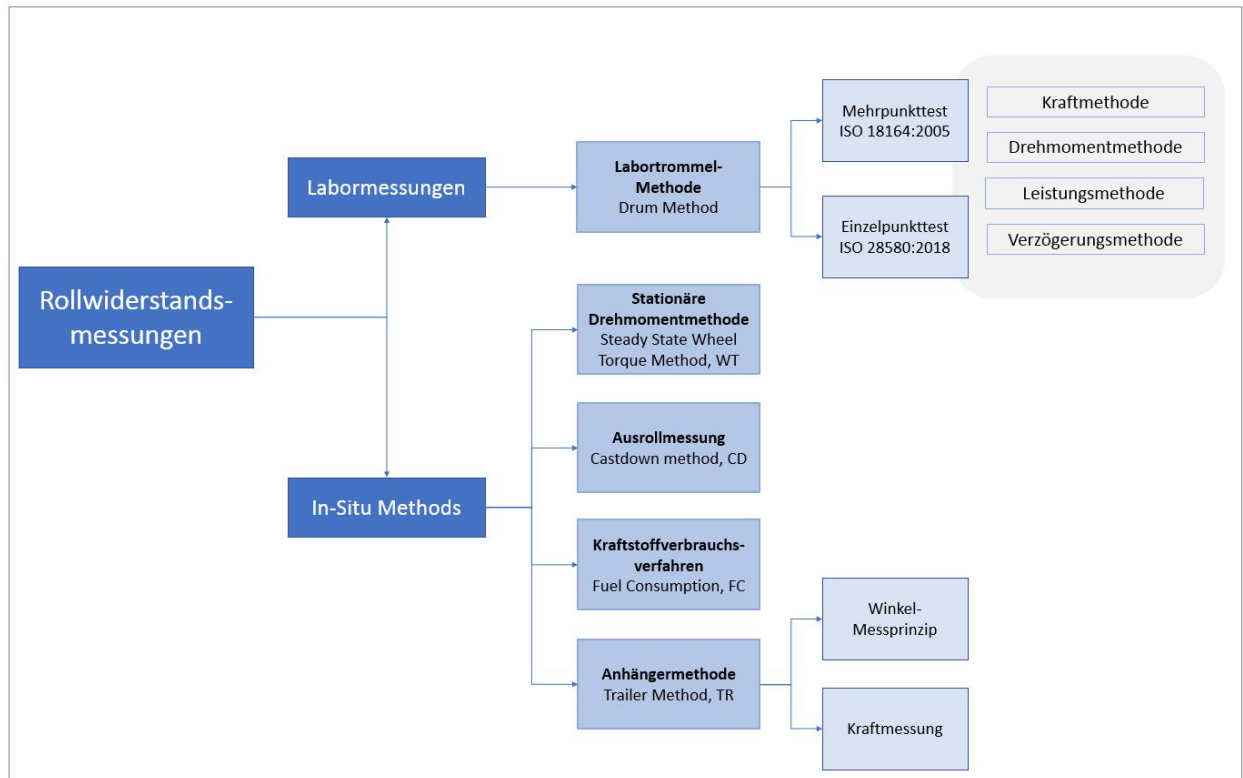


Abbildung 8: Messmethoden des Rollwiderstandes (eigene Darstellung)

Für die Messung des Rollwiderstandes können generell zwei Messprinzipien angewendet werden - direkt und indirekt. Die direkten Prinzipien messen die Rollwiderstandskraft eines Reifens bezogen auf einen festen Bezugspunkt. Die indirekten Prinzipien nutzen die Messung des Effekts in Bezug auf andere physikalische Größen - wie Drehmoment oder Verschiebungswinkel [9]. Nachfolgend werden die einzelnen Messmethoden beschrieben.

2.1.1 Labortrommel-Methode

Die nachfolgende Darstellung wurde aus [2] entnommen und adaptiert. Ein typischer Labortest für den Rollwiderstand besteht aus einer Testtrommel, einem mit der Trommelmitte ausgerichteten Zylinder und einem zu testenden Reifen (Abbildung 9). Der Reifen wird gegen die Trommel gedrückt, die von einem mit ihr gekoppelten Motor angetrieben wird. Der Rollwiderstand des Reifens wirkt sich bremsend auf die Rotation der Trommel aus. Dieser Effekt wird in Messungen von Kräften, Drehmomenten, Verzögerungen usw. umgesetzt. Der Rollwiderstand wird dann aus diesen Messungen berechnet.

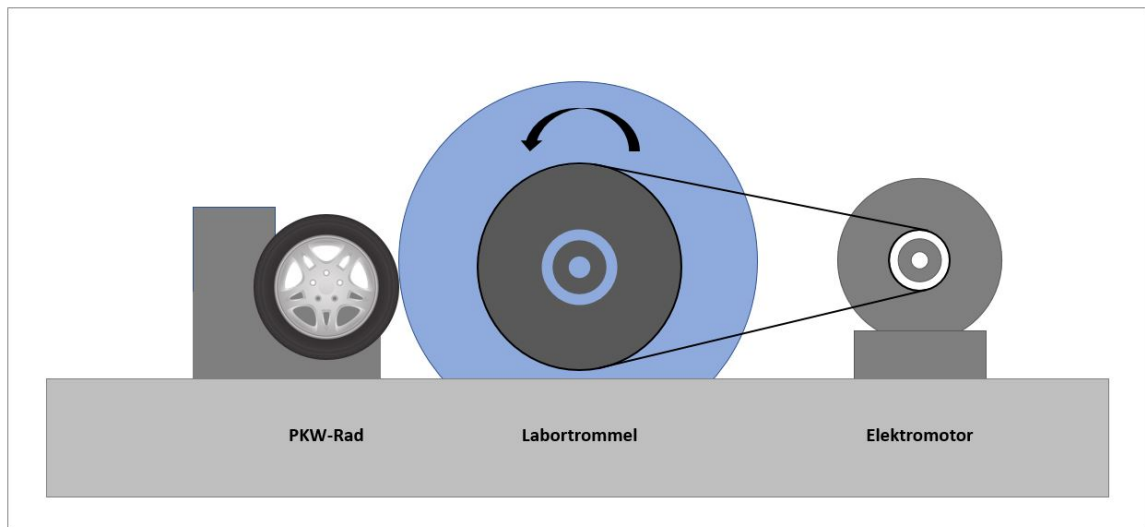


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Labortrommel-Methode (adaptiert von [3])

Für die Labortrommel-Messmethode gibt es zwei internationale Normen:

- ISO 18164: 2005 07 01: Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres -- Methods of measuring rolling resistance
- ISO 28580: 2018 07 15: Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method - Single point test and correlation of measurement results

Die Normen für die Prüfung des Rollwiderstands umfassen vier Messmethoden (obwohl nicht alle in jeder Norm festgelegt sind). Diese Messmethoden sind:

- Messung der Widerstandskraft an der Reifenspindel (**Kraftmethode**);
- Messung des Widerstandsdrehmoments an der Trommelnabe (**Drehmomentmethode**);
- Messung der elektrischen Leistung, die der Motor verbraucht, um die Trommel in Rotation zu halten (**Leistungsmethode**);
- Messung der Verzögerung, nachdem die Antriebskraft an der Trommel unterbrochen wurde (**Verzögerungsmethode**).

Eine schematische Darstellung den Messmethoden wird in Abbildung 10 gezeigt.

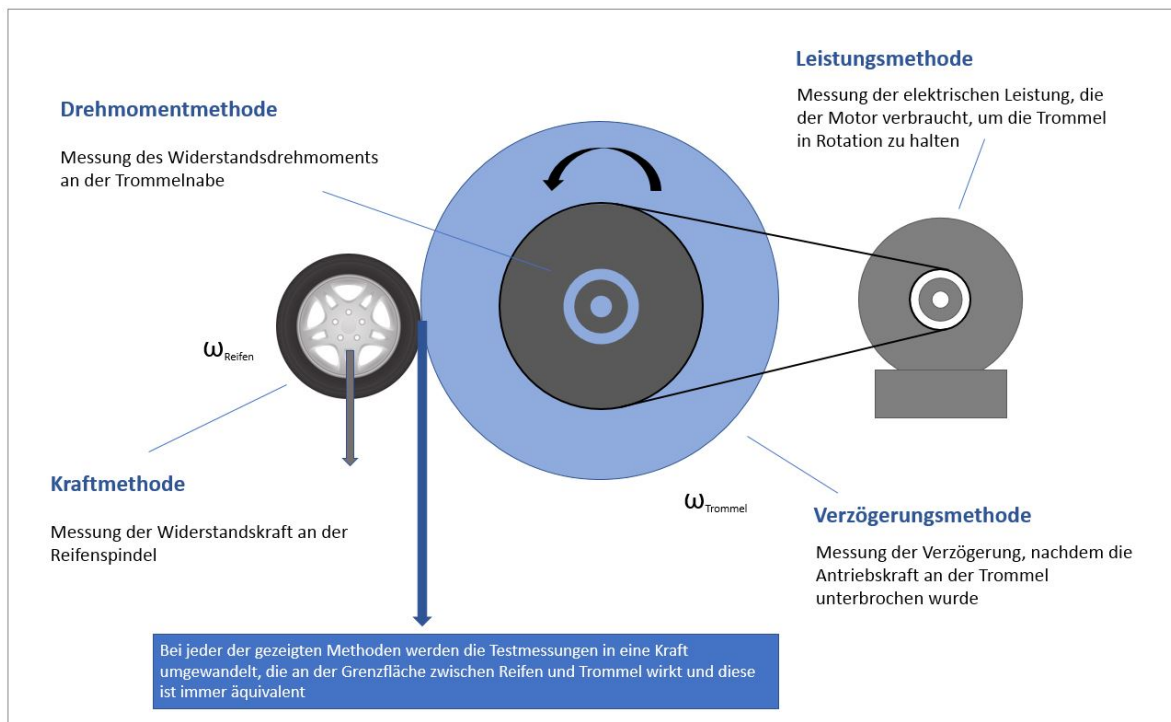


Abbildung 10: Labortrommel-Methoden für die Messung des Rollwiderstandes (adaptiert von [4])

Die Anzahl der Prüfpunkte kann je nach Prüfbedingung unterschiedlich sein. Ein **Einzelpunkttest** umfasst nur eine Einstellung für Reifendruck und Reifenlast, während ein **Mehrpunkttest** eine Reihe von Einstellungen für Reifendruck und Reifenlast umfasst. Der Rollwiderstand wird dann aus der Regression der Mehrpunktmessungen berechnet. Die unterschiedlichen Prüfnormen schreiben eine unterschiedliche Anzahl von Prüfpunkten vor.

Zur Messung des Rollwiderstandes von Autoreifen werden am häufigsten Trommeln mit einem Durchmesser von 1,7 m verwendet, während für LKW-Reifen Trommeln mit einem größeren Durchmesser (mindestens 2,0 m) verwendet werden.

Für die Messungen mit Labortrommel existieren generell zwei Bauweisen des Messsystems: außen und innen (Abbildung 11). Im ersten Fall (Abbildung 11 a) ist der Reifen neben der Labortrommel befestigt. Die erste Messung wird nur bei laufender Trommel durchgeführt. Die Kraft, die erforderlich ist, um die Trommel in Bewegung zu halten, wird gemessen. Dann wird eine zweite Messung der erforderlichen Kraft mit dem Reifen durchgeführt. Bei dem Innenmesssystem (Abbildung 11 b) befindet sich der Reifen in einer großen, drehbar gelagerten, halbseitig offenen Trommel, auf deren Innenseite Fahrbahnkassetten eingebaut werden können.

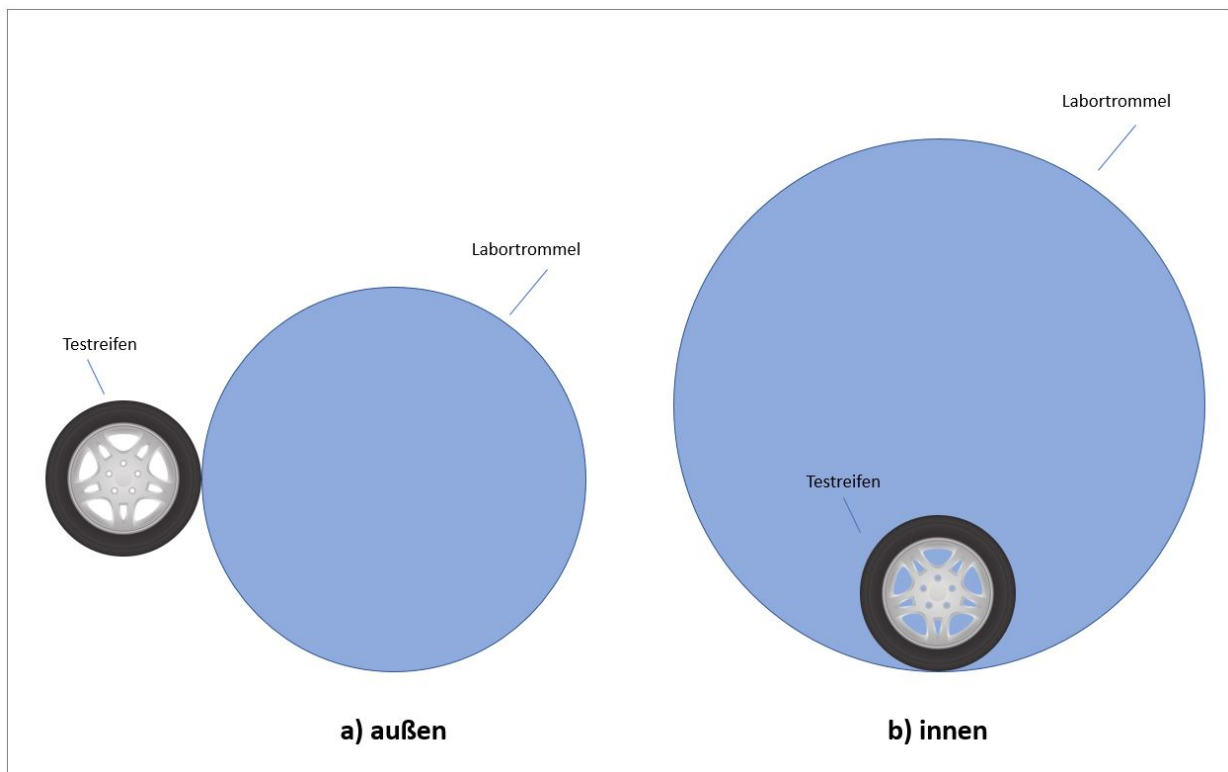


Abbildung 11: Schematische Darstellung von Labortrommel-Messsystem, a) außen und b) innen
(adaptiert von [3])

Die nachkommende Bilderreihe von Abbildung 12 bis Abbildung 16 zeigt einige Beispiele von verschiedenen Labortrommel-Messsystemen.

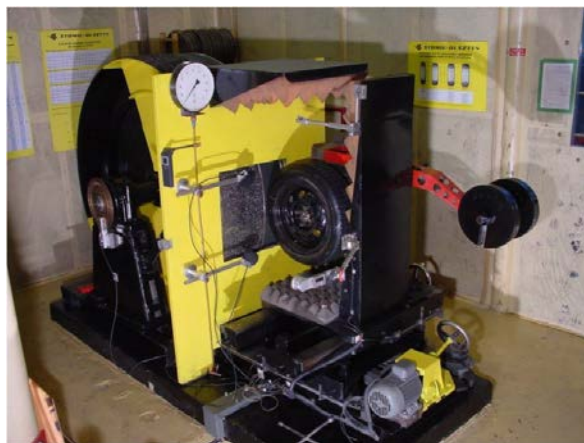


Abbildung 12: Labortrommel in TU Gdansk mit einem Trommeldurchmesser von 1,7 m [15]



Abbildung 13: Labortrommel in TU Gdansk mit einem Trommeldurchmesser von 2 m [15]



Abbildung 14: Der Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BASt [31]

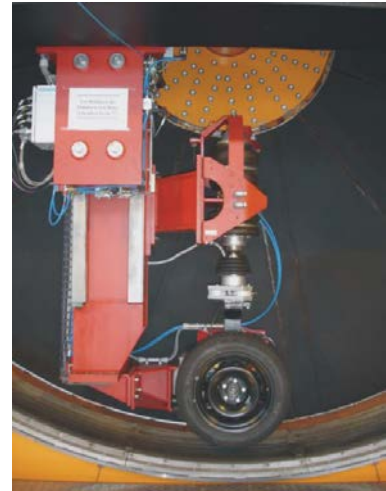


Abbildung 15: Pkw-Radstation [31]

Quelle abgerufen am 27.09.2019:

https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Technik/PFF.pdf?__blob=publicationFile&v=6

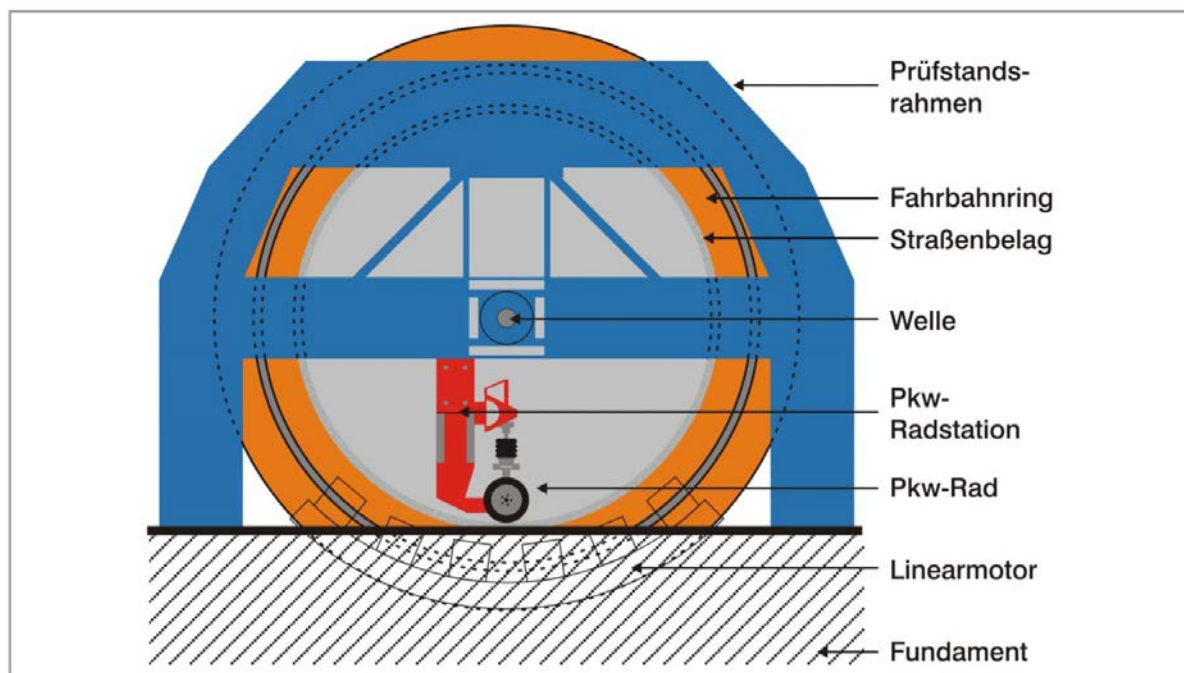


Abbildung 16: Prinzipskizze des Prüfstands Fahrzeug/Fahrbahn der BASt [31]. Quelle abgerufen am 27.09.2019: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Technik/PFF.pdf?__blob=publicationFile&v=6

2.1.2 Stationäre Drehmomentmethode (Steady State Wheel Torque Method)

Die nachfolgende Beschreibung der Messmethode wurde aus [2] entnommen und adaptiert. In Neuseeland wurde in den späten 1980er- und frühen 1990er-Jahren eine spezielle Messmethode entwickelt, die als stationäre Drehmomentmethode bezeichnet wird. Für die Messung wird ein Testfahrzeug (PKW oder LKW) mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 bis 75 km/h gefahren, während das Antriebsmoment eines (angetriebenen) Reifens zusammen mit der relativen Windgeschwindigkeit und -richtung kontinuierlich gemessen wird. Das Antriebsmoment wird durch den dynamischen Reifenradius geteilt und um den Umgebungswind korrigiert, um die Antriebskraft zu erhalten, die erforderlich ist, um alle Widerstandskräfte mit Ausnahme der Antriebsstrangverluste zu überwinden.

Ein Vorteil dieses Verfahren ist, dass der Rollwiderstand inklusive der Verluste der Federung gemessen wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass es die Messung auch mit einem schweren Fahrzeug durchgeführt werden kann. Es teilt die Probleme der anderen Verfahren, aber in diesem Fall ist die Beseitigung des Luftwiderstandseffekts aus dem Rollwiderstandseffekt der Fahrbahn das Hauptproblem. Aus diesem Grund sind hohe Geschwindigkeiten nicht sinnvoll.

2.1.3 Ausrollmessung (Coastdown method)

Die nachfolgende Darstellung der Messmethode wurde aus [5] entnommen und adaptiert. Bei der Ausrollmessung wird die auf das gesamte Fahrzeug wirkende Gesamtkraft durch Messen der Geschwindigkeit (Verzögerung) für ein frei rollendes Fahrzeug abgeleitet. Eine entscheidende Schwierigkeit besteht darin, alle unerwünschten Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken, zu subtrahieren, insbesondere den Luftwiderstand, den Übertragungswiderstand und den Gravitationswiderstand aufgrund der Längsneigung. Der Vorgang erfordert gleichzeitige Messungen der Wetterbedingungen und der Straßentopographie. Um die Ergebnisse mit guter Präzision zu erhalten, erfordert das Verfahren eine sehr sorgfältige Planung, Einrichtung und Durchführung der Messung.

Der Hauptvorteil des Verfahrens bestehen darin, dass es auf praktisch jedes Fahrzeug (PKW, LKW, Motorrad, Fahrrad usw.) anwendbar ist und dass Messungen für ein reales Fahrzeug durchgeführt werden, so dass keine Komponente des gesamten Fahrwiderstands verloren geht. Insbesondere kann die Auswirkung der Unebenheit (z.B. IRI) auf den Rollwiderstand bestimmt werden, was mit keinem anderen Verfahren möglich ist.

2.1.4 Kraftstoffverbrauchsverfahren (Fuel Consumption)

Die nachfolgende Beschreibung der Messmethode wurde aus [2] entnommen und adaptiert. Bei diesem Verfahren wird der Rollwiderstand indirekt gemessen. Die Messmethode besteht darin,

den Kraftstoffverbrauch zu messen und den Rollwiderstandskoeffizient mit Hilfe eines Modells abzuschätzen. Somit untersucht man nur den Einfluss der Fahrbahnoberfläche. In diesem Fall muss man einen ungefähren Rollwiderstandskoeffizienten zum Kraftstoffverbrauch ermitteln. Die Methode kann auch vereinfacht werden, indem nur der Einfluss der Fahrbahnoberfläche auf den Kraftstoffverbrauch untersucht wird.

Bei der Kraftstoffverbrauchsmethode wird ein Testfahrzeug verwendet, das mit präzisen Sensoren für die Messungen von Kraftstoffdurchsatzes ausgestattet ist. Außerdem muss die Fahrzeuggeschwindigkeit mit hoher Präzision gemessen werden, und auch die Luft-, Kraftstoff- und Motortemperaturen sollten gemessen werden. Windgeschwindigkeit und Windrichtung beeinflussen die Ergebnisse und sollten ebenfalls gemessen werden.

Kraftstoffverbrauch-Messungen werden zwischen zwei definierten Punkten auf der Straße in beiden Richtungen durchgeführt. Empfohlene Straßen für die Messung sind solche ohne oder mit geringen Steigungen und Geraden oder Kurven mit sehr großem Kurvenradius.

Diese Methode reagiert auf den Zustand aller Teile des Antriebsstrangs, sowie auf alle Straßenparameter und Umgebungsbedingungen, insbesondere Wind. Die Fähigkeit des Fahrers, die Geschwindigkeit konstant zu halten, sowie die Effizienz der Tempomatfunktion sind ebenfalls mögliche Fehlerquellen.

2.1.5 Anhängerermethode (Trailer Method)

Die Anhängerermethode ist eine Methode, bei der der Rollwiderstand mit einem oder mehreren Testreifen in einem speziellen Anhänger gemessen wird, während er mit konstanter Geschwindigkeit gezogen wird. Der Anhänger kann entweder für Pkw-Reifen oder für schwere Lkw-Reifen ausgelegt sein. Die Messung kann nach einem Winkel-Messprinzip oder als Kraftmessung durchgeführt werden.

Das **Winkel-Messprinzip** in Abbildung 17, das Messsystem in Abbildung 19 und die nachfolgende Beschreibung wurden aus [6], [7] und [9] entnommen und adaptiert. Der Anhänger ist als Viertelfahrzeug mit einer normalen Fahrzeugfederung ausgeführt. Dieser ist mit dem Fahrzeug verbunden und hat einen festen und einen beweglichen Rahmen. Am Ende des beweglichen Rahmens ist eine Zusatzlast angebracht.

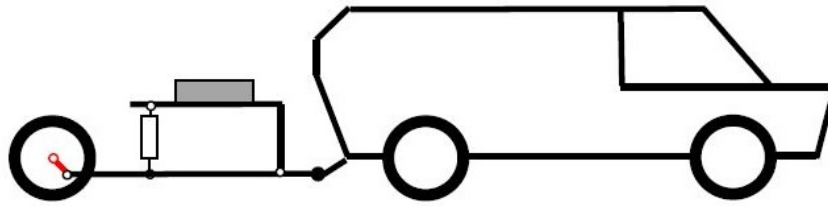


Abbildung 17: Rollwiderstandsmessung nach Winkel-Messprinzip [9]

Während der Messungen wird der Reifen aufgrund der Rollwiderstandskraft (R) nach hinten gezogen (Abbildung 18). Das resultiert in dem gemessenen Winkel θ . Der Rollwiderstandskoeffizient C_r ist als Verhältnis der Horizontalkraft (Rollwiderstandskraft R) zur Vertikalkraft (Vertikallast F_z) definiert. Dies entspricht die Tangente des gemessenen Winkels θ , die angeglichen zur Winkel θ werden kann, da dies ein kleiner Winkel ist.

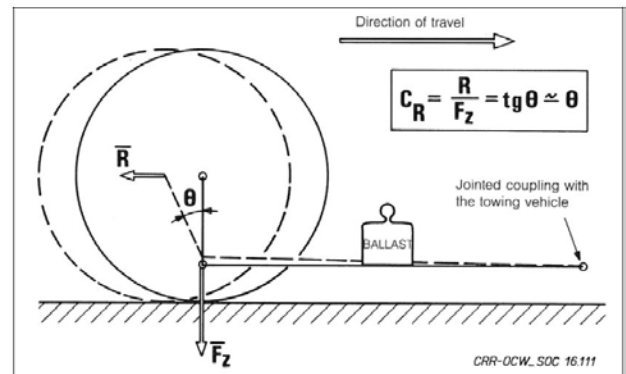


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Anhängerermethode für die Messung des Rollwiderstandes (BRRC und TUG Anhänger messen nach diesem Prinzip, [7])

Der Anhänger ist mit mehreren Sensoren ausgestattet, um verschiedene Parameter während der Messung zu registrieren:

- die Neigung θ des Radträgers in Bezug auf den Rahmen des Anhängers;
- die Neigung μ des Rahmens des Anhängers gegenüber der horizontalen Ebene;
- die Neigung α zwischen Anhänger und Zugfahrzeug im statischen Zustand;
- Reifentemperatur
- Geschwindigkeit
- Beschleunigung

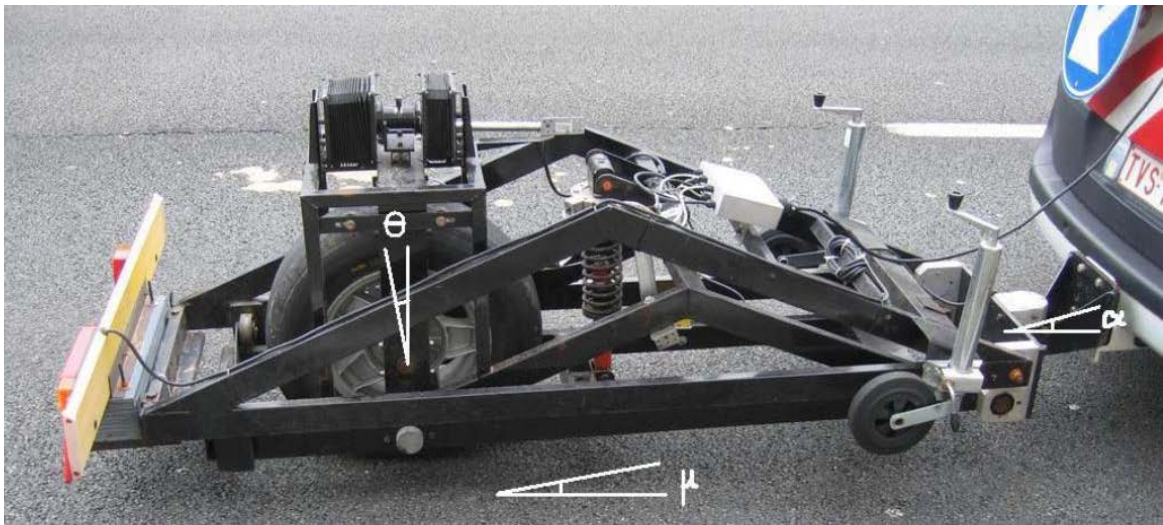


Abbildung 19: BRRRC Anhänger für Rollwiderstandsmessungen und die Darstellung der drei gemessenen Neigungswinkel [7]

Der Technische Universität Gdańsk (TUG) unter der Leitung von Prof. J. Ejsmont beschäftigt sich intensiv seit mehreren Jahren mit dem Thema Rollwiderstand. Die nachfolgende Darstellung der Rollwiderstandsmessungen in Polen wurde aus [7] und [9] entnommen und adaptiert. TUG hat in den späten 1990er-Jahren einen Testanhänger für Rollwiderstandsmessungen mit Pkw-Reifen gebaut, die ersten Messungen erfolgten im Jahr 2005. Die Idee für den Aufbau stammt vom ursprünglichen BRRRC-Anhänger aus den 1980er-Jahren, wurde anschließend von TUG weiterentwickelt und verbessert. Teile des Aufbaus wurden patentiert und in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert.

In den Jahren 2012 und 2013 hat die Fakultät für Maschinenbau der TUG eine verbesserte Version des R²-Anhängers gebaut, um den Rollwiderstand zu untersuchen. Der Trailer ist als „R²Mk.2“ bekannt (siehe Abbildung 20), für den Aufbau und die Ausstattung wurden viele Verbesserungen implementiert. Der Trailer R² Mk.2 hat drei Räder: zwei Vorderräder stabilisieren ihn auf der Straße, während das dritte Rad ein Messrad ist und zwischen den Spuren der Vorderräder verläuft. Der Anhänger kann Prüfräder mit einem Durchmesser von 570 - 730 mm und einer Breite von bis zu 245 mm aufnehmen.



Abbildung 20: TUG-Anhänger für Rollwiderstandsmessungen [7]

Die beiden TUG-Anhänger messen nach dem "Vertikalarmprinzip" (siehe Abbildung 21). Die auf das Messrad wirkende Rollwiderstandskraft wird auf die Radnabe übertragen, die sich an einem vertikalen Schwenkarm befindet. Die auf den Arm wirkende Kraft erzeugt einen Impuls, der den Arm nach hinten ablenkt. Der Ablenkwinkel wird mit einem Lasersystem gemessen. Um die Auswirkungen der Beschleunigung und der Längsneigung der Fahrbahn auszugleichen, wird ein spezielles Ausgleichssystem verwendet (siehe Abbildung 22). Dieses System ist von der TU Gdansk patentiert. Der Anhänger wird mit einer bestimmten Masse beladen, die von einer Feder und einem Stoßdämpfer getragen wird. Da der Winkel der vertikalen Auslenkung des Arms in Bezug auf den Rahmen gemessen wird, der die Referenz ist (nicht in Bezug auf die wahre vertikale Richtung), ist es erforderlich, Informationen über die Rahmenposition in Bezug auf die Straßenoberfläche und die horizontale Ebene bereitzustellen. Dazu messen und vergleichen zwei Lasersensoren den Abstand zur Straßenoberfläche vorne und hinten am Rahmen. Der Anhänger ist außerdem mit einem System zur Messung der Straßenneigung ausgestattet.

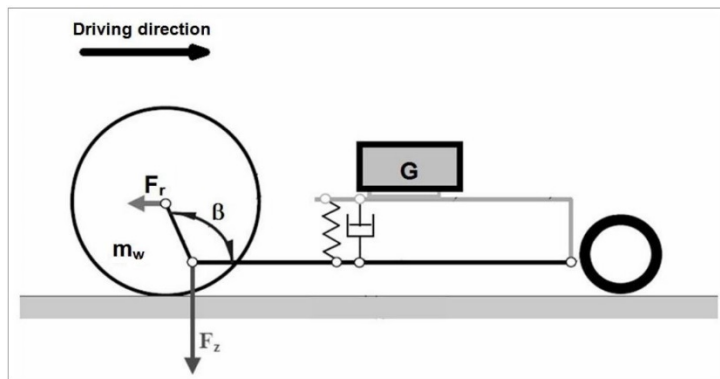


Abbildung 21: Prinzip der Messung mit dem TUG-Anhänger [7]

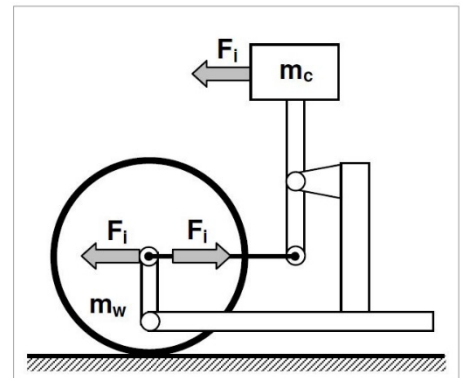


Abbildung 22: Das patentierte Gegengewichtssystem [7]

Beide TUG-Anhänger haben Messungen für Projekte wie MIRIAM, ROSANNE und LEO durchgeführt und wurden in verschiedenen europäischen Ländern sowie in den USA eingesetzt.

Eine weitere Messmethode mit Anhänger ist die **Kraftmessung**. Diese Messmethode wird im Detail in dem Normenentwurf im Rahmen des Projektes ROSANNE beschrieben. In der Abbildung 23 ist ein Beispiel für Rollwiderstandsmessung nach dem Kraftprinzip mit dem BRRC-Anhänger zu sehen.

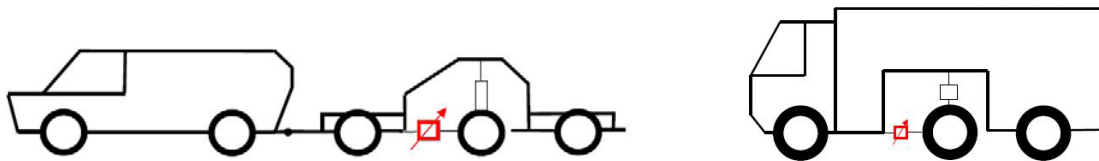


Abbildung 23: BRRC-Anhänger für Rollwiderstandsmessungen (Kraftprinzip), (Quelle: ROSANNE)

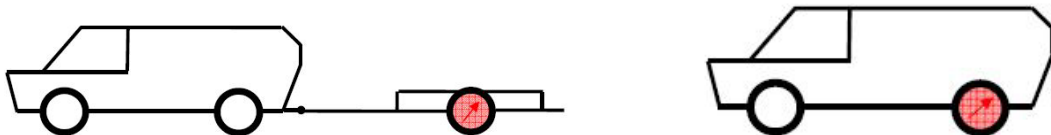
Die nachfolgende Messungsbeschreibung und grafische Darstellung wurden aus [9] adaptiert. Die Kraftmethode kann wie folgt unterteilt und beschrieben werden:

Tabelle 1: Rollwiderstandsmessung mit Kraftmethode (adaptiert von ROSANNE D3.1)

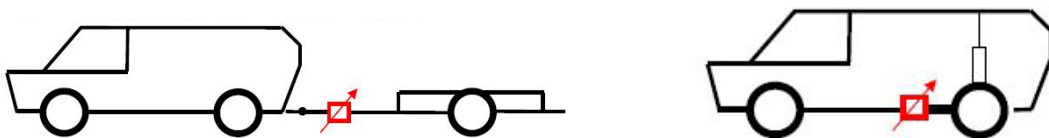
a1) Die Reaktionskraft wird an der Radnabe einer Rad- und Messreifenbaugruppe gemessen, die auf einer separaten Aufhängung in einem Fahrzeug (PKW oder LKW) oder in einem Anhänger eingebaut ist.



a2) Die Reaktionskraft wird gemessen mit einer Kraftmessfelge, die an einem Fahrzeug (PKW oder LKW) oder in einem Anhänger montiert ist.



a3) Gemessen wird die Reaktionskraft einer ganzen Achse, die mit mindestens zwei identischen Rad- und Messreifeneinheiten ausgestattet ist, die entweder als Hinterachse in einem Fahrzeug oder als Anhängerachse eingebaut sind.



Die Rollwiderstandsmessung ist von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Eine Übersicht der wichtigsten Einflüsse der Randbedingungen bei der Messung des Rollwiderstandes ist in Abbildung 24 zusammengefasst.

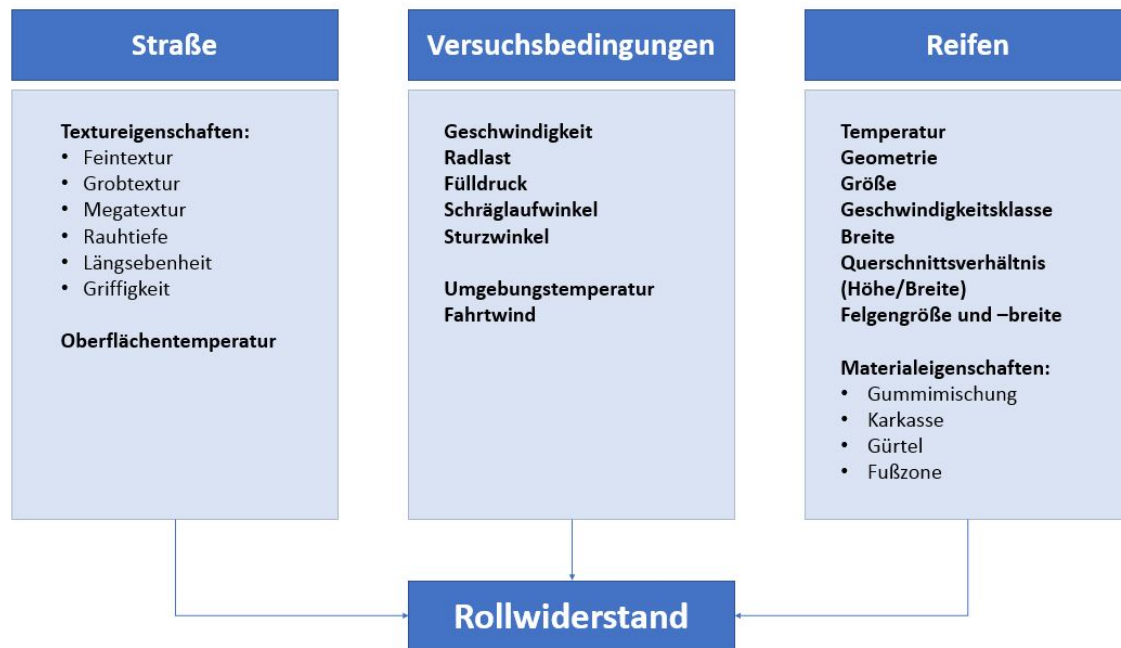


Abbildung 24: Übersicht der wichtigsten Einflüsse auf den Rollwiderstand eines Pkw-Reifens [1]

Eine Zusammenfassung der Messmethode für Rollwiderstand, sowie eine Bewertung der unterschiedlichen Verfahren wurden aus den Projekten MIRIAM und ROSANNE adaptiert und sind in Tabelle 3 bis Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der gemessenen Parameter mit den unterschiedlichen Messmethoden [7]

Method	Parameters measured	Parameters/losses not measured
Drum (laboratory facility)	• Tyre/road rolling resistance + "parasitic losses" (incl bearing resistance) which will be corrected for	Pavement deflection Driving force resistance Side force resistance Losses on a plane surface
Coastdown (full vehicle)	• Vehicle rolling resistance • Vehicle aerodynamic resistance In principle, "everything" at coasting is measured; the problem is to separate out the effects in the data processing stage	Data processing allows separation of aerodynamic resistance and vehicle rolling resistance; to some extent also identifying some components of RRV. Mechanical transmission resistance (depending on driving torque)
Trailer	• Tyre/road rolling resistance • Bearing resistance • (Trailer) suspension losses	Driving force resistance Side force resistance Transmission resistance

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messmethoden für Rollwiderstandsmessungen (Quelle: MIRIAM und RO-SANNE)

Messmethode	Messprinzip	Vorteile	Einschränkungen
Labormessungen	Labortrommel-Methode	Der Testreifen wird gegen eine Trommel gehalten, die von einem mit ihr gekoppelten Motor angetrieben wird. Der Rollwiderstand des Reifens wirkt sich bremsend auf die Rotation der Trommel aus.	Die Messungen können in Innenraum unter vollständiger Kontrolle der Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Die Messungen sind nicht vom Fahrstil abhängig. Es ist eine einfache Anpassung der Messbedingungen (Last, Luftdruck, Geschwindigkeit) möglich.
	Stationäre Drehmomentmethode	Ein Testfahrzeug wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 bis 75 km/h gefahren, während das Antriebsmoment eines (angetriebenen) Reifens zusammen mit der relativen Windgeschwindigkeit und -richtung kontinuierlich gemessen wird.	Es teilt die Probleme der anderen Verfahren, aber in diesem Fall ist die Beseitigung des Luftwiderstandseffekts aus dem Rollwiderstandseffekt der Fahrbahn das Hauptproblem. Aus diesem Grund sind hohe Geschwindigkeiten nicht sinnvoll.
In-Situ Methods	Ausrollmessung	Bei der Ausrollmessung wird die auf das Fahrzeug wirkende Gesamtkraft durch Messen der Geschwindigkeit (Verzögerung) eines frei rollenden Fahrzeugs abgeleitet.	Die Ausrollmethode ist ebenso empfindlich gegenüber verschiedenen (äußeren) Einflüssen wie die Anhängermethode, da der Rollwiderstand einen so geringen Anteil an den gesamten momentanen Kräften hat. Es erfordert ein sehr sorgfältiges Mess- und Analysedesign sowie Erfahrung und umfassende Kompetenz.
	Kraftstoffverbrauchsverfahren	Der Rollwiderstand wird indirekt, mithilfe eines Kraftstoffverbrauchs- / Rollwiderstandsmodells berechnet.	Diese Methode reagiert auf den Zustand aller Teile des Antriebsstrangs, sowie auf aller Straßenparameter und Umgebungsbedingungen, insbesondere Wind. Die Fähigkeit des Fahrers, die Geschwindigkeit konstant zu halten, bzw. die Effizienz der Tempomatfunktion sind ebenfalls mögliche Fehlerquellen.
	Anhängermethode	Der Rollwiderstand wird mit einem oder mehreren Testreifen in einem speziellen gezogenen Anhänger gemessen, während mit konstanter Geschwindigkeit gerollt wird. Zwei Verfahren sind bekannt: Winkel-Messprinzip und Kraftmessung.	Ein Problem bei der Anhängermethode besteht darin, dass nicht klar ist, auf welche Weise Straßenunebenheiten die Messungen, im Wesentlichen den Teil der Energieverluste in der Aufhängung, beeinflussen. Die Radaufhängung hat Einfluss auf die Messergebnisse.

Tabelle 4: Bewertung der Messmethoden für Rollwiderstandsmessungen [2]

Method	Drum	Trailer	Coast-down	Wheel torque	Fuel consumption
Purity of rolling resistance measurement	+++	+++	++	+	--
Including / not including suspension energy losses	--	?	++	++	++
Easy to conduct in the field	---	+++	++	++	++
Representativity of real road measurement	--	+++	+++	+++	+++
Resolution	+++	+++	++	++	+
Repeatability	+++	+++	++	++	++
Reproducibility	+	+	+	-	--
Cost of equipment	---	-	++	+	++
Complexity of equipment, measurement and analysis	+/-	+	-	+/-	+
Required time/manpower for measurement & analysis	+++	+++	--	-	-
Overall mark	+++	+++++++ +++++++	++++++ ++++++	+++++ +++++	+++++++

Aus der Literaturrecherche wurden folgende Ergebnisse zusammengefasst:

Derzeit ist nur die Labortrommel-Methode standardisiert und es gibt zwei internationale Normen:

- ISO 18164: 2005 07 01: Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres -- Methods of measuring rolling resistance
- ISO 28580: 2018 07 15: Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method - Single point test and correlation of measurement results

Im Kapitel 2.1 sind verschiedene Messverfahren dargestellt, aber derzeit ist nur die Anhänger-methode für Rollwiderstandsmessungen in Anwendung. Aktuell sind solche Messgeräte bei BRRC in Belgien und bei der TU Gdansk im Einsatz.

2.1.6 Zusammenfassung Messgeräte

Zu den Messgeräten, die die Erfassung des Rollwiderstandes von realen Fahrbahnoberflächen ermöglichen, kann folgendes festgehalten werden:

- Obwohl die Literatur verschiedene Messverfahren beschreibt, sind derzeit nur Messgeräte nach der Anhänger-methode existent.
- Ein Messanhänger ist bei BRRC in Belgien vorhanden. Der Aufbau eines weiteren Anhängers ist geplant, mit einem Einsatz ist Ende 2021 zu rechnen.
- Ein Messanhänger ist bei der TU Gdansk in Polen vorhanden. Eine ältere Version des Anhängers existiert, ist aber nicht am gleichen technischen Stand.

- Die erwähnten Messanhänger bauen aufeinander auf bzw. sind iterative Verbesserungen des Prinzips der Winkelmessmethode. Sie finden vorrangig in Forschungsprojekten Anwendung.
- Der bei der BASt vorhandene Messanhänger nach dem Kraftprinzip wurde 2018 verschrottet.
- Es gibt derzeit keine standardisierte Messmethode für in-situ-Messungen.

2.2 Zusammenführung von Erkenntnissen aus Vorprojekten

2.2.1 Bisherige Studien mit Schwerpunkt Rollwiderstand

Eine umfangreiche Sammlung von Forschungsarbeiten mit dem Thema Rollwiderstand wurde von J. R. Willis, M. Robbins und M. Thompson erstellt. Diese umfasst mehr als 30 Studien sowohl mit Labor- und In-situ-Messungen als auch mit Entwicklung von Modellen [12].

Eine Zusammenfassung der Studien, die die Auswirkung der Fahrbahnebenheit und der Textur auf den Rollwiderstand und den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs beschrieben, wurde in [13] erstellt und nachfolgend in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Überblick relevante Studien für RoWi

Study	Method	Scope	Findings	Limitations
Deraad, 1978	Lab Test and Field Test	Texture	Rolling resistance is higher on textured surfaces	Limited speeds, limited Texture
Velinsky & White, 1979	Field Test and modelling	Smoothness	Modelling rough roads showed that the rolling losses could be as great as 20 percent in addition to the aerodynamic losses.	Limited data
Bester, 1984	Field Test	Smoothness and Pavement Type	Smoothness had effect on rolling resistance values	Data was Limited, no characterization of pavement
Lu, 1985	Lab Test and modeling	Smoothness	Smoothness and speed of vehicle together affect rolling resistance; Rougher roads consume 10% more energy of vehicle	No validation of the model, Limited pavement properties.
Laganier and Lucas, 1990	Lab Test and Field Test	Texture and Smoothness	Smoothness and texture both are critical for fuel consumption	Standard measurement used for smoothness and texture are obsolete nowadays.
Sandberg 1990	Field Test	Texture and Smoothness	Smoothness affects fuel consumption by more than 12%.	Texture measurements were not standard.
Descornet, 1990	Field Test	Texture	Texture could affect fuel consumption by 9%.	No statistical data available
Du Plessis et al. 1990	Field Test	Texture and Smoothness	Texture and smoothness affect fuel consumption 7%.	No statistical data available

Delanne, 1994	Lab Test and Field Test	Texture and Smoothness	Smoothness could affect fuel consumption by 6% and texture can affect fuel economy by 5%.	No statistical data available
Cenek, 1994	Field Test	Texture and Smoothness	The relationship between smoothness and texture is non-linear.	Limited study on Pavement characteristics
De Graaff, 1999	Field Test	Texture and Smoothness	Effects of texture can be overcome by other effects	The structural assessment was not present.
Amos, 2006	Field Test	Smoothness	Improvement in fuel economy by 2.46% after resurfacing for dump trucks.	No statistical data available.
Heffernan, 2006	Field Test	Smoothness	Rough tracks consume more fuel as compare to smoother one.	No consideration of Texture.
Sandberg et al. 2011	Field Test	Texture	Texture had great impact on fuel economy	The structural assessment was not present.
Zaabar and Chatti, 2011	Field Test	Texture, Smoothness, Pavement Type	Smoothness and texture were both significant in reducing fuel consumption at slow speeds in summer.	Data for winter season was not present.

Obwohl die Studien zu unterschiedliche Ergebnisse kamen, zeigt sich eindeutig, dass die Fahrbahnebenheit und die Textur einen Einfluss auf den Rollwiderstand und den Kraftstoffverbrauch aufweisen. Willis et.al. [12] fassen folgende Ergebnisse aus den Studien zusammen:

- **Megatextur kann den Rollwiderstand negativ beeinflussen.** Je größer die Textur des Belags ist, desto größer ist der Rollwiderstand. In zahlreichen Studien wurde die Textur als Einzeleigenschaft analysiert, um ihren Einfluss auf den Rollwiderstand zu bestimmen. In vielen Fällen kann die Textur den Rollwiderstand des Belags um 5 bis 10 Prozent verändern. Einige Studien deuteten darauf hin, dass dieser Wert möglicherweise noch höher ist. Es ist jedoch schwierig zu quantifizieren, welche realistischen Veränderungen der Textur aufgrund von Verkehrsbelastung oder aufgrund von Rehabilitation auftreten. Es ist auch wichtig zu berücksichtigen, dass, in früheren Forschungen die Textur mit der Geschwindigkeit verknüpft war, die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse jedoch zeigen, dass Geschwindigkeit und Textur bei der Interaktion zwischen Fahrbahn und Fahrzeug nicht korrelieren.
- **Ebene Straßen senken den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs.** Jede Studie, die die Auswirkung von Unebenheiten auf die Interaktion von Straßenfahrzeugen untersuchte, zeigte, dass ebene Straßen den Rollwiderstand verringerten. Je mehr die Ebenheit ver-

bessert wird, desto stärker nimmt der Rollwiderstand ab. Einige Studien zeigten ein Potenzial für Einsparung von Kraftstoffverbrauch von bis zu 4 - 4,5 Prozent. Die Ergebnisse haben auch gezeigt, dass sich der Effekt der Ebenheit mit der Geschwindigkeit ändert.

- **Straßenbelagstyp und Steifigkeit haben keine Auswirkung auf den Rollwiderstand gezeigt.** Willis et.al. stellen einige Studien vor, die auch diese Fahrbahneigenschaften überprüfen. Die Studien deuten darauf hin, dass es schwierig ist, den Kraftstoffverbrauch eines Asphaltbelags direkt mit dem von Beton zu vergleichen. Grund dafür sind inhärente Unterschiede in der Textur, Oberbau bzw. Tragfähigkeit und Unebenheit. Während die Auswirkungen von Textur und Ebenheit auf die Interaktion von Straße und Fahrzeug gut bekannt sind, waren die Ergebnisse zu den Auswirkungen von Straßensteifigkeit und -typ inkonsistent.

Zusammenfassend haben die Ergebnisse der Studien gezeigt, dass die Ebenheit typischerweise den größten Einfluss auf den Rollwiderstand hat. Die Wirkung der Textur ist auf Fahrbahnen im guten Zustand geringer, und es wurden keine eindeutigen Ergebnisse über die Wirkung der Fahrbahnsteifigkeit auf den Rollwiderstand festgestellt.

2.2.2 Forschungsprojekte mit Schwerpunkt Rollwiderstand

Eine Zusammenfassung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten mit Schwerpunkt Rollwiderstand ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Überblick relevante Projekte für RoWi

Kurztitel	Langtitel	Call Programm	Projektlaufzeit
InBEF	Integrale Betrachtung der Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen	FE-Nr. 09.0170/2011/ARB, finanziert durch das BMVBS	2012 - 2016
ROSANNE	Rolling resistance, Skid resistance, AND Noise Emission measurement standards for road surfaces	FP7	2013 - 2016
TYROSAFE	Tyre and Road Surface Optimisation for Skid resistance and Further Effects	FP7	2008 - 2010

MIRIAM	Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems	Keine Ausschreibung, Zusammenarbeit verschiedener Institute	2010 – 2016
MIRAVEC	Modelling Infrastructure Influence on RoAd Vehicle Energy Consumption	ERA-NET ROAD Call 2011 Energy	2011 - 2013
PERSUADE	PoroElastic Road SURface: an innovation to Avoid Damages to the Environment	FP7	2009 - 2015
COOEE	CO ₂ emission reduction by exploitation of rolling resistance modeling of pavements	The Danish Council for Strategic Research	2011 - 2015
ROSE	Roads Saving Energy	Innovation Fund Denmark	2016 - 2018
LEO	Low Emission Optimised tyres and road surfaces for electric and hybrid vehicles	Polish-Norwegian Research Programme CORE	2013 - 2016
LORRY	Developing a low rolling resistance truck tyre	FP7	2012 – 2016

Eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse sowie die Abgrenzung zu etwaigen thematisch relevanten Vorprojekten wird nachfolgend dargestellt.

InBEF - Integrale Betrachtung der Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen

InBef ist ein abgeschlossenes Projekt mit FE-Nr. 09.0170/2011/ARB, finanziert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Das Ziel des Projektes war eine ganzheitliche Beschreibung der Eigenschaften von Fahrbahndecken. Nach Festlegung der Messmethoden wurden Textur, Griffigkeit, Rollwiderstand und Lärmemission von verschiedenen Teststrecken erhoben und die Messergebnisse vereinheitlicht, aufbereitet und analysiert. Die Daten wurden in ein Modell integriert und ein Selektionsmechanismus für die Auswahl eines Belags entsprechend verschiedener Kriterien entwickelt. AIT war Hauptauftragnehmer des Projektes.



Rolling resistance, Skid resistance and Noise Emission measurement standards for road surfaces.

ROSANNE ist ein abgeschlossenes Projekt im 7. EU-Rahmenprogramm. Ziel des Projektes war die Harmonisierung und/oder Entwicklung von Messmethoden für die Griffigkeit,

Lärmemission und den Rollwiderstand von Straßenbelägen. Innerhalb von ROSANNE wurden viele Erkenntnisse gesammelt und Vorarbeiten geleistet, auf die verschiedene Normungsgremien - vor allem CEN / TC 227 / WG 5 – aufbauen können. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden mehrere prä-normative Entwürfe von Standards erarbeitet, die die Basis für zukünftige Standards, einschließlich ISO und CEN-Standards, bilden. AIT war Koordinator dieses Projekts. Mehr Information unter: <http://www.rosanne-project.eu/>



Tyre and Road Surface Optimisation for Skid resistance and Further Effects

Die Hauptziele des Projekts waren die Koordinierung und die Vorbereitung der europäischen Harmonisierung sowie die Optimierung der Bewertung und der Verwaltung wesentlicher Reifen/Straßen-Interaktionsparameter, um den europäischen Straßenverkehr sicherer und umweltfreundlichen zu machen. Die Arbeiten konzentrierten sich nicht nur auf den Straßenbelag, sondern auch auf Reifen und insbesondere die Wechselwirkung zwischen Straßenbelag und Reifen. Dieses Projekt bot eine Übersicht über den aktuellen Stand des wissenschaftlichen Verständnisses und dessen aktuelle Anwendung in nationalen und europäischen Normen. Es ermittelte den Bedarf an künftiger Forschung und Optimierung von drei Schlüsseleigenschaften europäischer Straßen: Griffigkeit, Rollwiderstand und Geräuschemission in der Kontaktzone Reifen/Fahrbahn. AIT war Koordinator dieses Projekts. Mehr Information unter: <http://tyro-safe.fehrl.org/>



Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems

MIRIAM ist ein Projekt von zwölf Partnern aus Europa und den USA, bestehend aus Universitäten, Forschungsinstituten und nationalen Straßenbehörden. Das Ziel des MIRIAM-Projekts ist die Entwicklung, Bereitstellung und Verbreitung eines strategischen Instruments zur Erreichung von Energieeinsparungs- und CO₂-Reduktionszielen für Entscheidungsträger, die sich mit Straßenbau und die Straßenerhaltung befassen. Die Aufgabe des Projekts MIRIAM besteht darin, das Potenzial zur Einsparung von Energie- und CO₂-Emissionen durch Hinzufügen von Rollwiderstandsdaten in Straßenoberflächenmanagementsystemen zu untersuchen.

In der ersten Phase des Projektes die Untersuchung der Fahrbahneigenschaften, Energieeffizienz, die Entwicklung von Modellen durch die mittlere Profiltiefe (MPD) und den International Roughness Index (IRI) war im Mittelpunkt.

Im Weiteren wurden grundlegende und aktuelle Kenntnisse über den Einfluss verschiedener Funktionsparameter von Straßenoberflächen auf den Rollwiderstand dargestellt. Danach wur-

den Modelle entwickelt, die die Beziehung zwischen Rollwiderstand und Straßenbelagsparametern beschreiben. Das MIRIAM-Projekt zielt dabei auf die direkte Umsetzung der Ergebnisse in Asset-Management-Systeme ab, um künftige energieeffiziente Straßen zu bauen.

AIT ist Projektpartner. Mehr Information unter: <http://www.miriam-co2.net/>



Modelling Infrastructure influence on RoAd Vehicle Energy Consumption

MIRAVEC ist ein abgeschlossenes Projekt im ERA-NET Road Call 2011. Ziel des Projektes war die Unterstützung der CO₂-Reduktion durch besseres Verständnis und Modellierung der Fahrzeug-Straßen-Interaktion. MIRAVEC untersuchte die verfügbaren Modelle und Tools und bewertete die relative Bedeutung verschiedener Straßeninfrastrukturmerkmale für verschiedene Einstellungen (z. B. Topographie oder Netzwerktyp). Der Schwerpunkt des Projektes wurde auf die Modelle gelegt, die in anderen Projekten wie IERD, ECRPD und MIRIAM entwickelt und verwendet wurden, um diese zu bewerten und die Stärken sowie die Einschränkungen zu identifizieren. Das Projekt war Teil des ERA-NET Energie-Programms. AIT war Koordinator dieses Projekts. Mehr Information unter: <https://www.cedr.eu/strategic-plan-tasks/research/era-net-road/call-2011-energy/miravec-project-result/>



PoroElastic Road Surface: an innovation to Avoid Damages to the Environment

PERSUADE ist ein abgeschlossenes Projekt im 7. EU-Rahmenprogramm. Ziel des PERSUADE-Projekts war es, eine poroelastische Straßenoberfläche (PERS) zu entwickeln, die eine extrem hohe Geräuschreduzierung bietet und gleichzeitig sicher, kostengünstig, nachhaltig und von akzeptabler Dauer ist, und dies auf verkehrsreichen Straßen zu demonstrieren. Mehr Information unter: <http://persuade.fehrl.org/>

COOEE – (CO₂ emission reduction by exploitation of rolling resistance modeling of pavements) ist ein Kooperationsprojekt zwischen der dänischen Straßenbehörde, der Roskilde-Universität, der Technischen Universität von Dänemark und NCC Roads. Das Projekt konzentrierte sich darauf, den wissenschaftlichen Hintergrund für neuartige Oberbautypen und Asset-Management-Lösungen zu schaffen, die den Rollwiderstand für Pkw und Lkw minimieren, um den CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors zu verringern. Mehr Information unter: <http://www.fehrl.org/news/cooee-event-on-how-new-smart-roads-help-cars-reduce-fuel-consumption>

ROSE – (Roads Saving Energy) ist ein dänisches Projekt mit dem Ziel, einen dauerhaften Asphaltbelag mit einem verringerten Rollwiderstand zu entwickeln, der zu einer Verringerung

des Energieverbrauchs von Personenkraftwagen um mindestens 6,5 Prozent im Vergleich zu den durchschnittlichen Straßen in Dänemark führt. Mehr Information über das Projekt unter:

<http://rose-project.dk/about-rose/>

Im Zusammenhang mit den beiden Projekten COOEE und ROSE wurde klimafreundlicher Asphalt auf insgesamt 50 km Straßen in verschiedenen Landesteilen in Dänemark verbaut und messtechnisch untersucht. Bisher sind die Ergebnisse der Untersuchung vielversprechend. Die dänische Regierung plant, ab 2020 alle Nationalstraßen mit klimafreundlichem Asphalt ausführen, sobald vorhandene Oberflächen ersetzt werden müssen. (Quelle: <https://ruc.dk/en/news/climatefriendly-asphalt-developed-researchers-roskilde-university-will-be-introduced-all>, abgerufen am 02.10.2019)



Low Emission Optimised tyres and road surfaces for electric and hybrid vehicles

LEO ist ein abgeschlossenes Projekt im Polish-Norwegian Research Programme CORE. Das LEO-Projekt befasste sich mit der Entwicklung von Reifen für Elektro- und Hybridautos. Ziel war es, Kosten und Nutzen der Verwendung von Reifen mit sehr geringem Rollwiderstand auf Fahrbahnen zu bewerten. Gleichzeitig wurde das Problem der Reifen-/Straßengeräusche von Elektroautoreifen untersucht. Das Projekt hat gezeigt, dass Reifen und Fahrbahnen mit niedrigem Rollwiderstand den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen um bis zu 15% senken können, was einer proportionalen Erhöhung der Reichweite entspricht. Auf Basis der Projektergebnisse ist es möglich, Straßenbeläge auszuwählen, die in Bezug auf Energieverbrauch und Geräuschreduzierung den städtischen und vorstädtischen Bedingungen am besten entsprechen. Mehr Information unter: <http://www.leo.mech.pg.gda.pl/?q=node/12> und <https://eeagrants.org/archive/2009-2014/projects/PL12-0110>

Development of an innovative low rolling resistance truck tyre concept in LORRY combination with a full scale simulation tool box for tyre performance in function of material and road parameters

Das von der EU geförderte Projekt LORRY hat einen Beitrag zu einer umweltfreundlicheren, sichereren und effizienteren Mobilität im Güterverkehr geleistet. Die Projektpartner untersuchten innovative Entwürfe für Reifenkonzepte in Kombination mit Lamellen- und Reifentechnologie. Die neuartigen Konzepte zeigten bei Labortests Verbesserungen bei der Abnutzung und beim Rollwiderstand und wurden im Weiteren in den bei Flottentests eingesetzten LORRY-Reifenprototyp integriert. Die Laborergebnisse von Prototyp-Lenkachsreifen belegen eine vielversprechende Verbesserung in Bezug auf Verschleißeigenschaften und Rollwiderstand. Um

Material- und Reifenverhalten besser nachvollziehen zu können, entwickelten die Forscher erweiterte Modelle und Methoden. Sie entwickelten zudem eine Methode, um den Rollwiderstand und die Laufflächenabnutzung für eine gegebene Lastkraftwagen-Reifenkombination zu prognostizieren. Mehr Information unter: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/105867/reporting/de>

In den folgenden zwei Kapiteln wird aufgrund ihrer Bedeutung auf deutsche Forschungsprojekte (die einzigen Projekte, bei denen der Rollwiderstand mit LKW-Reifen gemessen wird) sowie auf die Projekte in Dänemark, die eine rollwiderstandsoptimierte Asphaltbauweise entwickelten, eingegangen

2.2.3 Deutsche Projekte für die Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen

Forschungsprojekte in Deutschland befassen sich über einen längeren mit dem Thema „Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen“. Nachfolgend werden die Ergebnisse und Erfahrungen aus den Projekten beschrieben, wobei die anschließende Darstellung aus [23], [24], [25] und [26] entnommen und adaptiert wurde. Aufgrund der Tatsache, dass das in diesen Projekten verwendete Messsystem das einzige ist, das LKW-Reifen verwendet, wird hier etwas ausführlicher auf die Projekte eingegangen.

Im Rahmen des Projektes „Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen“ [23] wurde nach dem auf ebenen Fahrbahndecken in der Realität auftretenden Reifenrollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen geforscht. Das Projekt wurde im Zeitraum 2010-2012 von IPW Automotive GmbH, Hannover, durchgeführt und von Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gefördert. Die Messungen wurden mit einem Spezialfahrzeug (Lkw-Gliederzug mit 18t-Anhänger), entwickelt von IPW, durchgeführt. Das Kraftmessglied ist zwischen Koppelmaul und Deichselkopf eines Wechselbrückenzuges montiert (Abbildung 25).

Im Bericht sind die folgenden besonderen Merkmale der Messeinrichtung erwähnt: spielfreie mechanische Anbindung, Robustheit und eine hohe Messempfindlichkeit bei minimaler Signal-drift. Die Fahrtrichtungskomponente der Koppelkraft wurde gemessen und als Deichselkraft F_D bezeichnet, die die Summe der am Anhänger wirksamen Fahrwiderstände beinhaltet: Luftwiderstand F_L , Beschleunigungswiderstand F_B , Steigungswiderstand F_H und Radwiderstand F_{RAD} .



Abbildung 25: Outdoor-Prüfverfahren Koppelkraftmessung [23]

Im Weiteren wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn“ [24] der Reifenrollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Betriebsbedingungen und eine Gegenüberstellung von Trailer- und MTL-Methode untersucht. Für die Messungen wurde eine von IPW neuentwickelte mobiles Prüflabor mit der Bezeichnung Mobile Tire Lab (MTL, Abbildung 26) angewendet. Das eingesetzte Spezialfahrzeug ist ein Sattelzug mit integriertem Reifenprüfstand. Das durchgeführte Versuchsprogramm beinhaltet vier Blöcke: I) Validierung, II) Geschwindigkeits- und Übergangsverhalten, III) Messungen im Verkehrsfluss auf Autobahnen, IV) Überprüfung eines Fahrbahn-Temperaturphänomens. Im Vorprojekt war die Fahrgeschwindigkeit aufgrund der dem Messwert überlagerten Luftwiderstandskomponente zwingend auf 15 km/h limitiert.



Abbildung 26: Mobile Tire Lab (MTL) [24]

Die Forschungsarbeiten mit dem MTL wurden im Rahmen des Projektes „Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen“ [25] weitergeführt. Die Messungen haben im September 2015 auf dem Rundkurs des Dekra Prüfgeländes in Klettwitz stattgefunden und ein Jahr darauf fand eine Fortsetzung dieser Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen“ [26] statt. Die Messungen umfassten 3 definierte Abschnitte mit konstanter Fahrgeschwindigkeit

(85, 15 und 50 km/h) in festen Zeitintervallen über insgesamt 4 h Dauer unterbrechungsfrei. Die Lufttemperaturen vor Ort lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 13-21°C, wobei nur die letzte Messreihe war die Temperatur im Werten von 8-12°C (Messungen in den Nachstunden). Die Variationsparameter waren Druck- und Temperatursensoren. Für die Messungen wurde ein Standard Trailerreifen der Dimension 385/65 R22.5 mit integrierter Druck- und Temperatursensoren verwendet.

Das Versuchsprogramm umfasste drei Teile: Warmlaufphase, Übergang v-Sprung und stationäres Verhalten. Bei der Warmlaufphase wurde den stetiger thermischen Übergang vom Ausgangszustand 'Reifen kalt' auf ein höher gelegenes Temperaturniveau beobachtet. Die Ergebnisse haben Temperaturunterschiede bei „indoor“ und „outdoor“ Messung gezeigt. Als Gründe dafür werden folgende Effekte vermutet:

- Die erhöhte Walkarbeit in Zusammenhang mit der gekrümmten Kontaktfläche
- Differierender Kühleinfluss durch unterschiedliche Luftanströmung
- Abweichende Temperaturen in der Kontaktzone (Luft und Fahrbahn)

In die zweite Phase, bezeichnet als Übergang v-Sprung, wurden Zyklustest mit 3 Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt (85 km/h, 15 km/h und 50 km/h). Wie zu erwarten war, stellte sich beim Wechsel der Geschwindigkeitsstufe ein signifikanter Rollwiderstandssprung ein. Dies ist eine Folge des thermischen Gleichgewichtszustandes, welche durch den sprunghaften Wechsel der Fahrgeschwindigkeit ausgelöst werden.

Wie in Abbildung 27 zu sehen ist, fällt beim Übergang vom 85 km/h auf 15 km/h (Verzögerung) die Materialtemperatur um nur 5 Kelvin, aber der Rollwiderstandskoeffizient verringert sich drastisch von ca. 4,2 ‰ auf unter 3,5 ‰ infolge eines deutlichen Wärmeüberschusses im Reifen. Weiter wird aus der Graphik ersichtlich, dass der Trend im Kurvenverlauf für 15 km/h eine Steigerung des Rollwiderstands als Ergebnis der Reifenabkühlung aufgewiesen hat. Wie zu erwarten war, stieg der Rollwiderstand beim Übergang von 15 auf 50 km/h analog zum Verhalten bei Beginn der Warmlaufphase durch eine vorübergehend höhere Verlustarbeit – eine Folge der erhöhten Hystereseffizienz.

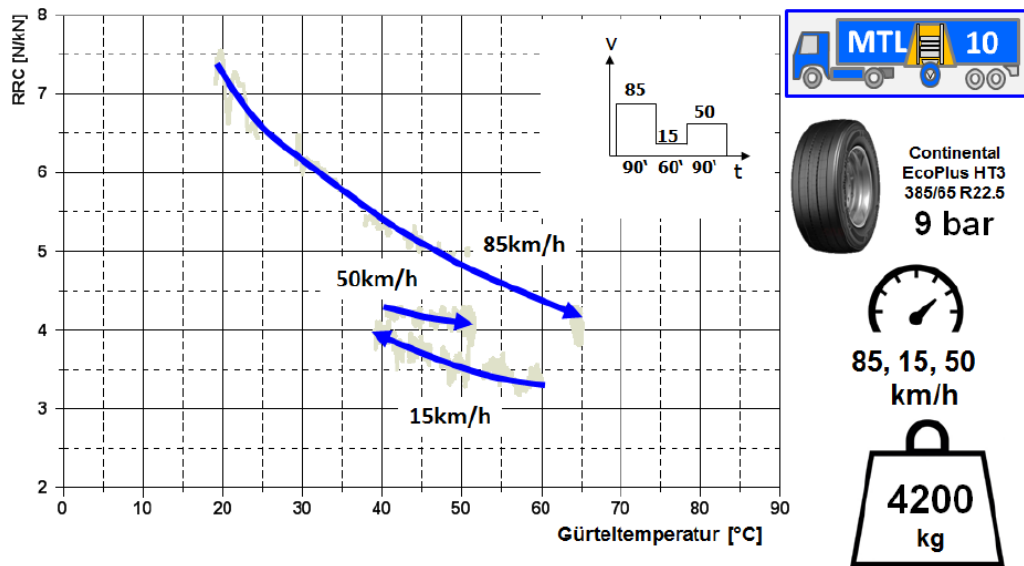


Abbildung 27: Stufentest – Interaktion von Geschwindigkeitswechsel, Materialtemperatur und Rollwiderstand [25]

Im weiteren Verlauf wurde die nächste Phase des Forschungsprojektes als „**stationäres Verhalten**“ bezeichnet. Es wurde eine Versuchsreihe von Rollwiderstandsmessungen mit dem Testobjekt auf einer Stahltrommel mit 2 m Durchmesser in einer klimatisierter Laborumgebung durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Verlauf eine kontinuierliche Abnahme des Rollwiderstands zwischen 15 km/h und 85 km/h, allerdings ist die Änderung mit weniger als 0,5 % abs. relativ gering.

Trotzdem deuteten die Ergebnisse einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Materialtemperatur und Geschwindigkeit und somit steigt die Reifenerwärmung in beiden Testsituationen proportional zur Raddrehzahl an.

Die deutschen Forschungsprojekte haben zwar interessante Ergebnisse für den Zusammenhang zwischen Temperatur und Rollwiderstand gezeigt, aber den Einfluss von Straßenparameter wurde nicht im Detail betrachtet. Deutlich wird aber auch hier, wie groß der Einfluss der Reifentemperatur auf den Rollwiderstand ist, was sich besonders bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen auf dem gleichen Belag zeigt.

2.2.4 Dänische Projekte mit Schwerpunkt Rollwiderstand

Verschiedene Forschungsprojekte in Skandinavien beschäftigen sich mit der Rollwiderstandsoptimierung von Asphalt-Bauweisen und der Umsetzung in Teststrecken. Im Rahmen der Projekte COOEE und ROSE wurde ein sog. „klimafreundlicher Asphalt“ entwickelt und auf Probe-strecken verlegt. Zwei neue SMA mit einer maximalen Korngröße von 8 bzw. 6 mm (SMA 8, SMA 6) wurden entwickelt und mit einem herkömmlichen SMA 0-8 mm (Referenz) verglichen. Die Oberflächeneigenschaften der Teststrecken wurden gemonitort, insbesondere Rollwiderstand, Haltbarkeit und Sicherheit. Der Asphalt ist in der Herstellung um 10 Prozent teurer, aber kann Kraftstoff sparen und ist sowohl langlebig als auch geräuschkindernd im selben Ausmaß wie die Standard-SMA 8 und 11.

Im Rahmen des Projektes COOEE wurden die Eigenschaften den neuen SMA-Mischungen untersucht. In Bezug auf die volumetrischen Eigenschaften wurden insgesamt 6 Bohrkerne für jede Mischung entnommen. Für jede Probe wurden die Schichtdicke und der Hohlraumgehalt gemäß EN 12697-8 überprüft, siehe Tabelle 7. Die Oberflächeneigenschaften wurden als MPD bzw. Griffigkeit gemäß ISO 13473-1 und CEN / TS 15901-5 gemessen.

Tabelle 7: Eigenschaften von Asphaltmischungen (Projekt COOEE) [33]

Materials	Volumetric Characteristics				Wearing Characteristics			
	Layer thickness		Voids Content		MPD		Skid Resistance	
	Average [cm]	St. Deviation [cm]	Average [%]	St. Deviation [%]	Average [mm]	St. Deviation [mm]	Average [-]	St. Deviation [-]
Reference	2.9	0.2	5.1	1.4	0.77	0.06	0.65	0.05
SMA 8	2.4	0.4	4.4	2.2	0.75	0.07	0.64	0.06
SMA 6	2.0	0.3	8.2	0.7	0.72	0.06	0.70	0.05

Es wurden drei verschiedene Testabschnitte untersucht und der TUG-Anhänger für die Rollwiderstands-Messungen verwendet. Die vorläufigen Schlussfolgerungen aus dieser Untersuchung sind:

- Das Mischungsdesign eines SMA kann optimiert werden, um den Rollwiderstand der Mischung selbst zu verringern. Dies hängt nicht nur mit der maximalen Abmessung der angenommenen Aggregate zusammen, sondern auch von den Mastix-Eigenschaften ab. Eine Verringerung der maximalen Abmessung der Aggregate verstärkt den positiven Beitrag zum Rollwiderstand.
- Die volumetrischen Eigenschaften des Mischguts wie Schichtdicke und Hohlraumgehalt scheinen die Rollwiderstandsreaktion der Fahrbahn nicht zu beeinflussen. Es wird jedoch eine eingehendere Analyse vorgeschlagen, die sich auf diese Aspekte konzentriert.
- Der Rollwiderstandskoeffizient kann mit den Texturmerkmalen der Oberflächenschicht korreliert sein, z. B. MPD und Griffigkeit.

- Die Messung des Rollwiderstands hängt vom Typ des verwendeten Reifens ab.

Im Allgemeinen haben die Projekte gezeigt, dass der klimafreundliche Asphalt eine lang anhaltende Textur mit verringertem Rollwiderstand und verringertem Kraftstoffverbrauchs aufweist. Die Geräuschreduzierung eines klimafreundlichen Asphalts unterscheidet sich nicht wesentlich vom Standard-SMA8. Die Luftverschmutzung wird reduziert, indem Kraftstoff gespart wird, ohne die Haltbarkeit des Asphalts zu beeinträchtigen und ohne die Verkehrssicherheit zu beeinträchtigen. Aufgrund der verbesserten Haltbarkeit und Stabilität der Textur wird jedoch eine längere Lebensdauer erwartet.

Da die Ergebnisse von den Probestrecken vielversprechend waren, erhielt die dänische Straßenbehörde (DRD) Fördermittel, um den vorher optimierten klimafreundlichen Asphalt in eine Demonstrationsphase überzuführen. Ziel des Projekts war es, den Bau von Fahrbahnen mit geringem Rollwiderstand zu optimieren, um die Vorteile und Herausforderungen dieses neuen Mischtyps aufzuzeigen und zu bewerten. Laut der Bewertung der Straßenverkehrsverwaltung werden am dänischen Straßennetz 184.000 Tonnen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr eingespart, wenn der Asphalt von 2020 bis 2030 verlegt wird [32].

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Messungen durchgeführt: Oberflächeneigenschaften (Textur, Ebenheit, Griffigkeit, Rollwiderstand und Rollgeräusch), sowie Kraftstoffverbrauch. Diese sind im Detail in [16] dargestellt und nachfolgend kurz zusammengefasst.

Die CPX-Methode wurde verwendet, um Geräuschmessungen auf den dänischen Teststrecken mit klimafreundlichen, standardmäßigen SMA 11 und geräuschreduzierenden Fahrbahnbelag (SRS) mit ähnlichen Lebens- und Verkehrsbedingungen (gemäß ISO/CD 11819-2: 2017) durchzuführen. Für alle Messungen wurde der Standard-Referenzreifen (SRTT) verwendet. Die Ergebnisse werden gemäß CPX-Standard auf eine Umgebungslufttemperatur von 20°C (Korrekturfaktor 0,1 dB / °C) korrigiert. Die Messungen wurden mit dem DRD CPX-Anhänger „deciBella“ durchgeführt (Abbildung 28).

Die Geräuschmessungen haben gezeigt, dass der entwickelte klimafreundliche Belag eine geringere Geräuschemission aufweist als SMA11 und mit dem Standard SMA8 vergleichbar sind. Aufgrund der verbesserten Texturstabilität ist die Geräuschemission von klimafreundlichen Belägen im Zeitverlauf geringer als bei Standard-SMA11 und geräuschreduzierenden Fahrbahnbelag (SRS).

Im Rahmen des Projektes wurden auch Rollwiderstands- und Kraftstoffverbrauchsmessungen durchgeführt. Der Rollwiderstand wurde mit dem TUG-Anhänger und drei unterschiedliche Reifen gemessen (vgl. Abbildung 29).

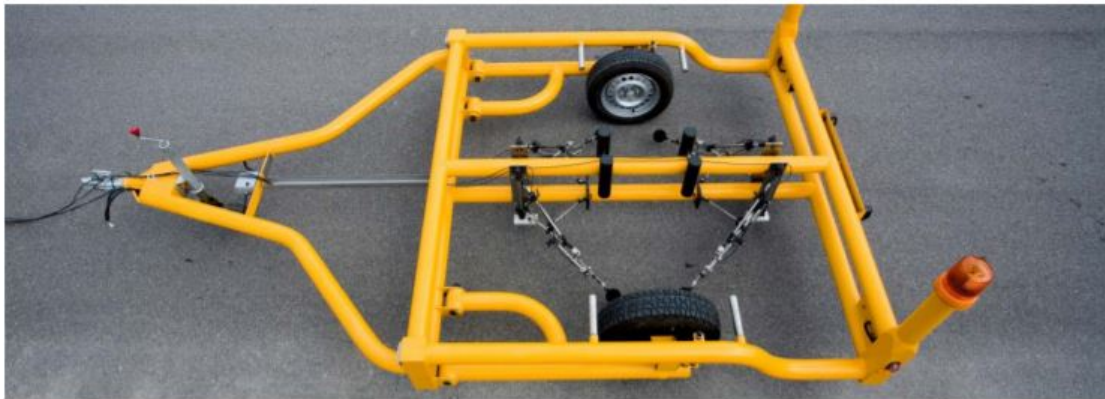


Abbildung 28: CPX-Anhänger „deciBella“ (Quelle: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp29grb/GRB-68-09e.pdf>, abgerufen am 10.12.2019)



Abbildung 29: Rollwiderstandsmessung des klimafreundlichen Asphalts mit TUG-Anhänger und drei unterschiedliche Reifen [16]

Der SRTT ("Standard Reference Test Tire") ist in ASTM F2393 als Referenzreifen für verschiedene Zwecke spezifiziert. Der AAV4 (ein Reifen für leichte Lastkraftwagen), ist ein getesteter Reifen, der Fahrbahnbeläge (für Lärm) in etwa so klassifiziert wie eine Auswahl von normalen Reifen für schwere Lastkraftwagen. Der MCEN-Reifen wurde von TUG seit Beginn der Rollwiderstandsmessungen verwendet und wurde beibehalten, um eine Verknüpfung zu alten Messungen herzustellen.

Die Rollwiderstandsmessungen wurden in den Jahren 2018 und 2019 durchgeführt. Folgende Ergebnisse sind zusammengefasst:

- Die Rollwiderstands-Reduktion nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Klimafreundlicher Asphalt ist bei niedriger Geschwindigkeit effektiver. Bei 110 km/h beträgt der Unterschied zwischen den klimafreundlichen Asphalt und SMA11 etwa 5 %, während er bei 80 km/h auf 6,6 % ansteigt.
- Der höchste Beitrag in Bezug auf die Rollwiderstand-Reduktion wurde bei 50 km/h gemessen. Diese Analyse wurde an zwei Teststrecken durchgeführt und die Rollwiderstands-Reduktion betrug im Durchschnitt 9,2 % (im Vergleich zu einem SMA 8).

Zum besseren Verständnis wurden die Ergebnisse der Rollwiderstandsmessungen gemittelt, nachdem sie auf eine Referenztemperatur von 25 °C korrigiert worden waren und sind in Tabelle 8 dargestellt. Der Temperaturkorrekturfaktor muss noch weiter validiert werden. Wenn er jedoch auf einen Datensatz angewendet wird, der bei einer ähnlichen Temperatur und bei vielen Messungen erfasst wurde, kann der korrigierte Rollwiderstandswert als zuverlässig angesehen werden.

Tabelle 8: Die Rollwiderstandsdaten von Juli 2018 und April 2019 wurden auf eine Referenztemperatur und Reduktionen korrigiert [16]

Mix type	Rolling Resistance at 25°C []		RR reduction at 25°C [%]	
	80 km/h	110 km/h	80 km/h	110 km/h
SMA 11	0.00926	0.01046	Ref	Ref
SMA8 KVS	0.00856	0.00977	7.6	6.5
SMA8 st	0.00867	NA	6.4	NA

Zusätzlich wurden Kraftstoffverbrauchsmessungen mit einem Mercedes Vito 119 Bluetech (2016) durchgeführt (Abbildung 30). Es wurde mit Continental VanContact 200-Reifen ausgestattet, die bei 10 ° C Lufttemperatur auf 3,3 bar eingestellt waren.



Abbildung 30: Kraftstoffverbrauchsmessung mit Messsystem der Firma M+P [16]

Der Kraftstoffverbrauch wird vom Bordcomputer in Liter/h gemessen. Dies wird aus der Kraftstoffmenge bestimmt, die tatsächlich in jeden Verbrennungszyklus eingespritzt wird, und mit der Anzahl der Verbrennungen pro Umdrehung und der Drehzahl multipliziert.

Die Kraftstoffverbrauch-Messmethode wird von vielen verschiedenen Variablen beeinflusst und die Auswirkung der Textur auf den Kraftstoffverbrauch ist sehr schwer zu isolieren, wenn Daten über einen einzelnen Abschnitt gesammelt werden. Aus diesem Grund wurde ein empirisches Modell zur Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs basierend auf dem MPD definiert.

Insgesamt wurden 200 km Daten gesammelt und über 20 Meter Streckenlänge gemittelt. Texturdaten und Längsprofilaten, die in der Regressionsanalyse verwendet werden, sind Durchschnittswerte des relativen Maßes für beide Radwege über einen 20-Meter-Abschnitt.

Die IRI-Daten liegen zwischen 0,3 m/km und 4,2 m/km, 80% der IRI-Daten liegen unter 0,9 m/km. Es wurde festgestellt, dass die MPD-Daten im Bereich von 0,1 mm bis 1,4 mm lagen und 90 % der MPD-Wert liegen zwischen 0,3 und 1,2 mm. Der IRI wurde jedoch aus zwei Gründen nicht in das Regressionsmodell aufgenommen:

- Der IRI ist keine Eigenschaft des Mischgutes.
- Die IRI-Daten liegen in einem sehr begrenzten Bereich. Bei Einbeziehung in die statistische Analyse der Kraftstoffverbrauchsdaten wurde festgestellt, dass der IRI nicht so signifikant wie der MPD ist. Das Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt, dass sich der Kraftstoffverbrauch mit zunehmender Texturtiefe erhöht.

Es wurde auch festgestellt, dass die Kraftstoffverbrauch-Reduktionen, die mit dem Modell in Gleichung (3) berechnet wurden, sich nicht wesentlich von denen unterscheiden, die im MI-RAVEC-Projekt entwickelt wurden.

$$FC = 0.1729 \times MPD + 4.1410$$

(3)

wobei:

FC - Kraftstoffverbrauch

MPD - Mittlere Profiltiefe

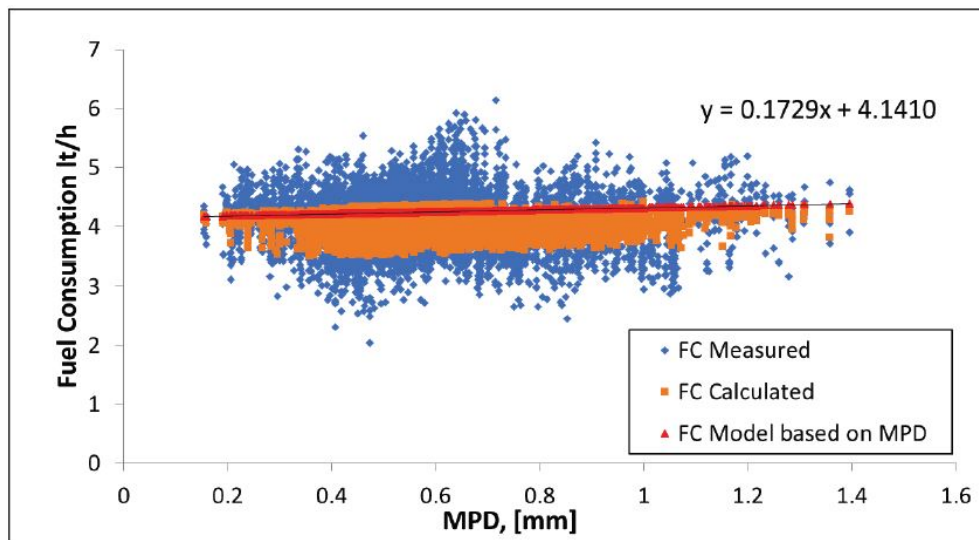


Abbildung 31: Kraftstoffverbrauch-Regressionsmodell als Funktion der MPD [16]

Das in Gleichung (3) dargestellte Modell wurde verwendet, um die hypothetische CO₂-Reduktion abzuschätzen, die durch die Implementierung eines klimafreundlichen Belags auf dem Dänischen Straßennetz erzielt werden könnte. Dieses Modell kann nicht als zuverlässig angesehen werden, wenn es auf Straßenbelägen angewendet wird, die anderen Textureigenschaften als die zur Kalibrierung des Modells verwendeten aufweisen, kann jedoch für MPD-Werte zwischen 0,3 mm und 1,3 mm als zuverlässig angesehen werden.

Folgende Ergebnisse sind im Projekt zusammengefasst:

- Die Geräuschmessungen zeigten, dass klimafreundlicher Asphalt eine Geräuschabsorption aufweist ähnlich wie ein Standard-SMA 8. Basierend auf der Analyse der Geräuschspektren ist es nicht möglich, vorherzusagen, wie sich die Geräuschemissionen des klimafreundlichen Asphalts im Laufe der Zeit entwickeln werden. Aufgrund der verbesserten Texturstabilität und Haltbarkeit wird erwartet, dass die Geräuschemissionen von KVS-Belägen eine geringere Verschlechterungsrate aufweisen als Standardmischungen und geräuschreduzierenden Mischungen (SRS).
- Der klimafreundliche Belagstyp weist im Vergleich zu Standard-SMA 8 und SMA 11 niedrige Rollwiderstand-Eigenschaften auf. Der klimafreundliche Asphalt wies während der

im April 2019 durchgeführten Messkampagne eine durchschnittliche Rollwiderstand-Reduzierung von 7% auf.

- Mithilfe von Kraftstoffverbrauch-Messungen konnte ein lineares Modell extrapoliert werden, das die Texturtiefe und den Kraftstoffverbrauch korreliert. Unter Verwendung des entwickelten Modells wurden die erwarteten Kraftstoffverbrauch-Reduzierungen im Vergleich zu Standardbelägen über die Lebensdauer berechnet (Tabelle 9).

Tabelle 9: Berechnete CO₂-Reduktion durch klimafreundlichen Belag [16]

CO ₂ reduction [%]	Pavement age (years)	
	0	17*
KVS vs SMA11	1.00%	2.00%
KVS vs SMA8	0.40%	1.80%
* expected life time of KVS pavements		

Die bisherigen Studien (Kapitel 2.2.1), sowie die Vorprojekte (Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3) zeigen die Bedeutung eines tieferen Verständnisses der Interaktion zwischen Fahrbahn und Fahrzeug. Die Ergebnisse geben aber immer noch keine eindeutige Feststellung, wie genau die Straßenzustandsparameter den Rollwiderstand beeinflussen. Darüber hinaus gibt es derzeit kein standardisiertes Verfahren für die In-Situ Messungen von Rollwiderstand.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Entwicklung und Implementierung von Modellen zur Prognose des Rollwiderstands aus anderen Fahrbahnparametern. Mehrere Projekte haben sich intensiv mit diesem Thema beschäftigt und sind im Detail im nächsten Kapitel 2.3 dargestellt.

2.3 Prognosemodelle Rollwiderstand

2.3.1 Frühere Erfahrungen und Erkenntnisse

Die nachfolgende Zusammenfassung der Prognosemodelle für Rollwiderstand wurde aus [11] entnommen und adaptiert. Die bisherige Literatur zu den Auswirkungen der Straßenoberflächeneigenschaften und des Rollwiderstands von Fahrzeugen und damit der Emissionen und dem Kraftstoffverbrauch weist unterschiedliche Ergebnisse auf. Dies hat verschiedene Gründe, unter anderem:

- Der Anteil der Straßenoberfläche an den Fahrwiderständen, insbesondere am Rollwiderstand, ist relativ klein.
- Es ist schwierig, die Effekte der Straßenoberfläche von anderen Effekten (vor allem dem Reifen) zu isolieren und den Beitrag von Ebenheit (IRI) und Textur (MPD) zu quantifizieren.

- Unterschiedliche Methoden zur Messung des Rollwiderstands können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Die Mehrzahl der Faktoren, die den Rollwiderstand beeinflussen, ist vom Fahrzeug abhängig. Die Fahrbahneigenschaften spielen eine eher untergeordnete Rolle bei der Bestimmung des gesamten Rollwiderstands, den ein Fahrzeug überwinden muss. Viele Studien und Projekte haben sich intensiv mit den Straßenparametern beschäftigt (mehr in Kapitel 2.2), wobei die Ergebnisse gezeigt haben, dass die Textur und die Ebenheit einen Effekt auf den Rollwiderstand aufweisen. Diese zwei Parameter erzeugen Vibrationen in den Reifen und Aufhängungen von Fahrzeugen. Die Vibrationen werden von den Stoßdämpfern und Reifen des Fahrzeugs absorbiert und verursachen einen Energieverlust im gesamten Fahrzeugsystem. Die Oberflächentextur der Straßenoberfläche induziert diese Vibrationen, die letztendlich den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs beeinflussen. Die Ebenheit wirkt sich auf den Verschleiß und den Energieverlust der Stoßdämpfer aus, um ein komfortableres Fahren zu ermöglichen [12].

Die fachliche Sammlung von Willis [12], sowie der MIRIAM-Bericht von Sandberg et al. [14] haben wichtige Rollwiderstandsuntersuchungen überprüft und die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- Wenn der Rollwiderstandskoeffizient sich erhöht, nimmt auch der Kraftstoffverbrauch zu.
- Die wichtigsten Fahrbahnparameter, die den Rollwiderstand beeinflussen, sind Makrotextur (MPD) oder Megatextur, Unebenheit (IRI) und Steifigkeit.
- Textur und Unebenheiten beeinflussen den Rollwiderstand negativ; größere Werte von MPD und IRI führen zu größerem Rollwiderstand.

Basierend auf diesen Schlussfolgerungen sollte ein Modell, das die Einwirkung auf den Rollwiderstand beschreibt, MPD und IRI berücksichtigen, während der Einfluss der Steifigkeit des Oberbaus noch nicht geklärt ist. Die beeinflussenden Größen bzw. Wellenlängenbereiche für den Rollwiderstand sind im untenstehenden Diagramm ersichtlich (vgl. Abbildung 32). Die Einflüsse erstrecken sich von der Makrotextur bis zur Längsebenheit.

Eine Zusammenfassung von einigen Prognosemodellen für den Rollwiderstand wurde aus [11] entnommen und nachfolgend dargestellt.

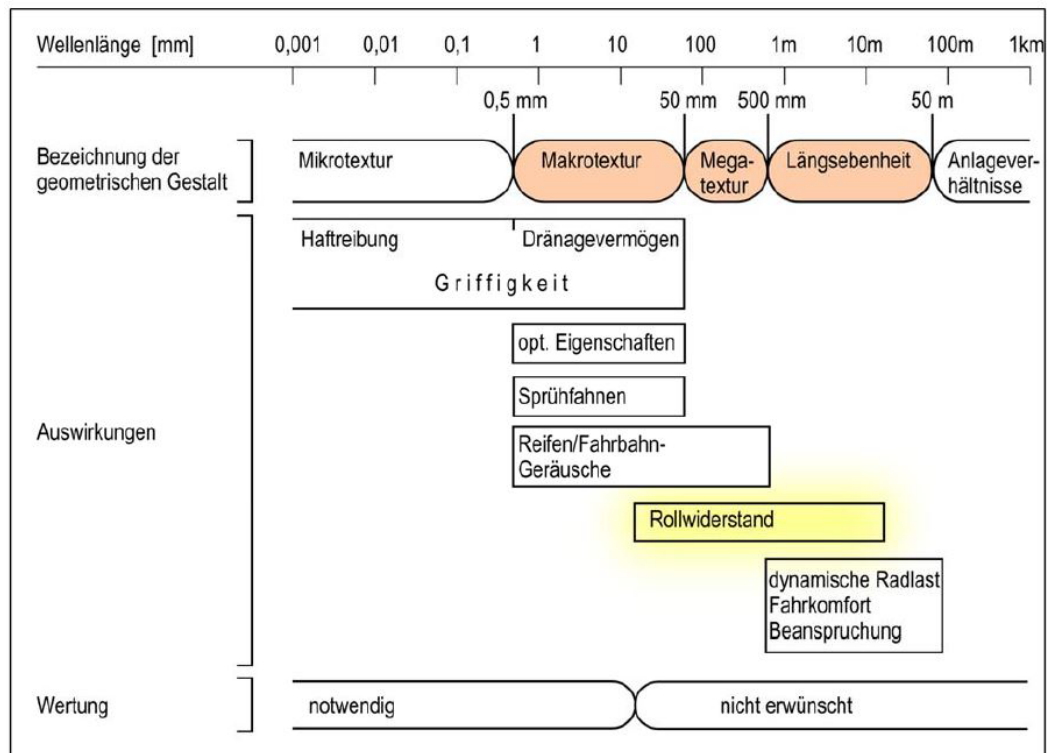


Abbildung 32: Fahrbahneigenschaften und ihr Zusammenhang mit Auswirkungen auf Fahrzeuge
(adaptiert nach Huschek, TU Berlin)

HDM-4 Modell

HDM-4 ist ein empirisch-mechanistisches Modellsoftwaretool, das von der PIARC (World Road Association) entwickelt wurde, um Kostenanalysen für die Straßeninstandhaltung und -instandsetzung durchzuführen. Es enthält sowohl ein Modell zur Simulation des Rollwiderstands mittels IRI und MPD, als auch ein Modell, um die Auswirkungen des Rollwiderstands auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs zu verknüpfen. Der mechanistische Teil des HDM-4 analysiert alle Fahrwiderstände am Motor auf der Grundlage der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrbahnsteigung. Der empirische Teil verwendet Koeffizienten, die die Fahrwiderstände in Energieverbrauch umwandeln, die durch verschiedene Experimente ermittelt und mit Messdaten kalibriert wurden.

Im Jahr 2011 wurde das Kraftstoffverbrauchsmodell im Rahmen des NCHRP-Projekts 1-45 (Chatti und Zaabar - Models for Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs [34]) für amerikanische Verhältnisse kalibriert. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass Längsebenheit (IRI) und Gradienten einen statistisch signifikanten Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch bei niedriger und hoher Geschwindigkeit hatten, während die Mak-

rotextur (MPD) bei hoher Geschwindigkeit statistisch nicht signifikant war. Dies ist ein Widerspruch zu den Beobachtungen anderer Studien. Die Autoren erklärten dieses Ergebnis damit, dass bei höheren Geschwindigkeiten der Luftwiderstand die vorherrschende Komponente des Kraftstoffverbrauchs ist und die Erhöhung des Rollwiderstands aufgrund der Makrotextur minimiert.

VTI Modell (VETO-Modell)

Im Vergleich zu dem HDM-4 Modell enthält das VTI-Modell (auch als VETO-Modell bekannt) ein allgemeines Rollwiderstandsmodell und ein Kraftstoffverbrauchsmodell (Abbildung 33). Das VTI-Modell ist im Detail in [10] beschrieben.

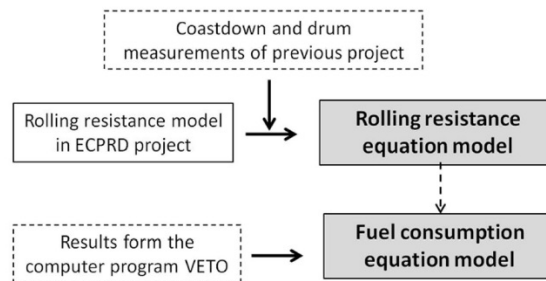


Abbildung 33: Prinzipschema des VTI-Modells

Das Modell wurde im Rahmen der EU-Projekte IERD (2006) und ECRPD (2010) entwickelt. IERD (Integration of Energy into Road Design) bewertete den Energieverbrauch im Straßenbau in Bezug auf unterschiedliche Ausrichtungen und die Auswirkungen auf den Energieverbrauch von Oberbau und Verkehr. Das Nachfolgeprojekt ECRPD (Energy Conservation in Road Pavement Design) konzentrierte sich auf die Bewertung der Energieeinsparung bei der Herstellung und Oberbau von Straßenbelägen. Weiters wurde das VETO-Modell auch in MIRIAM und in MIRAVEC, sowie in ROSANNE verwendet bzw. erweitert.

Das Rollwiderstandsmodell basiert hauptsächlich auf empirischen Daten aus Messungen in Schweden nach dem Ausrollmessungsprinzip (coastdown) und ist in ein auf dem Fahrwiderstand basierendes Kraftstoffverbrauchsmodell eingebaut. Das Kraftstoffverbrauchsmodell wurde basierend auf berechneten Werten aus dem VETO-Computerprogramm und dem am VTI entwickelten theoretischen Modell zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemissionen aus dem Verkehr aufgrund der verschiedenen Eigenschaften von Fahrzeugen, Straßen und des Fahrverhaltens kalibriert.

Das Modell wurde für drei Fahrzeugtypen entwickelt und kalibriert: einen PKW, einen LKW und einen LKW mit Anhänger unter Verwendung zweier verschiedener Gleichungen:

Die erste Gleichung setzt den Rollwiderstand in Beziehung zu den Oberflächeneigenschaften einer Fahrbahn (IRI und MPD) (Gleichung (4) für PKW).

$$F_r = m_1 \times g \times (0.00912 + 0.0000210 \times IRI \times v + 0.00172 \times MPD) \quad (4)$$

wobei:

- F_r - Rollwiderstand [-]
- m_1 - Fahrzeugmasse [kg],
- v - Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s],
- IRI - Fahrbahnunebenheit [m/km] und
- MPD - Makrotextur [mm].

Der zweite zeigt den Kraftstoffverbrauch als Funktion des Rollwiderstands, der Geschwindigkeit und anderer Variablen des Straßenzustands aus, wie z. B. Steigung und horizontale Krümmung (Gleichung (5) für PKW).

$$F_{cs} = 0.286 \times \left(\left(\begin{array}{l} 1.209 + 0.000481 \times IRI \times v + 0.394 \times MPD \\ + 0.000667 \times v^2 + 0.0000807 \times ADC \times v^2 \\ - 0.00611 \times RF + 0.000297 \times RF^2 \end{array} \right)^{1.163} \right) \times v^{0.056} \quad (5)$$

wobei:

- F_{cs} - Kraftstoffverbrauch [l/10 km]
- ADC - Kurvigkeit [rad/km]
- RF - Gradiente (rise and fall) [m/km]

Hammarström et al. legen in [10] folgende Ergebnisse vor: Wenn der MPD pro Strecke um bis zu 0,5 mm verringert wird, verringert sich der gesamte Kraftstoffverbrauch im Straßennetz um 1,1%. Durch Verringern des IRI pro Strecke um 0,5 m/km erhöht sich die Geschwindigkeit parallel zu einem verringerten Rollwiderstand, was eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs wiederum kompensiert, der Verbrauch bleibt in etwa konstant. Wenn die Spurrinnentiefen parallel zu IRI verringert wird, wird die Geschwindigkeit weiter erhöht. Für einzelne Strecken besteht möglicherweise ein Energieeinsparungspotenzial, wenn der Anteil schwerer Fahrzeuge groß genug ist.

Die folgenden Einschränkungen des Projekts werden auch erwähnt:

- Angaben zu Geschwindigkeit und MPD fehlen;
- Das in dieser Studie verwendete allgemeine Rollwiderstandsmodell berücksichtigt nicht die Variation der Straßenoberflächenzustände;
- Die verwendeten Fahrzeugparameter gelten für schwedische Fahrzeuge.

Im Rahmen der Projekte wie ECRPD, MIRIAM, MIRAVEC, ROSANNE stellte es sich heraus, dass die Straßenparameter, die den Rollwiderstand eindeutig beeinflussen, Ebenheit (IRI) und

Makrotextur (MPD) sind. Es handelt sich jedoch um einen komplexen Zusammenhang, und daher ist es sehr schwierig, ein repräsentatives Modell zu erhalten.

Weiter wurden in MIRIAM [7] noch einige ungelöste Fragen zu diesen Parametern dargestellt:

- Ebenheit: Der IRI basiert auf einem Viertelfahrzeug-Modell, das versucht, ein Maß zu liefern, das mit der durch Straßenunebenheiten verursachten Arbeit im Aufhängungssystem zusammenhängt, wobei die verschiedenen Wellenlängen gemäß dem Verhalten üblicher Autoaufhängungssysteme gewichtet werden. Es gibt jedoch auch einen Effekt der Ungleichmäßigkeit der Reifeneinfederung und es ist nicht klar, ob die IRI-Wellenlängengewichtung zur Beschreibung dieses Effekts geeignet ist. Für diese Frage ist weitere Forschung erforderlich.
- Megatextur: Zwischen den Wellenlängen der Straßenunebenheiten (dargestellt durch IRI) und der Makrotextur (dargestellt durch MPD) gibt es einen Bereich mit der Bezeichnung Megatextur. Dies kann einen sehr erheblichen Einfluss haben.

Eine oft diskutierte Frage in vielen Studien und Projekten ist, welche Auswirkungen die Straßenunebenheiten (Wellenlängen größer als 0,5 m) auf Energieverluste im Fahrzeug hat, die als Teil des Reifen-/Straßenrollwiderstands betrachtet werden sollen. Wie in [7] dargestellt wurde, sind die bekannten Effekte:

- Durchbiegung und damit verbundene Hystereseverluste in den Reifen
- Bewegungen im Fahrzeugfederungssystem und Dämpfungsverluste in den Stoßdämpfern
- Luftwiderstandseffekte durch vertikale und rotierende Bewegungen des Fahrzeugs, durch Auf-und-ab-Bewegungen und wenn es verkippt wird, wenn es den Unebenheiten der beiden Radspuren auf der Straße folgt (dies bezieht sich hauptsächlich auf die gefederte Masse des Fahrzeugs).

Der einzige der oben genannten Effekten, der eindeutig zum Rollwiderstand zwischen Reifen und Straße gehört, ist der erste. Der zweite ist Teil des Fahrzeugrollwiderstands, aber ob der letzte Effekt als Teil des Luftwiderstands oder als Teil des Fahrzeugrollwiderstands zu betrachten ist, ist nicht geklärt. In jedem Fall ist es bei Messungen beinahe unmöglich, zwischen den drei Komponenten zu unterscheiden. Selbst bei Verwendung der Anhänger methode ist es unmöglich, zwischen dem Effekt der Reifenhysterese und den Verlusten im Stoßdämpfer des Anhängers zu unterscheiden.

Während der Messungen kommt es ständig zu Änderungen, zumindest in Bezug auf das Fahrzeuggewicht. Die Kraftstoffmenge im Tank ändert sich beim Fahren des Fahrzeugs und dieser Effekt sollte berücksichtigt werden.

Andere Parameter, die nicht so einfach zu steuern und einzustellen sind, sind das Bremssystem und die Reifencharakteristiken. Zu den Reifencharakteristiken gehören Reifenverschleiß, Reifentemperatur und Reifenfülldruck. Bei der Messung des Rollwiderstands ist die Auswahl und Einstellung des Reifenfülldrucks von großer Bedeutung. Steigender Reifendruck verringert den Rollwiderstand. Der Reifendruck ist eine Funktion von:

- Atmosphärischem Luftdruck: Durch Erhöhen des Luftdrucks wird der Reifenüberdruck verringert.
- Umgebungslufttemperatur: Durch Erhöhen der Lufttemperatur wird der Reifendruck erhöht
- Rollwiderstand: Bei einer Erhöhung des Rollwiderstands wird die Reifentemperatur und damit auch den Reifendruck erhöht.

Die Reifentemperatur beeinflusst nicht nur den Reifendruck, sondern auch direkt den Rollwiderstand.

Im MIRIAM sowie in anderen Projekten wurde festgestellt, dass ein praktikablerer Weg, den Rollwiderstand zu Zwecken des Straßenmanagements zu steuern, als ihn direkt zu messen, darin besteht, ihn anhand von Straßenbelagsparametern zu prognostizieren, die für den größten Teil des Straßennetzes bereits erfasst wurden, wie z. B. Textur, Unebenheiten, Steifigkeit und Straßentopografie.

Entscheidend ist, wie man ein allgemeines Modell entwickeln kann, das alle wichtigen Parameter berücksichtigt, ohne dass mit einer großen Anzahl von Reifen auf einer großen Anzahl von Straßenflächen gemessen werden muss.

2.3.2 Sensitivitätsanalyse

Obwohl sich die verfügbaren Ergebnisse für Rollwiderstand in den letzten Jahren verbessert haben, mangelt es immer noch an Daten und Ergebnissen, um ein repräsentatives Modell für die Schätzung von Rollwiderstandskoeffizient zu entwickeln. Darüber hinaus fehlt es immer noch eine standardisierte Methode für die Rollwiderstandsmessung In-situ.

Ein Hauptproblem besteht darin, ein Rollwiderstandsmodell zu formulieren, das alle Variablen enthält, die für den Rollwiderstand von mehr als untergeordneter Bedeutung sind, und ein solches Modell zu kalibrieren und zu validieren. Diese Problematik liegt in vielen Studien und Forschungsprojekten vor.

Wie bereits dargelegt wurde, sind die wichtigsten Parameter, die den Rollwiderstand eindeutig beeinflussen, Ebenheit (IRI), Makrotextur (MPD) und Reifendruck. Als Schlussfolgerung von vielen Projekten (ECRPD, MIRIAM, MIRAVEC, ROSANNE) stellte es sich heraus, dass es sich

jedoch um einen komplexen Zusammenhang handelt, und daher ist es sehr schwierig, ein repräsentatives Modell zu erhalten. Im Folgenden wird gezeigt, wie stark der Einfluss der einzelnen Parameter auf den Rollwiderstand ist.

Die Grundlage für ein mathematisches Modell für den Rollwiderstand ist Newtons zweites Gesetz. Die auf das Fahrzeug wirkende Gesamtkraft ist die Summe aus Schwerkraft und Widerstandskraft/Antriebskraft, wobei die Widerstandskraft aus den folgenden Faktoren besteht: Rollwiderstand, Luftwiderstand, Seitenkraftwiderstand und Übertragungswiderstand/Antriebsstrang (einschließlich Lagerverlusten) [5].

$$F_x = F_b + F_{air} + F_{acc} + F_{gr} + F_{side} + F_r \quad (6)$$

F_x : Widerstandskraft (Gesamtkraft) [N]

F_b : Radlagerverluste [N]

F_{air} : Luftwiderstand [N]

F_{acc} : Beschleunigungswiderstand [N]

F_{gr} : Steigungswiderstand [N]

F_{side} : Schlupfverluste [N]

F_r : Rollwiderstand [N]

Für die Analyse wurden Daten und Modelle aus dem Forschungsprojekt MIRAVEC verwendet. Das folgende Grundmodell beschreibt den Rollwiderstand:

$$F_r = C_r \times m \times 9,81 \quad (7)$$

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um C_r als Funktion anderer Variablen auszudrücken. Folgende Formel wird für die Sensitivitätsanalyse verwendet:

$$C_r = C_{r0} + IRI \times v \times C_{r1} + MPD \times C_{r2} \quad (8)$$

$$C_{r0} = C_{r00} + C_{rTemp} \times (5 - T) \quad (9)$$

wobei

IRI : Ebenheit (m/km)

MPD : Makrotextur (mm)

m : Fahrzeugmasse (kg)

v : Fahrzeuggeschwindigkeit (m/s)

C_{r0} , C_{r1} , C_{r2} , C_{r00} , C_{rTemp} Rollwiderstandsparameter

T Temperatur

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse wird die Formel für Rollwiderstand (10) verwendet. Diese wird als Funktion der Ebenheit (IRI), der Makrotextur (MPD), Geschwindigkeit (v) und

Temperatur (T) berechnet. Die unbekannten Koeffizienten Cr_{00} , Cr_{Temp} , Cr_1 , und Cr_2 wurden durch Regression bestimmt.

$$F_r = m \times g \times ((Cr_{00} + Cr_{Temp} \times (5-T) + Cr_1 \times v \times IRI + Cr_2 \times MPD)) \quad (10)$$

Um das Modell zu betrachten und seine Eigenschaften zu untersuchen, haben wir die vier Variablen (IRI, MPD, Temperatur und Geschwindigkeit) in verschiedenen Niveaus zum Vergleich im Modell geändert. Die Bereiche wurden so definiert, dass die Werte nahe an der tatsächlichen Situation im Straßennetz liegen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Typische minimale und maximale Werte der Variablen (Sensibilitätsanalyse)

Variablen			Typischer min. Wert	Typischer max. Wert
Ebenheit	IRI	[m/km]	1,0	3,0
Makrotextur	MPD	[mm]	0,6	1,2
Geschwindigkeit	V	[m/s]	80	130
Temperatur	T	[°C]	5	35

Da das Modell eine lineare Funktion ist, hat es die Eigenschaft, dass der Mittelwert der Funktion einer Variablen X gleich der Funktion des Mittelwerts von X ist und dass der Effekt einer Änderung von X unabhängig vom Niveau von X gleich ist. Daher kann eine Empfindlichkeit als Steigung ausgedrückt werden.

Abbildung 34 zeigt, wie eine Erhöhung der Variablen zu einer relativen Änderung (%) des Rollwiderstandes führen.

Wenn beispielsweise die Ebenheit (IRI) durchschnittlich von 1,0 bis auf 3,0 erhöht wird, führt dies zu einer relativen Änderung des Rollwiderstands von 25%. Eine ähnliche Steigung ist auch bei der Makrotextur zu beobachten: eine Verdoppelung von 0,6 bis 1,2 mm bei der MPD erhöht den Rollwiderstand mit 21%. Wie zu erwarten ist, zeigt die Grafik bei Zunahme der Geschwindigkeit (von 80 km/h auf 120 km/h) keine signifikante Änderung bei dem Rollwiderstand (6%). Es muss berücksichtigt werden, dass die Fahrgeschwindigkeit durch die die Längsebenheit beeinflusst wird, d.h. je unebener die Straße ist, desto niedriger ist üblicherweise die gefahrene Geschwindigkeit, was den Effekt eines erhöhten Rollwiderstands überwiegt. Im unteren Teil der graphischen Darstellung wurden die zunehmenden Werte der Temperaturgrößen dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, erhöht sich der Rollwiderstand beim Übergang der Temperatur vom 5 °C auf 35 °C drastisch um 46%.

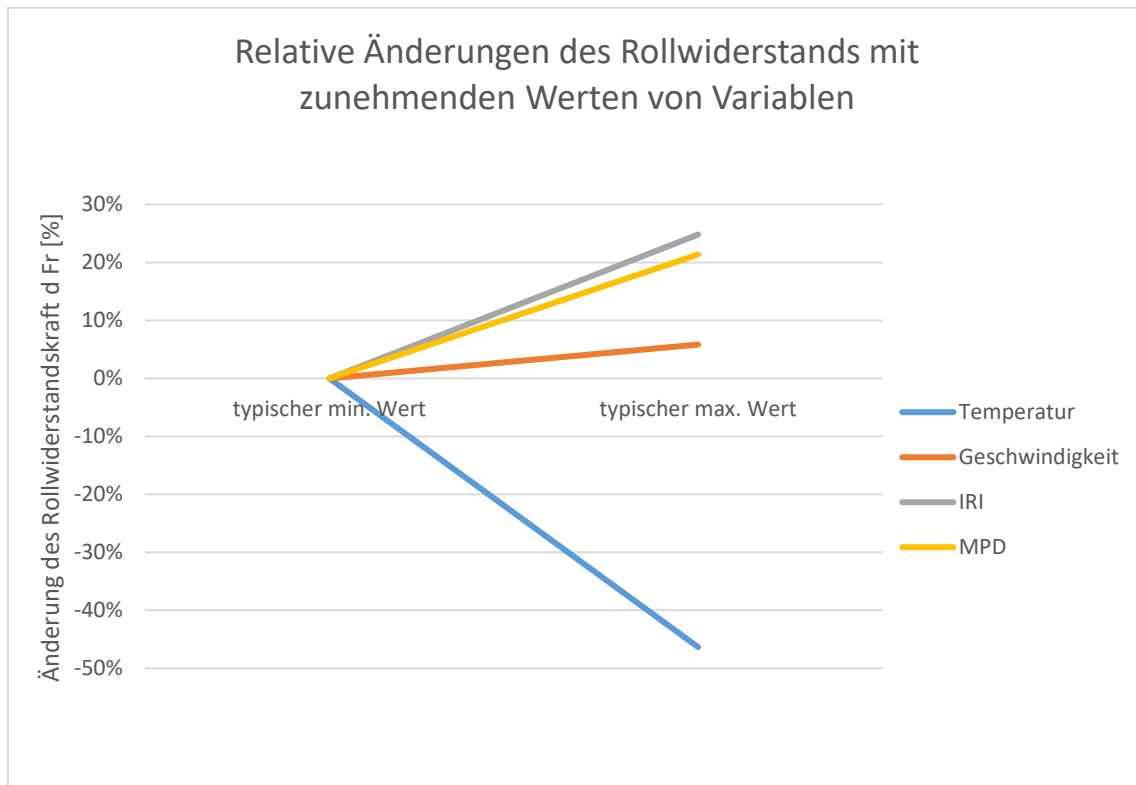


Abbildung 34: Relative Änderung des Rollwiderstands mit zunehmenden Werten von Variablen.

Die Analyse zeigt also den im Vergleich zu den Straßenzustandsparametern weit überwiegen- den Einfluss der Temperatur.

3 ANALYSE DER DECKENBAUWEISEN

Die Analyse der Deckenbauweisen erfolgte auf Grundlage der Oberbaudatenbank mit einem Stand der eingepflegten Baumaßnahmen bis ins Jahr 2017. Enthalten sind nur Abschnitte, die zu diesem Zeitpunkt verbaut waren. Die Untersuchung beschränkt sich auf die Deckschichten des rechten Fahrstreifens.

In der nachfolgenden Abbildung 35 ist die Verteilung der Deckentypen sowie das Deckschichtalter im Jahr 2017 dargestellt. Die mengenmäßig dominierende Gruppe sind die Splittmastix-Asphalte SMA S1, SMA S2 und SMA S3. Als mengenmäßig zweitgereichte Gruppe ist Beton anzusehen, wobei hier keine Unterteilung nach Oberflächenausführung enthalten ist. De facto handelt es sich aber zum weit überwiegenden Anteil um Waschbetondecken und Reste von Besenstrich-Decken.

Zu geringen Anteilen sind Asphaltbeton AC Deck A2 sowie AC Deck A3 verbaut. Alle anderen Deckschichtarten sind nur rudimentär vorhanden.

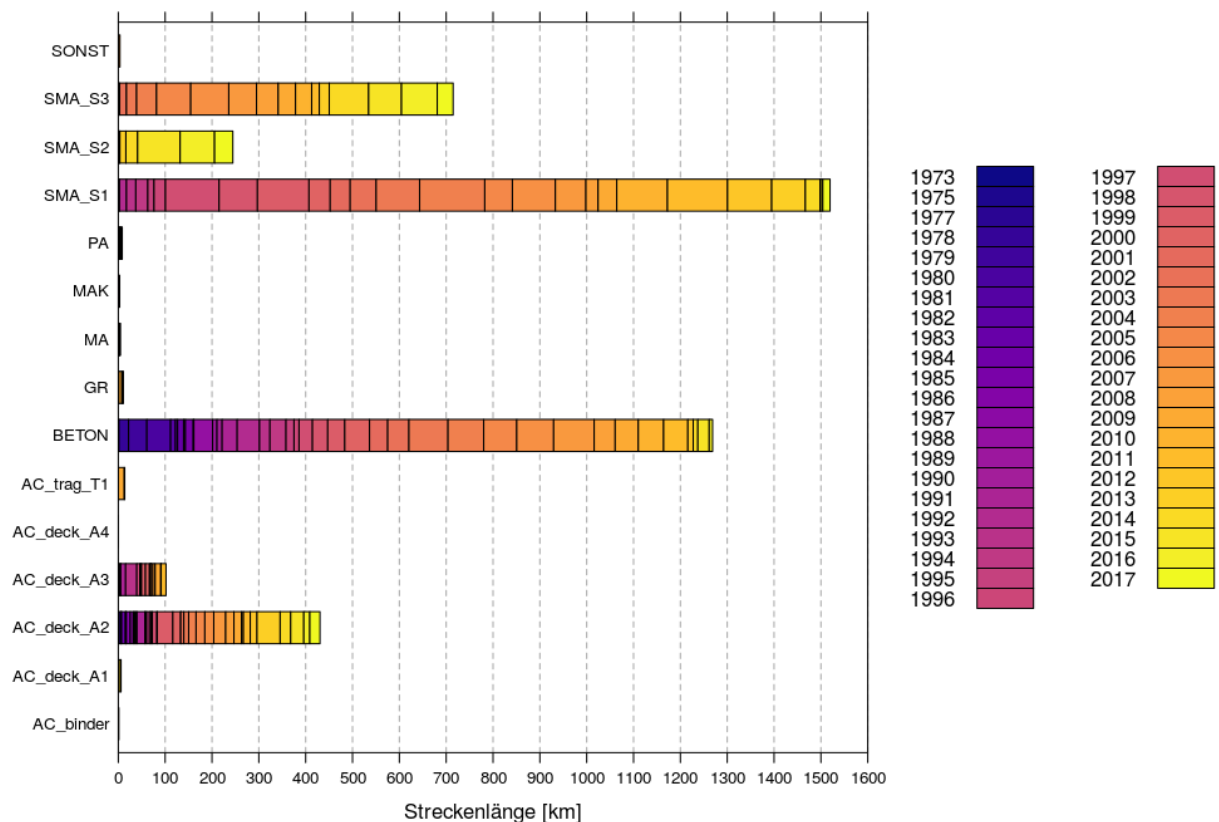


Abbildung 35: Verteilung der Deckschichttypen im ASFINAG-Netz, gruppiert nach Einbaujahren. Stand: 2017

Bei Betrachtung der Deckschichtalter fällt auf, dass die ältesten Decken Betondecken sind. Das korrespondiert auch mit der Erwartungshaltung des im Vergleich zu Asphalt längeren Dimensi-

onierungszeitraums von Betondecken. Bei den SMA fällt die relativ gleichmäßige Altersverteilung des SMA S1 auf, während SMA S3 in die mittleren 2000er-Jahren zurückreicht, SMA S2 in die mittleren 2010er-Jahre und diese beiden damit die Deckschichttypen mit den jüngsten Durchschnittsaltern darstellen. Dies zeigt auch Abbildung 36, welche die Verteilung in den Einbaujahren darstellt. Hierbei ist zu beachten, dass nur die im Jahr 2017 „noch überlebenden“ Abschnitte dargestellt sind, Deckschichten, die z.B. im Jahr 2016 ausgetauscht und durch eine andere Bauweise ersetzt wurden, jedoch nicht.

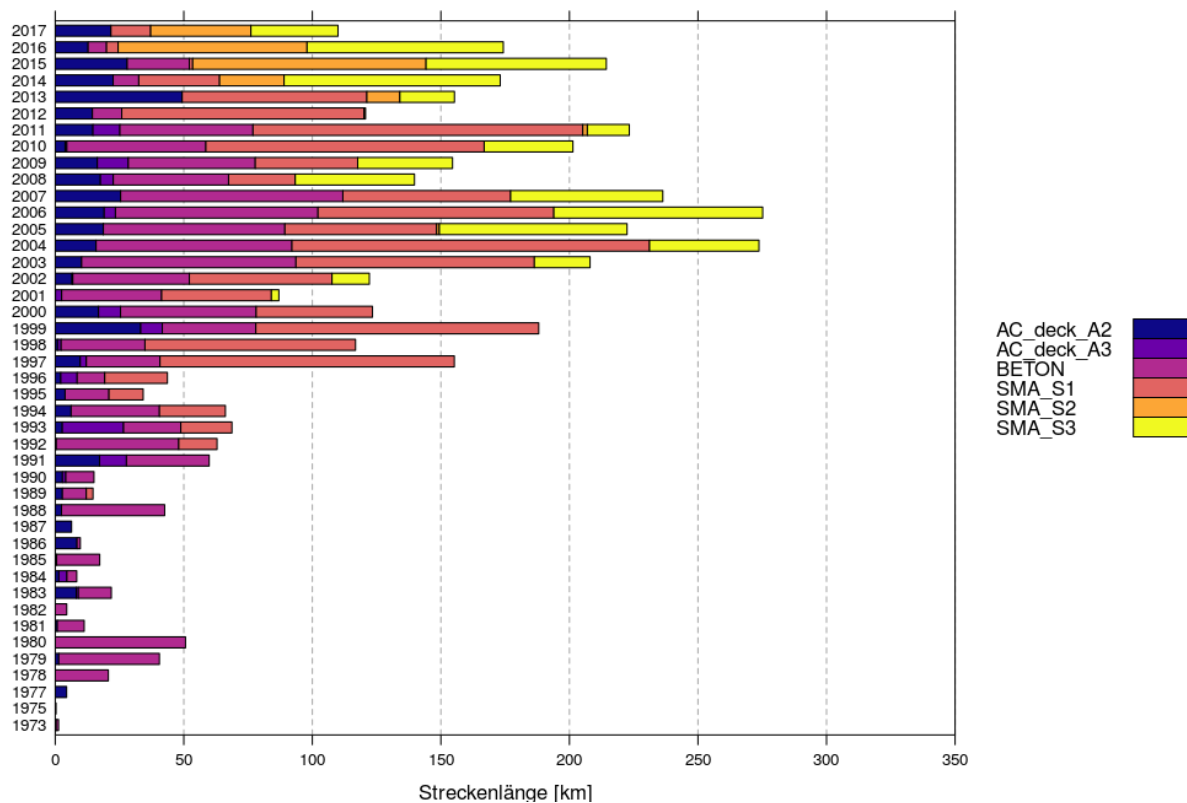


Abbildung 36: Kumulierte Mengen der Deckschichttypen nach Einbaujahre, in Betrieb 2017

Für eine mögliche bautechnische Optimierung des Rollwiderstandes von Fahrbahnen bieten sich die Decken mit Splittmastixasphalt an. Hier liegen aus Dänemark bereits Erkenntnisse zur Mischgutoptimierung hin zu geringeren Makrotexturtiefen vor. Dazu kommt, dass SMA-Decken auch einen großen Anteil an der Gesamtnetz-Länge haben, was einen größeren Hebel ermöglicht und im Vergleich zu Betondecken im Lebenszyklus auch eine Erneuerung der Deckschicht vorgesehen ist. Damit ließen sich im Rahmen der routinemäßigen Erneuerung kurz- bis mittelfristig Verbesserungen im Rollwiderstand erzielen, ohne auf möglicherweise kostenintensive Sonderbauweisen zurückgreifen zu müssen.

Positive Effekte aufgrund optimierter Längsebenheit, die sich mit optimierter Einbautechnik erzielen lassen, konnten bisher in ihrer Wirksamkeit nicht quantifiziert werden. Eine positive Wirkung auf den Energieverlust im Feder-Dämpfer-System der Fahrzeuge ist durch optimierte Längsebenheit aber anzunehmen.

Hinsichtlich Betondecken zeigt die Literatur keine prinzipiell besseren Eigenschaften hinsichtlich Rollwiderstand im Vergleich zu Asphaltdecken. Der oft vermutete Vorteil der höheren Steifigkeit konnte bislang messtechnisch nicht verifiziert werden. Das vorhin zur Längsebenheit gesagte ist auch für Betondecken zutreffend. Somit wäre ein Ansatzpunkt die Kontrolle der Längsebenheit bzw. der Einsatz von Bewertungsverfahren bei Abnahme und Gewährleistung, die einen direkteren Konnex zur Dynamik von Kraftfahrzeugen aufweisen als der Planograph.

4 MESSMETHODE ROLLWIDERSTANDSMESSUNG

4.1 Versuchsfahrzeug

Zum Aufbau der Messeinrichtung für die Rollwiderstandsmessung wurde der RoadSTAR herangezogen. Die Grundlage dafür liefern die Erkenntnisse aus den bisher entwickelten und gebauten Messeinrichtungen (vgl. Kapitel 2.1). Für die Auswahl des RoadSTARs sprachen die folgenden Gründe:

- bereits vorhandenes Messfahrzeug
- Messeinrichtung zur Erfassung der Griffigkeit mit regelbarer Belastungseinrichtung zur Aufbringung und Erfassung der Vertikallast
- Software zur Steuerung und Erfassung von Messdaten bereits vorhanden und in-house erweiter- und adaptierbar



Abbildung 37: Hochleistungslabor RoadSTAR (AIT)

4.2 Messtechnik

4.2.1 Messsensorik

Zur Messung des Rollwiderstandes ist die Erfassung der im Zustand des frei rollenden Rades auftretenden horizontalen Kräfte in der Kontaktfläche Reifen-Fahrbahn sowie der vertikal wirkenden Aufstandskräfte in der Kontaktfläche notwendig. Der Rollwiderstandskoeffizient RRC ergibt sich dann – wie der Griffigkeitsbeiwert μ – als Quotient von Horizontalkraft und Vertikalkraft. Der Unterschied zwischen Griffigkeitsmessung und Rollwiderstandsmessung liegt einzig im gebremsten bzw. ungebremsten bzw. frei rollenden Rad. Weiters wird die Griffigkeitsmessung mit aufgebrachttem Wasserfilm durchgeführt, während für die Rollwiderstandsmessung die

Fahrbahn trocken sein muss. Für die Rollwiderstandsmessungen sind jedoch einige Randbedingungen zu beachten, die die Anforderungen an die Messtechnik deutlich höher schrauben, als es bei der Griffigkeitsmessung der Fall ist:

- die (dynamisch) zu messenden Horizontalkräfte des frei rollenden Reifens sind sehr klein, was eine sehr präzise und hochauflösende Messung erfordert.
- die Temperatur des Messreifens bzw. ihre zeitliche Veränderung erlangt im Vergleich zur Griffigkeitsmessung eine höhere Bedeutung. Dies liegt einerseits in den geringen Horizontalkräften begründet, auf die sich nur geringfügig ändernde Reifeneigenschaften bereits deutliche Einflüsse zeigen, andererseits fällt im Vergleich zur Griffigkeitsmessung das Temperaturunterschiede ausgleichende Zwischenmedium Wasser weg, womit sich verändernde Reifentemperaturen stärkeren Einfluss auf das Messergebnis haben.
- Sich verändernde Reifentemperaturen wirken sich auch auf den Reifeninnendruck aus, der sich wiederum auf die Reifenaufstandsfläche auswirkt. Eine sich verändernde Reifenaufstandsfläche hat wiederum Auswirkungen auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn und damit auf den Rollwiderstand.
- Bereits geringe Änderungen der Geometrie der Messeinrichtung, wie sie sich durch Federung/Dämpfung des Fahrzeuges zwangsläufig ergeben, führen zu Änderungen der Resultierenden der Kräfte in der Radaufstandsfläche. So kann z.B. das Einsteigen des Fahrers in die Fahrerkabine des Mess-LKWs deutlich in sich ändernden Kräften an der Messeinrichtung nachvollzogen werden.

Um die angesprochenen Problemstellungen angemessen zu berücksichtigen, wurde das Mess-Setup des RoadSTAR vollständig überarbeitet.

Für die Messung der Horizontal- und Vertikalkräfte kam eine spezielle Messfelge der Firma „A and D“ zum Einsatz. Die Messfelge liefert die notwendige Auflösung. Weiters können mit der Kraftmessfelge Kräfte und Momente in allen drei Achsen gemessen werden. Die Spezifikationen der Messfelge sind in Tabelle 11 angeführt.

Tabelle 11: Spezifikation der Kraftmessfelge, die für die Rollwiderstandsmessung verwendet wird.

Item	Specification	Note
Method	Shared force detection method	
Coordinate direction	X: Driving/braking Y: Axle Z: Gravity	
Fx	±24 kN	
Fy	±15 kN	
Fz	±24 kN	
Mx	±4.5 kNm	
My	±4.0 kNm	
Mz	±4.5 kNm	
Acceptable rim size	14-17 inches	In the case of other customer needs, please contact us.
Acceptable hub size	4H PCD100 5H PCD100/114.3	In the case of other customer needs, please contact us.
Acceptable offset	–	Depends on customer's specification request.
Total error	±0.1%FS	Including non-linearity, hysteresis and repeatability
Modulation error	±0.5%FS	
Sensitivity	Force: 1/4000 FS Moment: 1/2500 FS	
Angular resolution	1024/360 degrees	
Speed	2000 RPM	
Temperature guarantee range	-20 to +80°C	Sensor
Operating temperature range	-40 to +100°C	Sensor
Zero temperature effect	0.005%FS/°C	
Span temperature effect	0.005%/°C	
Wet/dust condition	Equivalent to IP65	
Weight	3.6 kg (Sensor + slip ring) 22.9 kg (Sensor + slip ring + hub adapter + bolt/nut + 16x6,5 inch rim + 215/60R16 tire)	

Für die Erfassung der Messgeometrie wurde die Messfelge um ein sog. Laser-Ground-System erweitert (vgl. Abbildung 38). Dies besteht aus drei Laserdistanzsensoren, die eine Fläche unter dem Messreifen aufspannen und damit die drei Winkel „Camber“, „Pitch“ und „Slipangle“ bestimmen, die für die Korrektur der Lage des Koordinatensystems, in dem die Vertikal-, Horizontal- und Querkraft angegeben werden, notwendig sind.

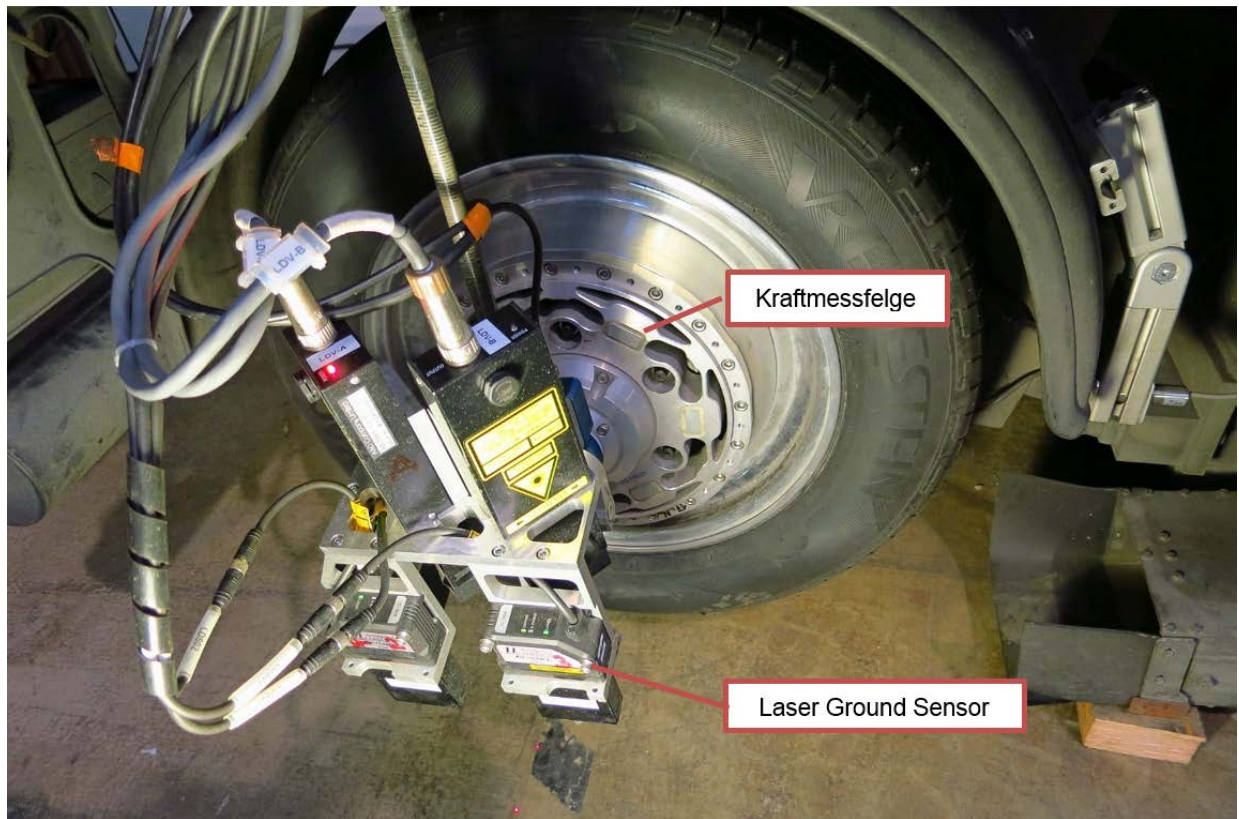


Abbildung 38: Messeinrichtung mit Kraftmessfelge und Laser Ground Sensor

Für die Temperaturmessung des Reifens wurden das Mess-Setup um mehrere Sensoren erweitert:

Zur Erfassung der Temperatur der Reifenoberfläche wurde ein Infrarot-Tempersensor Raytek CM verbaut (vgl. Abbildung 39), der berührungslos die Temperatur in der Mitte der Lauffläche misst. Die technischen Daten sind in Tabelle 12 angeführt.

Zur Erfassung der Temperatur im Reifeninneren sowie Reifeninnendruck wurde das Sensorsystem SA-TMS_LDL_B-000 der Firma 2D Technologies (vgl. Abbildung 40, Spezifikation vgl. Tabelle 13) verbaut. Die Übertragung der Messwerte erfolgt berührungslos im ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical Band) mit 433 MHz.

Tabelle 12: Technische Daten des Sensors zur Messung der Reifenoberflächentemperatur.

Messtechnische Parameter	
Temperaturbereich	-20°C ...500°C
Optische Auflösung	13:1 @ 150 mm (90% Energie)
Spektralbereich	8 ... 14µm
Genauigkeit (Digital und Spannungsausgang)	± 1,50% vom Messwert oder ± 2°C, der größere Wert gilt
Genauigkeit (Thermoelement)	± 1,50% vom Messwert oder ± 4°C, der größere Wert gilt

Reproduzierbarkeit (Digital- und Spannungsausgang)	$\pm 0,50\%$ vom Messwert oder $\pm 1^\circ\text{C}$, der größere Wert gilt
Reproduzierbarkeit (Thermoelement)	$\pm 0,50\%$ vom Messwert oder $\pm 1^\circ\text{C}$, der größere Wert gilt
Ansprechzeit (95% Energie)	150 ms
Temperaturaufösung (Digitalausgang)	$0,1^\circ\text{C}$
Emissionsgrad	0,1 ... 1,1 (einstellbar)
Transmissionsgrad	0,1 ... 1 (einstellbar)
Elektrische Parameter	
Digitale Schnittstelle	RS232
Analogsausgang	0 bis 5 V, Thermoelement J oder K
Alarmausgang	Transistor, 24 VDC @ 20 mA
Betriebsspannung	24 VDC $\pm 20\%$ @ 20 mA
Andere Parameter	
Schutzklasse	IP 65 (NEMA-4)
Umgebungstemperatur	-10°C bis 70°C
Lagertemperatur	-20°C bis 85°C
Abmessungen/Gewicht Länge:	94 mm; Durchmesser: 19 mm / <200 g



Abbildung 39: Infrarot-Thermometer zur Erfassung der Reifen-Oberflächentemperatur

Tabelle 13: Spezifikation Reifeninnendruck und -temperatur-Sensor

Mechanical characteristics	
Weight	45 g
Electrical characteristics	
Pressure input range	0 - 3.5 bar
Absolute ambient pressure	Yes
Resolution	13,7 mbar/bit
Measurement error	
@0 to +50°C	± 70 mbar
@-20 to +125°C.	± 175 mbar
Temperature input range	-20 to 125 °C
Resolution	1 °C/bit
Measurement error	
@-20 to +70°C	± 3 °C
@-20 to +125°C	± 5 °C
RF transmission	
Emission RF	FSK Manchester
Nominal RF frequency	433,92 MHz
Frequency range	nominal ± 100ppm
Baudrate (RF transmission)	11,5 kbits/s
tolerance	±100 ppm
Durability	
Operating hours (permanent transmission)	>2160 h
Environmental	
Operating temperature range	-40 to 125 °C
Operation acceleration range	0-2000 G
Max. speed (centrifugal stress)	<= 400 km/h

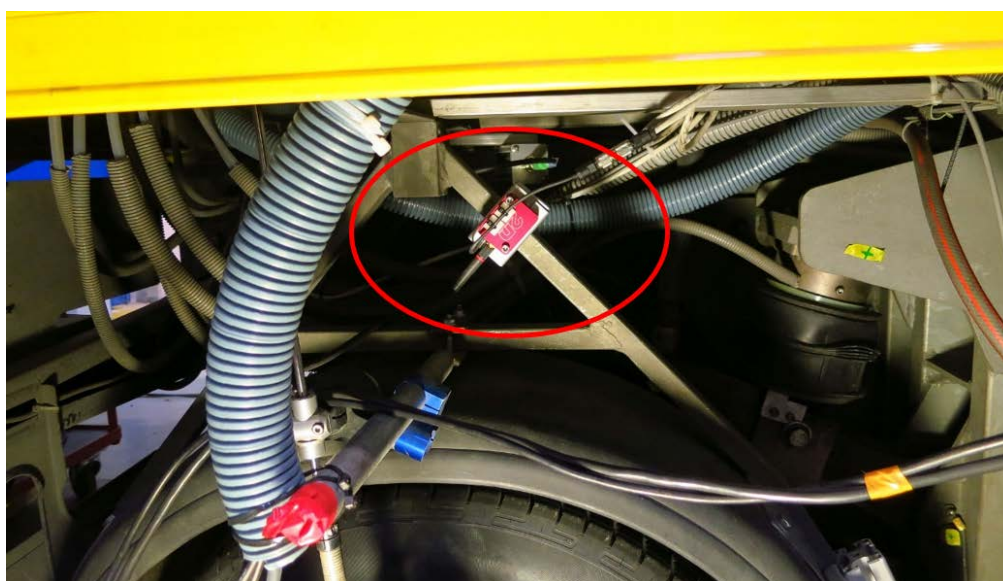


Abbildung 40: Empfängerunit für Sensorik Reifeninnendruck und -temperatur.

4.2.2 Datenübertragung

Die Kraftmessfelge sowie das Laser Ground System wandeln die analogen Mess-Signale bereits im Sensor in einen digitalen Datenstrom. Der weitere Signalweg führt zu jeweils einem speziellen Messrechner, mit dem die Konfiguration der Sensoren erfolgt. Zusätzlich existiert ein Logging-Rechner (vgl. Abbildung 41), auf dem die Daten im Bedarfsfall auf MicroSD-Karte aufgezeichnet werden. Auf den beiden Messrechnern erfolgt die Umsetzung der Messwert in das CAN-Protokoll (Controller Area Network).

Der Bluetooth-Empfänger setzt die empfangenen Daten zu Reifeninnendruck und -temperatur ebenfalls auf CAN um.



Abbildung 41: Aufbau der Messrechner und Logging-Rechner für Kraftmessfelge und Laser Ground System auf schwenkbarem Panel im Schaltschrank am Fahrzeugheck.

Der Infrarot-Temperatursensor für die Laufflächentemperatur liefert ein analoges Ausgangssignal, das über ein zusätzliches Kabel an die Messkarte der bestehenden Griffigkeitsmesseinrichtung angeschlossen wurde. Hier erfolgt die Digitalisierung der Messgröße.

Im Rahmen des Projektes wurde das bestehende Setup um zwei Verkabelung für die beiden CAN-Busse erweitert. Mittels zweier CAN-Konverter „PEAK PCAN-USB FD“ am Mess-PC konnten die Messgrößen der Kraftmessfelge sowie Laser Ground System aufgezeichnet werden. Zur Synchronisierung und Wegzuordnung wurde auf der Zählerkarte des bestehenden Griffigkeits-Messsystem ein weiterer Kanal aktiviert und ein Wegsignal mit einem Intervall von 1 m generiert. Dieses Signal wurde auf den Messrechner der Kraftmessfelge zurückgeführt und über dessen digitalen Eingang eingespeist. Somit konnte auf den grundsätzlich zeitbasiert arbeitenden Sensoren eine Zuordnung zum zurückgelegten Weg und den aus der bereits bestehenden Messeinrichtung kommenden Messgrößen hergestellt werden.

4.2.3 Datenaufzeichnung

Für die Aufzeichnung der Daten aus den zusätzlichen Sensoren musste die bestehende Mess-Software RMS erweitert und angepasst werden.

So wurde die Mess-Software um Module zur Decodierung, Aufzeichnung und Anzeige von CAN-Datenströmen erweitert. Der zusätzliche Temperatursensor wurde in die Messdatenaufzeichnung integriert. Das Anzeigefenster wurde sowohl für die Kontrolle der Rohdaten (sog. „Wartungsmodus“) als auch zur Überwachung der Messwerte während der Messung erweitert.

Die Datenspeicherung wurde für die zusätzlichen Mess-Systeme erweitert. Für den reibungslosen Datenaustausch unter den Projektpartnern wurde ein Plain-Text-Format spezifiziert, in dem die Messdaten aus den unterschiedlichen Sensoren in einem spezifizierbaren Intervall synchronisiert abgelegt werden. Hier wurde zusätzlich die Auswertesoftware erweitert, um die über Kilometermarker während der Messung eingegebene Kilometrierung einzufügen. Weiters wurde die Option entwickelt, geographische Koordinaten aus dem Koppelnavigationssystem den einzelnen Messwerten zuzuordnen. Hierzu musste die Auswertesoftware um die Synchronisierung und Resampling von unterschiedlichen Datenströmen erweitert werden.

4.2.4 Montage der Messeinrichtung

Für die Montage der Kraftmessfelge am RoadSTAR 1 wurde ein Adapter konstruiert und gefertigt, der die Montage des Wheelforce-Sensors auf der Radaufnahme des RoadSTAR 1 erlaubt. Der Adapter führt die 5-Loch-Befestigung des Wheelforce-Sensors auf die 4-Loch-Radaufnahme über, kompensiert die unterschiedlichen Lochkreise und stellt die Einhaltung der Einspresstiefe der Felge und damit die Einhaltung der in Querrichtung zentrischen Belastung sicher.

Für die vertikale Führungsstange der Kraftmessfelge wurde eine Führung konstruiert und montiert, die den Verstellweg, der sich durch Anheben und Absenken der Messeinrichtung ergibt, sicherstellt.

Für das zusätzliche Infrarot-Thermometer für die Messung der Temperatur der Radlauffläche wurde eine Halterung an der Messradschwinge konstruiert.

4.3 Kalibrierung der Messeinrichtung

Aufgrund der geringen Kräfte, die während der Rollwiderstandsmessung korrekt gemessen werden sollen, kommt der Kalibrierung der Messeinrichtung besondere Bedeutung zu. Es wurde eine Kalibrieroutine entwickelt und in der Mess-Software implementiert, die die Lage und Orientierung des Koordinatensystems in der Kraftmessfelge bestimmen und die Korrekturwinkel, die sich aufgrund von einbaubedingten Rest-Verdrehungen ergeben, erfasst und der Auswertung zugänglich macht.

Folgende Routine wird bei Inbetriebnahme abgearbeitet:

1. RoadSTAR am Kalibrierplatz in Messstellung bringen.
2. Messfelge anheben.
3. Initialisierung des Koordinatensystems der Kraftmessfelge. Dieser Schritt ist immer dann notwendig, wenn die Felge getauscht wird oder sich das Gesamtgewicht der Reifen-Felgen-Kombination signifikant ändert (z.B. durch Reifenabrieb). Dies geschieht durch 4 aufeinanderfolgende Vierteldrehungen der Kraftmessfelge im angehobenen Zustand: 0°, 90°, 180°, 270°, 360°. Hierbei werden bei jeder Felgenstellung die aktuell wirkenden Kräfte von der Systemkalibrieroutine übernommen und ausgewertet. Nach Abschluss der Drehung zeigt die Z-Komponente des Koordinatensystems zum Erdmittelpunkt.
4. Starten der Kalibrieroutine in der RoadSTAR-Aufnahmesoftware. Hier werden im ersten Schritt die Winkel des Laser Ground Systems über 10 Sekunden gemittelt und übernommen.
5. Messfelge absenken.
6. Im nächsten Schritt werden die Winkel des Laser Ground System im abgesenkten Zustand 10 Sekunden gemittelt und übernommen.

Durch das Absenken des Messrades verdreht sich der Kraftmessfelge geringfügig, wodurch fälschlicherweise eine Kraftkomponente in der x-Richtung (Bremskraft) angezeigt wird. Diese Verdrehung wird über die übernommenen Winkel des Laser Ground System (Messfelge angehoben, Messfelge abgesenkt) ermittelt und anschließend mittels rechnerischer Rückdrehung um die y-Achse (verläuft parallel durch das Zentrum der Radnabe) kompensiert.

Sämtliche ermittelten Werte werden in der Messsoftware gespeichert und sind bis zur nächsten Kalibrierung gültig.

4.4 Modell zur Temperaturkorrektur des Messreifens

4.4.1 Messungen für das Korrekturmodell des Messreifens

Für die Eingangsdaten zum Entwurf des Temperaturkorrekturmodells für den PIARC ribbed-Reifen sollten Messungen über den gesamten Arbeitsbereich der Reifentemperatur durchgeführt werden. Um auch geringe Temperatur abzudecken, wurde der Messreifen im Reifenkühlschrank des AIT auf 2°C über Nacht gekühlt. Am Vormittag des nächsten Tages wurden im Beisein der Kollegen der TU Graz, Institut für Fahrzeugtechnik, die Messungen mit sich erwärmendem Reifen durchgeführt. Nachdem die Betriebstemperatur erreicht war, konnte durch zeitweises Einkuppeln und Betrieb des Reifens bei 18 % Schlupf ohne Bewässerung (entsprechend einer dauernden Vollbremsung) höhere Temperaturen erzielt werden. Während der Schlupf-Phasen wurden auf der Lauffläche des Reifens Temperaturen bis annähernd 100°C gemessen. Somit konnten auch Daten im höheren Temperaturbereich gewonnen werden.

Die Messungen wurden auf einem ca. 4 km langen Abschnitt der S1 bei Wien im Bereich km 36 – km 40 zwischen den Anschlussstellen *Angerner Straße* (Exit 7) sowie *Seyring* (Exit 40) durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen homogenen Abschnitt aus Waschbeton, beide Richtungsfahrbahnen wurden im selben Jahr hergestellt.

Nachdem sich bei den ersten Messungen, bedingt durch die trotz Ende Oktober hohen Lufttemperaturen, eine rasche Erwärmung des Reifens gezeigt hatte, wurden Messungen am 14.11.2019 bei Außentemperaturen unter 10°C ergänzt.

4.4.2 Weg- und Fahrtrichtungsabhängigkeit

Im ersten Schritt wurden der Einfluss der Fahrrichtung sowie der Wegstrecke auf den Rollwiderstand untersucht um diese Kriterien als Einflussfaktoren auf den Rollwiderstand ausschließen zu können. Abbildung 42 zeigt den Rollwiderstand f_R abhängig von der Wegstrecke x zweier Fahrten mit unterschiedlicher Temperatur des Füllmediums. Es kann gezeigt werden, dass die wegstreckenbedingte Charakteristik des Rollwiderstands (zum Beispiel im Bereich zwischen 2500 und 3500 m) zuverlässig für mehrere Fahrten reproduziert werden kann. Auch fahrbahnbedingte Ausreißer (Bereich 2000 m) können zuverlässig und deckungsgleich abgebildet werden.

Diese Ergebnisse konnten für beide Fahrtrichtungen reproduziert und somit sowohl die Wegstrecke als auch die Fahrtrichtung als Störgrößen für folgende Untersuchungen ausgeschlossen werden.

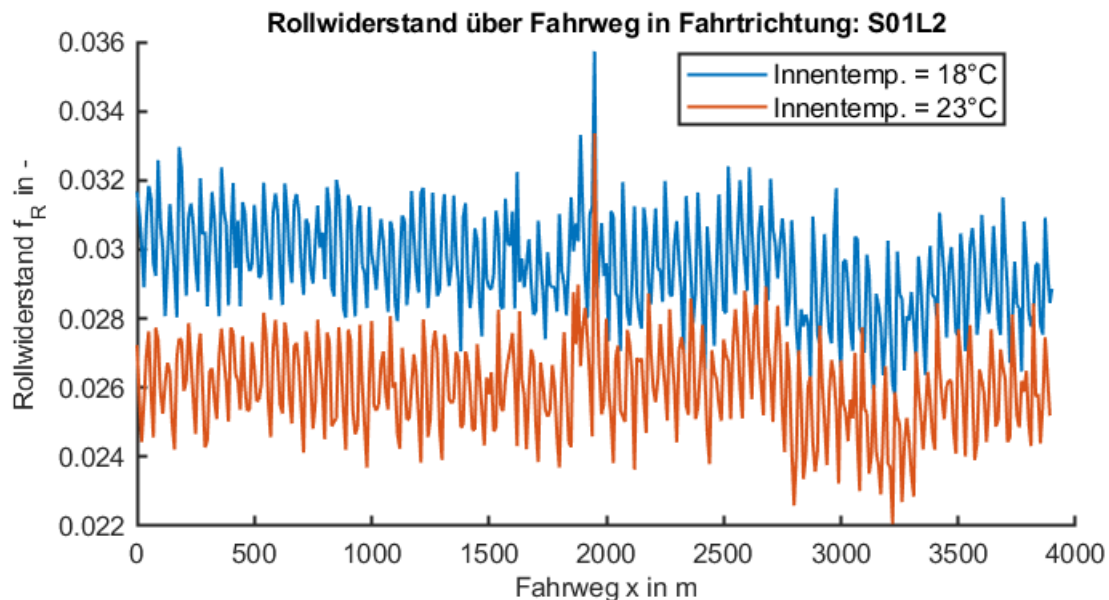


Abbildung 42: Rollwiderstand f_R über Fahrweg x von zwei Messfahrten mit unterschiedlicher Innentemperatur. Schnellstraße 01; Fahrtrichtung L = stadteinwärts; zweiter Messtag

4.4.3 Druck und Temperatur - Allgemein

Untersuchungen von Ejsmont et al. [17], [18] zeigen starke Abhängigkeiten des Rollwiderstandes von Temperatur und Innendruck des Reifens. Bei den durchgeführten Widerstandsmessungen sowie bei jedem pneumatischen Reifen im Straßenverkehr können diese beiden Mechanismen jedoch nicht entkoppelt betrachtet werden. Durch die viskoelastischen Eigenschaften von Gummi und den dadurch einhergehenden hystereseebedingten Verlusten wird während der Fahrt kontinuierlich durch Deformationsarbeit Wärme erzeugt. Diese Erwärmung des Reifens führt in der Folge zu einer Erwärmung des Füllmediums welche wiederum in einem Druckanstieg resultiert.

Mit steigendem Innendruck verringert sich effektive Latschfläche und erhöht sich die vertikale Federsteifigkeit des Reifens was in der Folge den Rollwiderstand senkt. Im Zuge der Arbeit [17] konnten Änderungen des Rollwiderstands von bis zu 3,5% pro 10 kPa festgestellt werden. Die Ausprägtheit dieser Abhängigkeit ist jedoch stark bedingt durch die Konstruktion beziehungsweise die Dimensionen des Reifens.

Die temperaturbedingte Änderung des Rollwiderstands kann auf den Verlustfaktors $\tan \delta$, dem Verhältnis zwischen Verlustmodul G'' und Speichermodul G' , zurückgeführt werden. Dieser

Verlustfaktor ist stark temperaturabhängig und bildet sein Maximum im Bereich der Glas-temperatur der Gummimischung aus. Im Zuge der Arbeit von Movahed et al. [19] wurde die Temperaturabhängigkeit von diversen Gummimischungen untersucht. Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen für fünf verschiedene Gummisorten (SBR = Styrol-Butadien-Kautschuk, BR = Butadien-Kautschuk, NR = Naturkautschuk, IR = Isoprenkautschuk).

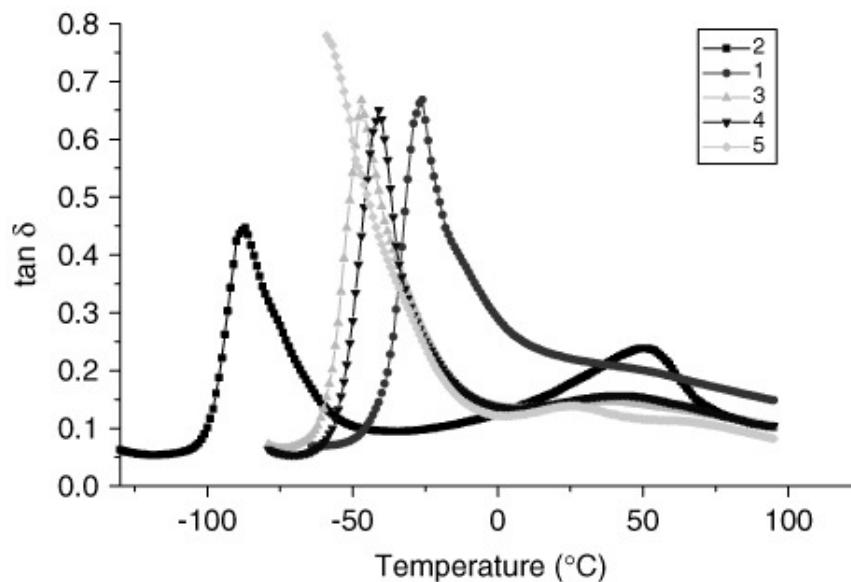


Abbildung 43: $\tan \delta$ über Temperatur bei einer Frequenz von 1 Hz und einer Amplitude von 256 μm (DMA).
1 = SBR; 2=BR; 3=NR ohne Schwefel; 4=NR mit Schwefel; 5=IR [19]

Die Hauptbestandteile der Lauffläche des untersuchten Reifens sind neben Ruß, SBR 1712 und BR 1220 (SBR 89,32 phr; BR 35 phr). Für SBR zeigt der Verlauf seinen größten Abfall im Bereich ab der Glas-temperatur bis hin zu circa 10°C und fällt danach stetig mit geringerer Steigung bis zur oberen Temperaturgrenze dieser Messungen. Das Verhalten von BR zeigt jedoch eine gänzlich andere Charakteristik mit einem lokalen Maximum bei etwa 50°C. Da das Verhältnis von SBR zu BR der verwendeten Gummimischung bei etwa 2,5 liegt, ist jedoch davon auszugehen, dass der Einfluss von SBR überwiegt und der Rollwiderstand mit steigender Temperatur sinkt. Dies konnte auch im Zuge der Arbeit [18] für unterschiedliche Reifen bestätigt werden.

Nach Pauwelussen [20] setzt sich der Rollwiderstand in etwa aus 2/3 aus dem Einfluss der Lauffläche und zu 1/3 aus dem kombinierten Einfluss aller anderen Komponenten (Gürtel, Kar-kasse, Seitenwände etc.) zusammen. Da nur über die Zusammensetzung der Lauffläche Infor-mationen vorliegen kann über den Einfluss der Seitenwände in Bezug auf Materialeigenschaften keine Aussage getroffen werden.

4.4.4 Druck und Temperatur - RoadSTAR

Die Umgebungstemperatur am ersten Messtag befand sich im Bereich 20-25 °C. Um ein breiteres Temperaturfenster abdecken zu können wurden die Messungen an einem zweiten Tag bei einer Umgebungstemperatur von 5-10°C wiederholt. An beiden Messtagen wurden die Messungen mit annähernd zwei bar Reifeninnendruck begonnen. Da der maßgebliche Anteil des Rollwiderstandes auf die Lauffläche zurückzuführen ist und die gemessene Innentemperatur des Füllmediums aus der Erwärmung eben dieser Lauffläche resultiert, wird davon ausgegangen, dass die Innentemperatur des Gürtels annähernd dieser Temperatur entspricht. Deshalb wird in der Folge diese Temperatur als Gürteltemperatur bezeichnet.

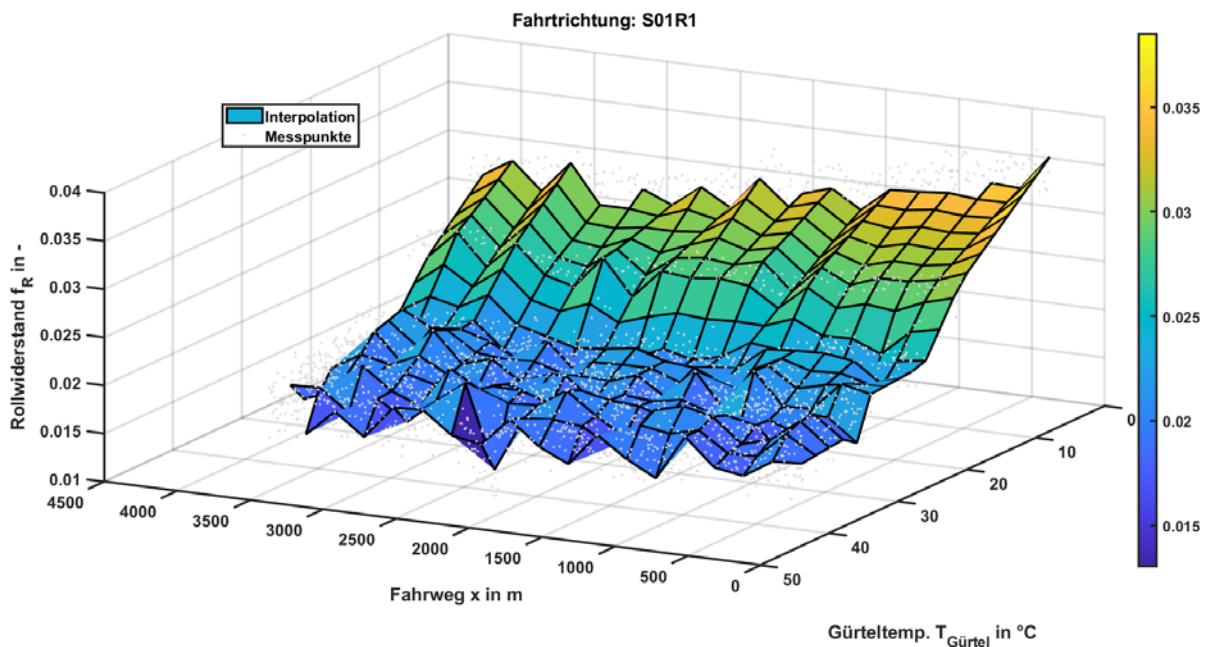


Abbildung 44: Messpunkte und deren Interpolation des Rollwiderstands f_R über Fahrweg x und Gürteltemperatur $T_{\text{Gürtel}}$.

Abbildung 44 zeigt den Rollwiderstand f_R über den Fahrweg x und der Gürteltemperatur $T_{\text{Gürtel}}$ mit den generierten Messpunkten und der daraus resultierenden Interpolation. Im Bereich von 5 bis 25°C sinkt der Rollwiderstand von annähernd 0.040 auf 0.025 ab, dies entspricht in etwa 2% pro °C. Danach ändert sich der Gradient drastisch und sinkt auf unter 1% pro °C. Dieses Verhalten deckt sich sehr stark mit der Charakteristik des Verlustfaktors $\tan \delta$ wie in Abbildung 43 dargestellt. Da jedoch in diesem Fall Druck und Temperatur nicht entkoppelt betrachtet werden können zeigt Abbildung 45 den Verlauf des Rollwiderstandes über die Gürteltemperatur, den Innendruck sowie die Oberflächentemperatur.

Obwohl die gezeigten Interpolationen sowohl für die Gürteltemperatur als auch für die Oberflächentemperatur zufriedenstellende Ergebnisse liefern kann der Temperatureinfluss nur mithilfe der Innentemperatur korrekt abgebildet werden. Infrarotsensoren, wie der zur Messung der Oberflächentemperatur eingesetzte, tasten nur die oberste Schicht des Reifens ab. Dies kann auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Gummi zu sehr großen Temperaturunterschieden zwischen der Oberflächentemperatur und der inneren Temperatur des Reifens führen. Da die überwiegende Masse der Lauffläche jedoch durch die innere Temperatur repräsentiert wird ist es für Untersuchungen des Temperatureinflusses auf den Rollwiderstand unerlässlich diese Temperatur heranzuziehen.

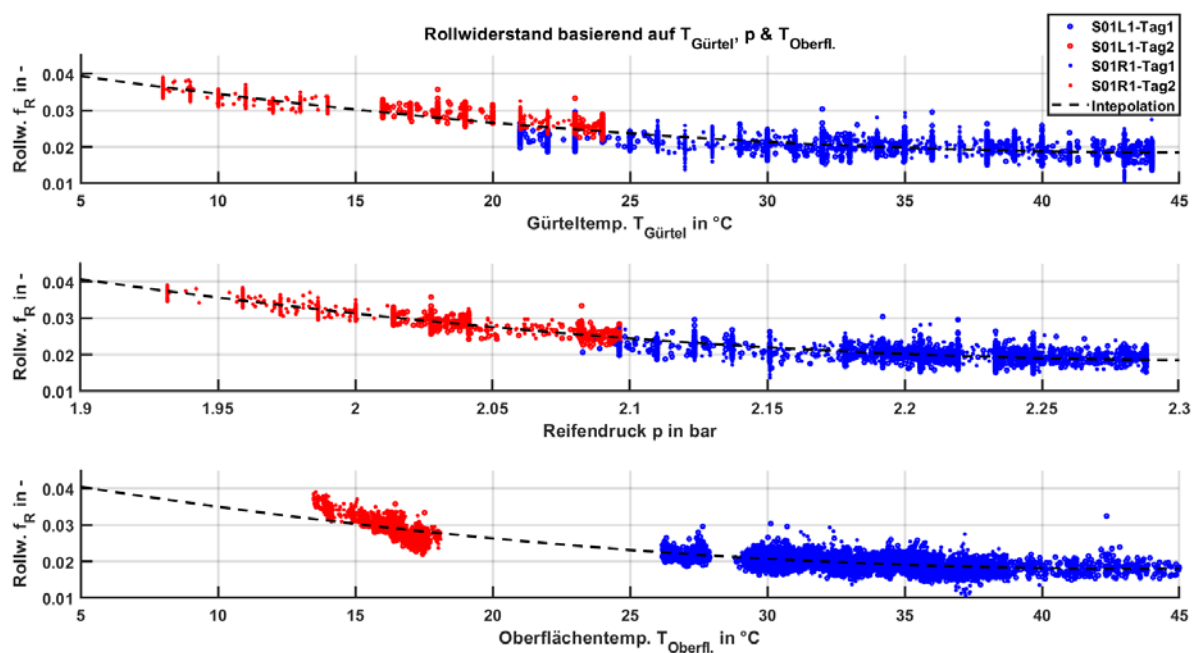


Abbildung 45: Rollwiderstand f_R über Gürteltemperatur $T_{\text{Gürtel}}$, Reifendruck p und Oberflächentemperatur $T_{\text{Oberfläche}}$. Messpunkte und Interpolation aller Messungen für beide Messtage und beide Fahrtrichtungen.

Es zeigt sich eine sehr ausgeprägte Korrelation zwischen dem Effekt der Temperaturerhöhung und dem Anstieg des Reifendrucks und deren Auswirkung auf den Rollwiderstand. Im Bereich um 45°C Gürteltemperatur beziehungsweise annähernd 2,3 bar Innendruck scheint ein lokales Minimum erreicht mit einem Gradienten von annähernd null. Dies weist auf einen kombinierten Einfluss der SBR-BR Gummimischung hin, da bei reinem SBR dieses Minimum weit oberhalb dieses Temperaturbereichs liegt. Über die druckbedingte Aufweitung des Reifens und die damit verbundene Reduktion der Latschfläche können mittels der durchgeführten Messungen nur schwer Rückschlüsse gezogen werden. Wobei davon auszugehen ist, dass auch dieser Effekt nicht-linear mit steigendem Innendruck abnimmt. Mit Hilfe von Abdrücken der Latschfläche am

stehenden Rad bei unterschiedlichen Innendrücken könnten diese Auswirkungen jedoch untersucht werden. So könnte eine separierte Betrachtung zwischen Druck- und Temperatureinfluss ermöglicht werden.

Zwischen den Messungen wurde versucht die Innentemperatur über zusätzlich aufgebrachten Schlupf am Testreifen weiter zu erhöhen was jedoch nicht realisiert werden konnte. Daraus lässt sich ableiten, dass bei diesem Reifen bei einem Initialdruck von 2 bar und etwa 25°C Außentemperatur ein thermisches Gleichgewicht vorliegt, bei dem sich Wärmeeintrag und Wärmeabgabe an die Umgebung ausgleichen (steady-state). Über das Verhalten außerhalb des gemessenen Temperaturbereichs können keine Aussagen getroffen werden. Bei deutlich höheren Umgebungstemperaturen und in der Folge höheren Innentemperaturen größer 45°C könnte der starke Anstieg des Verlustfaktors des Butadien-Kautschuks jedoch die Abnahme des Styrol-Butadien-Kautschuks kompensieren und in der Folge zu einem steigenden Rollwiderstand führen. Auch über das Verhalten unterhalb des gemessenen Temperaturbereichs kann keine Aussage getroffen werden da sich die Glastemperaturen dieser beiden Kautschuk Sorten sehr stark unterscheiden. Mit Hilfe einer dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) könnte der Verlauf des Verlustfaktors jedoch exakt bestimmt und mit den Ergebnissen dieser Messungen verglichen werden.

4.4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Rollwiderstandsmessungen mit dem RoadSTAR durchgeführt und in der Folge der Temperatureinfluss auf den gemessenen Rollwiderstand untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Temperaturerhöhung der Innentemperatur von 5°C auf 45°C und der damit einhergehenden Drucksteigerung von 1,9 bar auf 2,3 bar die kombinierte Auswirkung dieser beiden Effekte eine Halbierung des Rollwiderstands bewirkt. Um somit in der getesteten Konfiguration vergleichbare Rollwiderstandsmessungen durchführen zu können ist es erforderlich, dass sich der Reifen während der Messungen in einem ähnlichen Temperatur- beziehungsweise Druckbereich (steady-state) befindet. Mit Hilfe des verwendeten Reifendruckkontrollsystems kann diese Kontrolle einfach und zuverlässig durchgeführt werden.

Des Weiteren könnten mit diesem Sensor Umgebungstemperaturabhängige Initialdrücke ermittelt werden um so nach Erwärmung des Reifens auf Betriebstemperatur einen vergleichbaren Endzustand in Bezug auf Druck und Temperatur zu gewährleisten.

Um diesen vergleichbaren Endzustand auch ohne zusätzliche Sensorik zu erreichen könnte ein einfacher Ansatz basierend auf der idealen Gasgleichung verwendet werden. Bei bekannter Ausgangstemperatur und dem dazugehörigen Initialdruck kann so mit Hilfe einer Druckmessung

die aktuelle Temperatur relativ zuverlässig bestimmt werden. Gleichung 5 zeigt den verwendeten Ansatz wobei $T_{akt.}$ die zu berechnende Temperatur, $p_{akt.}$ den aktuell gemessenen Druck und $p_{ini.}$ den Ausgangsdruck bei Ausgangstemperatur $T_{ini.}$ darstellt. Für den Ansatz in dargestellter Form werden Temperaturen in Kelvin verwendet.

$$T_{akt.} = \frac{T_{ini.} * p_{akt.}}{p_{ini.}} \quad (11)$$

Abbildung 46 zeigt die Verläufe der gemessenen und der mittels Gleichung 5 berechneten Innentemperatur. Durch diverse Einflüsse wie temperaturbedingte Volumenänderung oder die Abweichungen des Realgasverhaltens von den idealisierten Ansätzen kommt es zu Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Temperatur. In dem in Abbildung 46 gezeigten Verlauf beläuft sich die durchschnittliche Abweichung auf etwa 5°C, was für den Einsatzzweck als Alternative zu zusätzlicher Sensorik eine ausreichende Genauigkeit darstellen würde.

Die generierten Messdaten ermöglichen eine zuverlässige und genaue Auswertung. Mittels weiterer Testfahrten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen könnten diese Untersuchungen vertieft beziehungsweise ausgeweitet werden. Vor Allem in Bezug auf Ganzjahresreifen sind die ausgeprägten Temperaturunterschiede zwischen den Winter- und Sommermonaten und deren Einfluss auf den Rollwiderstand von großer Bedeutung.

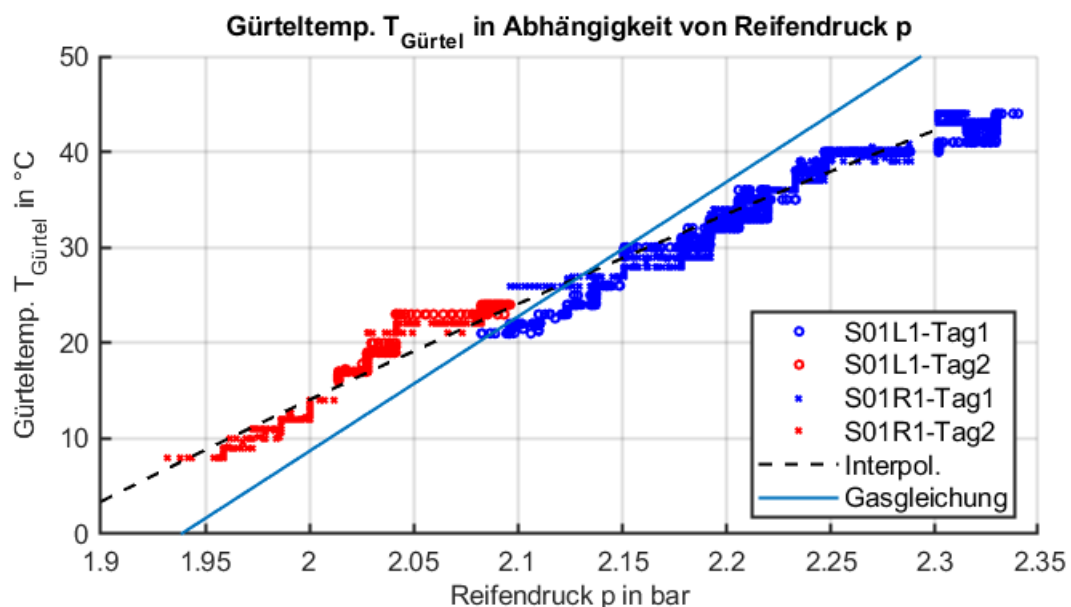


Abbildung 46: Gürteltemperatur $T_{Gürtel}$ über Reifendruck p für gemessene und mit Hilfe der idealen Gasgleichung berechneten Innentemperatur sowie Interpolation aller Messungen für beide Messtage und beide Fahrtrichtungen.

5 ERFASSUNG OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN

5.1 Durchführung der Messungen

Für die Erprobung des Messsystems und für die weiteren Untersuchungen wurde ein Messstreckenkollektiv (Tabelle 14 und Abbildung 47) zusammengestellt, in dem die Oberflächeneigenschaften und der Rollwiderstand erhoben wurden.

Grundlage für die Auswahl der Strecken waren:

- die Ergebnisse der netzweiten Zustandserfassung am rechten Fahrstreifen
- die Oberbaudatenbank der ASFINAG zur Identifizierung der Deckschichtbauweisen und des Herstellungsjahrs
- Erkenntnisse aus vorangegangenen Forschungsprojekten
- Berücksichtigung von Sonderbauweisen wie EP Grip und Grinding

Tabelle 14: Liste der erhobenen Strecken

Nummer	Route	km von	km bis	Länge
1	A01_1	30	45	15
2	A01_1	65	85	20
3	A01_2	45	30	15
4	A01_2	85	65	20
5	A02_1	6	12	6
6	A02_1	25,8	28,7	2,9
7	A02_1	50	55	5
8	A02_2	6	12	6
9	A02_2	55	50	5
10	A03_1	5	12	7
11	A03_1	12	17	5
12	A03_1	17	30	13
13	A03_2	12	5	7
14	A03_2	17	30	13
15	A03_2	17	12	5
16	A04_1	0	5	5
17	A04_2	5	0	5
20	S31_1	42	47	5
21	S31_2	47	42	5
22	S33_1	0	6	6
23	S33_2	6	0	6

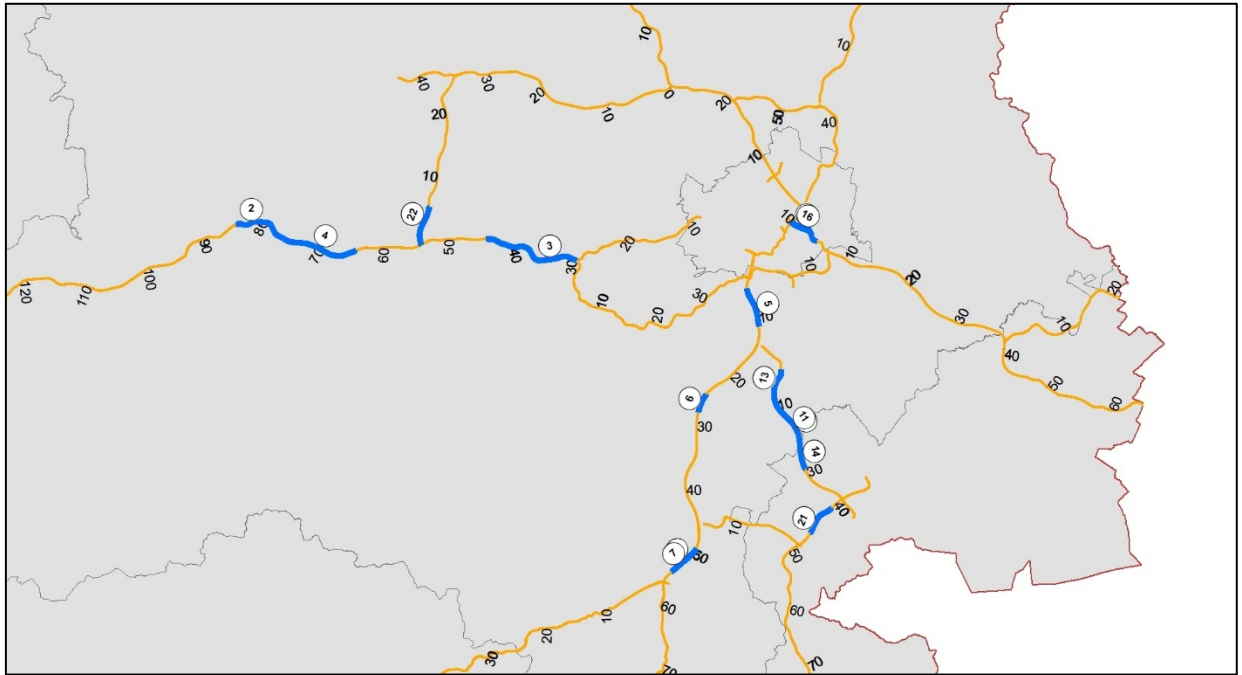


Abbildung 47: Übersicht über die Lage der Messstrecken

Zusätzlich zum Rollwiderstandskoeffizienten wurden auf den ausgewählten Strecken die folgenden Parameter erhoben:

- Makrotextur (MPD)
- Längsebenheit (IRI, Δ_{WLP} , σ_{WLP})
- Megatextur

Aus der Oberbaudatenbank wurden die folgenden Informationen entnommen:

- Bauweise, Beton oder Asphalt
- Bautype (Feld „S1M“), z.B. SMA, AC Deck
- Herstellungsjahr der Deckschicht (Feld „S1J“)

Die Zustandsgrößen „Oberflächenschäden in Prozent“ sowie „Risse in Prozent“ gemäß RVS 13.01.16 [21] wurden aus den Datenbanken der Messkampagne 2018 entnommen.

Alle Messungen fanden mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h ohne Beeinträchtigung des Verkehrs statt. Insgesamt wurden 135,5 km Richtungsfahrbahn erhoben.

5.2 Analyse der Messdaten

Hinsichtlich des Messverfahrens selbst kann festgehalten werden, dass die Wiederholbarkeit der Messungen bestätigt werden konnte, auch wenn es derzeit nicht möglich ist, eine Wiederholbarkeit analog zu anderen Messverfahren wie Griffigkeit oder Querebenheit, anzugeben. Die Untersuchung der wiederholten Messungen zeigt aber die korrekte Zuordnung von Unterschieden im Streckenverlauf sowie das sichere Wiederauffinden von typischen Sprüngen und Veränderungen. Das lässt eine positive Aussage zur Funktionsfähigkeit des Messsystems zu.

Anschließend wurden die Messdaten hinsichtlich der in der Literatur gefundenen Zusammenhänge zwischen Rollwiderstand und weiteren Oberflächeneigenschaften untersucht.

Die Abbildung 48 zeigt die Gegenüberstellung von Rollwiderstand und MPD. Es zeigt sich ein – sehr schwach ausgeprägter – positiver Zusammenhang, der aber statistisch nicht signifikant ausfällt. Aus diesem Grund wird hier auch kein Korrelationsmaß angegeben.

Bei der Gegenüberstellung ist zu berücksichtigen, dass sich die Daten nur über einen eher geringen Ausschnitt im unteren bis mittleren Bereich (ca. 0,4 - 0,7 mm) des gesamten MPD-Spektrums (0 – 2,5 mm) erstrecken.

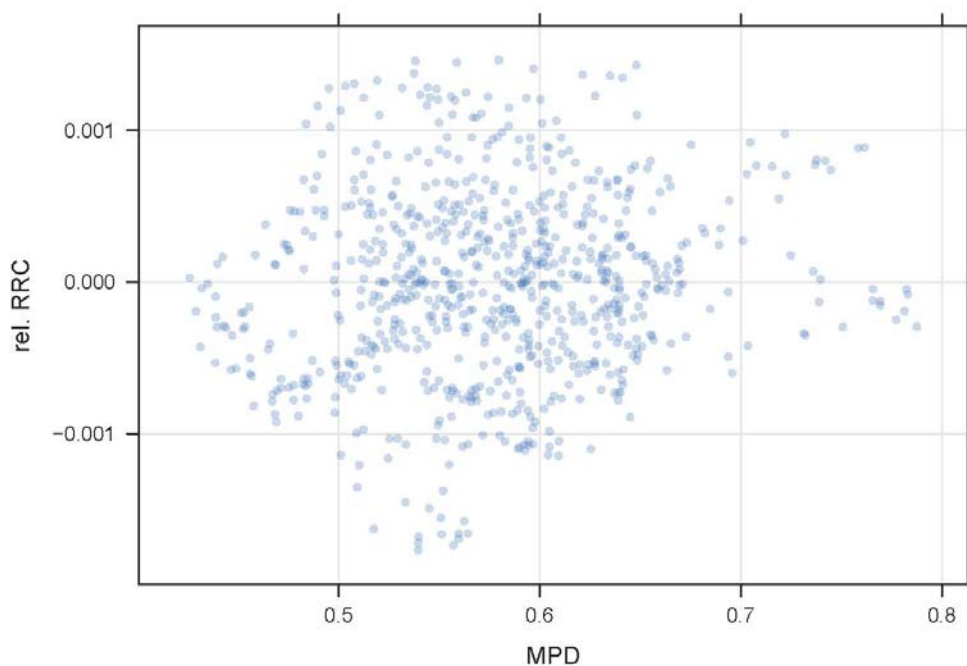


Abbildung 48: Gegenüberstellung relativer Rollwiderstand und MPD.

Bei der Analyse des erweiterten Streckenkollektivs ergab sich die Einschränkung, dass nur die Temperatur der Fahrbahnoberfläche erfasst werden konnte. Es konnten keine signifikanten Un-

terschiede zwischen einzelnen Belagstypen festgestellt werden. In Abbildung 49 sind die Verläufe von Rollwiderstand und MPD dargestellt. In der Regressionsrechnung konnten auch keine eindeutigen Zusammenhänge mit anderen Oberflächeneigenschaften (Textur, Längsebenheit) hergestellt werden.

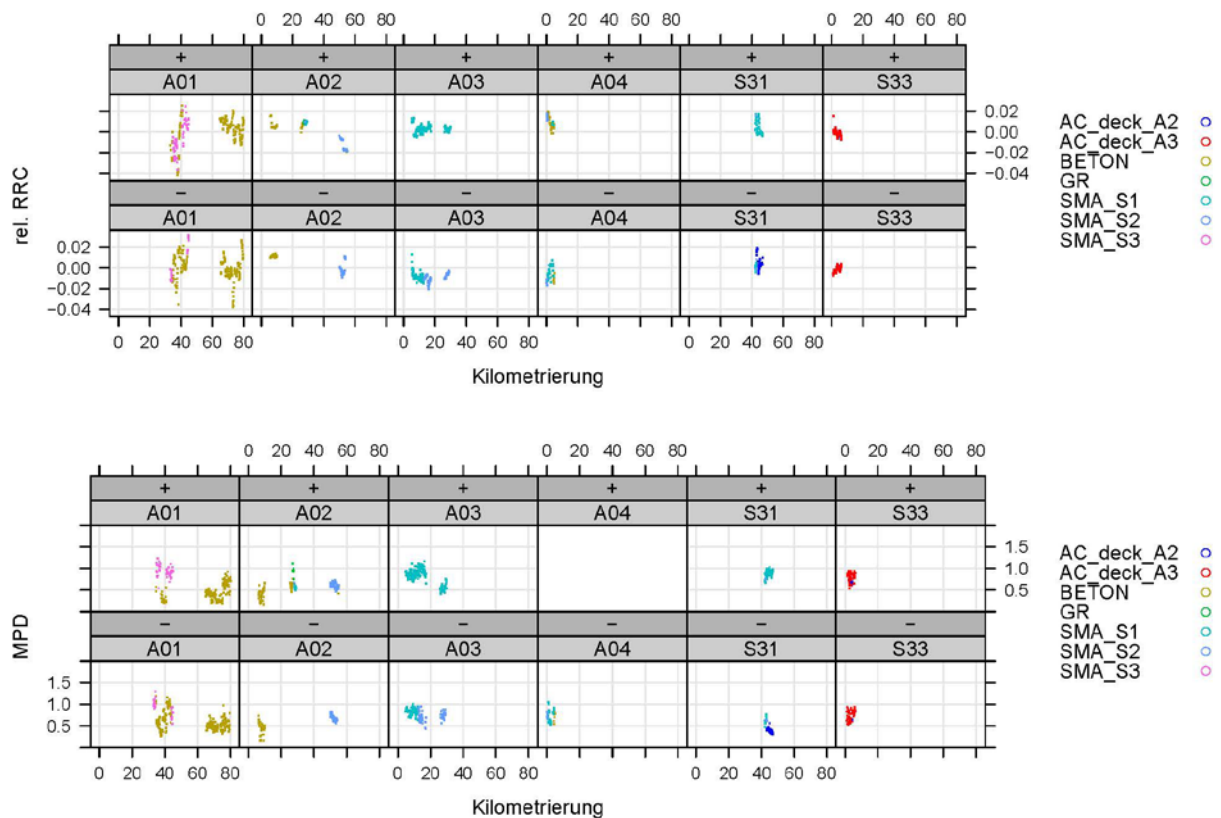


Abbildung 49: Verlauf relativer Rollwiderstand und MPD auf den Abschnitten des Messtreckenkollektivs.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

6.1 Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche und dem Messprogramm

Aus der Literaturrecherche lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

Obwohl verschiedene, durchaus unterschiedliche Messverfahren in der Literatur beschrieben sind, befindet sich für die Erfassung des Rollwiderstandes der Fahrbahn nur die Anhängermethode in Anwendung. Alle anderen Methoden wurden bis jetzt nur projektspezifisch eingesetzt. Es gibt derzeit in Europa (und wahrscheinlich weltweit) nur zwei Geräte, mit denen Rollwiderstandsmessungen durchgeführt werden können, einen Anhänger bei BRRC in Belgien und einen Anhänger bei der TU Gdansk. Diese Geräte werden jedoch ausschließlich im Forschungsbereich eingesetzt. Ein weiterer Anhänger wird in Belgien gerade konzipiert und wird voraussichtlich Ende 2021 operativ.

Bis auf den Sattelzug von IPW in Deutschland gibt es derzeit kein Messsystem, das mit LKW-Reifen arbeitet. Der Schwerpunkt bei IPW liegt aber auf der Untersuchung der Reifen, nicht der Fahrbahn.

Alle weiteren Messverfahren (steady state, Ausrollmethoden, direkte Spritverbrauchsmessung) unterliegen vielfältigen Einflussfaktoren (vor allem Umwelteinflüssen wie Wind und Temperatur), die eine Isolierung des Einflusses des Rollwiderstandes der Fahrbahn auf den Energieverbrauch sehr schwierig machen.

Hinsichtlich der Bauweisen Asphalt und Beton konnten in der Literatur keine signifikanten Unterschiede beim Rollwiderstand gefunden werden.

Bezüglich des Einflusses der unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften auf den Rollwiderstand kommen die bereits etablierten Prognosemodelle zu folgender Einschätzung:

- Eine Erhöhung (Vergröberung) der Makrotextur (MPD) führt zu einer Erhöhung des Rollwiderstandes.
- Eine Erhöhung (Verschlechterung) der Längsebenheit (des IRI) führt zu einer Erhöhung des Rollwiderstandes, in ähnlichem Ausmaß wie die Erhöhung der Makrotextur.
- Die Einflüsse der Oberflächeneigenschaften auf den Treibstoffverbrauch sind generell gering bzw. sind die Zusammenhänge schwach ausgeprägt.
- Die Umgebungstemperatur hat aber – verglichen mit den Oberflächeneigenschaften – den weitaus höchsten Einfluss auf den Rollwiderstand. Dies ergibt sich aus dem mit steigender Temperatur ebenfalls ansteigenden Reifenfülldruck.

Vor diesem Hintergrund muss die Entwicklung der Messmethode im Projekt als Machbarkeitsstudie gesehen werden. Trotz erheblichem Aufwand an zusätzlichen bzw. verbesserten Komponenten gestaltet sich die Herausarbeitung von Unterschieden zwischen einzelnen Decken bzw. Deckentypen als schwierig. Das liegt einerseits an den sehr geringen Unterschieden in der gemessenen Horizontalkraft, andererseits an den wesentlich größeren Einflussfaktoren, besonders der Temperatur, die schwierig zu kompensieren bzw. zu eliminieren sind. Hier lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine messtechnisch validierten Aussagen zum Rollwiderstand einzelner Fahrbahndecken treffen.

6.2 Handlungsempfehlungen für den Straßenerhalter

Die aus Sicht eines Straßenbetreibers am weitesten gehenden Untersuchungen zum Thema Energieverbrauch und Fahrbahnen wurden in Dänemark durchgeführt. Hier wird das Potenzial für die Reduktion des Treibstoffverbrauchs im Gesamtnetz des Danish Road Directorate (welches das höherrangige Straßennetz umfasst) beim flächendeckenden Einsatz des entwickelten „klimafreundlichen“ Asphalts mit 0,4 bis 1,8 % im Vergleich zum SMA 8 eingeschätzt. Die Optimierung des Asphalts geht hier hauptsächlich in Richtung Reduktion der Makrotextur. Hier stellt sich die Frage, wie sich diese Ergebnisse auf die Verhältnisse des österreichischen A+S-Netz umlegen lassen. Dazu ist festzuhalten, dass die Netztopographie in Österreich eine wesentlich andere als in Dänemark ist. Wesentliche Teile des österreichischen Netzes liegen im alpinen Raum mit ausgeprägten Steigungen und Gefällen, während die höchste Erhebung in Dänemark 171 m beträgt. Steigungen und Gefälle haben auf den Spritverbrauch aber einen wesentlichen Einfluss - jedenfalls wesentlich mehr als der Fahrbahn-Rollwiderstand - sodass die oben erwähnten erwarteten Einsparungen von 0,4 bis 1,8 % sich am ASFINAG-Netz schon allein aufgrund der Topographie nicht erzielen lassen (vgl. auch Ergebnisse des Projekt A+S Decarb [28] für den Zusammenhang von Spritverbrauch und Steigung/Gefälle für LKW).. Ein konkreter Wert, falls man den „klimafreundlichen“ Asphalt flächendeckend am ASFINAG-Netz verwenden würde, lässt sich jedoch nicht angeben.

Als generelle Handlungsempfehlung kann die Optimierung der Deckschichten hinsichtlich geringer Makrotextur und guter Längsebenheit gegeben werden.

Bei der Optimierung hinsichtlich geringer Makrotextur gelangt man jedoch in ein Spannungsfeld widerstrebender Optimierungen, weil Rollgeräusch und Drainagefähigkeit und damit auch die Griffbarkeit gegenläufige Richtungen aufweisen, wenn diese Eigenschaften optimiert werden sollen. Insgesamt haben die Erhebungen im Projekt aber gezeigt, dass die bereits vorhandenen Deckschichten ohnehin im unteren Bereich der Makrotextur angesiedelt sind – ein weiteres Absenken scheint hier schwierig, ohne anderen positive Oberflächeneigenschaften zu gefährden.

Die oben getroffenen Aussagen betreffen Material und Mischgut. Verbesserte Längsebenheit wirkt sich wie bereits angesprochen ebenfalls positiv auf den Rollwiderstand aus. Hier liegen die Potenziale im Einbau und der Erhaltung, weniger im Material. Augenmerk sollte auf die Deckenherstellung gelegt werden. Hier würden sich moderne, aber praxisgerechte Bewertungsverfahren bzw. Anforderungen bei der Übernahme und am Ende der Gewährleistung als Kontrollmethoden anbieten. Die gerade in Ausarbeitung befindliche RVS 13.01.13 zur Bewertung der Längsebenheit geht in genau diese Richtung und stellt in Kombination mit noch festzulegenden Anforderungswerten bei Abnahme und Gewährleistung in den entsprechenden Deckenschicht-RVS (RVS 08.16.01, RVS 08.17.02) eine Handhabe zu genau dieser Optimierung dar. Im Kontext mit anderen, nicht fahrbahnbezogenen Maßnahmen muss aber festgehalten werden, dass ein etwas erhöhter Reifendruck, wie er bei einigen Fahrzeugen bereits als „ECO-Empfehlung“ oder „empfohlener Druck zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs“ vom Fahrzeughersteller existiert, ein weit größeres Spritsparpotenzial birgt, als die Belagsoptimierung. Das trifft im besonderen Maße auch auf rollwiderstandsoptimierte Reifen zu.

7 ZUSAMMENFÜHREN DER ERGEBNISSE

Im Rahmen des VIF2017-Calls wurde auch das Forschungsprojekt 2.1.1 „Dekarbonisierung durch Geschwindigkeitsharmonisierung am A+S-Netz“ (A+S-Decarb) [28] durchgeführt. Die Projektleitung lag bei der TU Wien - Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, weitere Projektpartner waren TU Wien - Fachbereich für Verkehrssystemplanung, Department für Raumplanung und nast consulting ZT GmbH. Beide Projekte (A+S-Decarb und RoWi) liegen im gleichen Ausschreibungsschwerpunkt.

Im Projekt A+S-Decarb wurde eine Bewertungsmatrix (vgl. Abbildung 50) erstellt, in der die Ergebnisse aus unterschiedlichen Forschungsprojekten in Bezug auf die Wirkung auf Schadstoffausstoß, Kraftstoffverbrauch, Lärmemission, Straßenkapazität sowie verschiedene Kostenarten (Investitionskosten, Instandhaltungskosten und Nutzer- sowie volkswirtschaftliche Kosten) dargestellt wurden. Nachfolgend wird die Bewertungsmatrix um die Ergebnisse des Projektes RoWi ergänzt (vgl. Tabelle 15). Aufgrund des Projektinhaltes können zu einigen Bewertungskriterien (z.B. Straßenkapazität) keine Bewertungen vorgenommen werden. Die entsprechenden Spalten wurden in der projektspezifischen Bewertungsmatrix weggelassen. Es sei angemerkt, dass die Einteilung bei der Reduktion in 10 %-Schritten für die Ergebnisse des Projekts zu grob erscheint, weil sich die möglichen Reduktionen deutlich unter 10 % bewegen würden. Zur Wahrung der konsistenten Darstellung wurden die Skalierung beibehalten.

Tabelle 15: Bewertungsmatrix für das Projekt RoWi. Die Legende entspricht der in der Abbildung 50 verwendeten.

Maßnahme	CO ₂	Kraftstoffverbrauch	Investitionskosten	Instandhaltungskosten
Hinsichtlich Makrotextur optimierter Belag	●	●	€	€
Optimierung der Längsebenheit, praxisgerechte Bewertungsverfahren bei Übernahme und Gewährleistungsende	●	●	€	€



Abbildung 50: Bewertungsmatrix des Projektes A+S-Decarb.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Sander K., Bericht zum Forschungsprojekt 95.530: „Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand“, Heft F20, ISSN 0943-9307, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Juni 1996
- [2] Sandberg, U.; Bergiers, A.; Ejsmont, J.; Goubert, L.; Zöller, M.: “Rolling Resistance - Measurement Methods for Studies of Road Surface Effects”, Report MIRIAM SP1 Deliv. 2, Feb. 2012
- [3] Gent A.N., Walter J.D.: „The pneumatic tire“, Chapter 8: Forces and Moments, Pottinger M. G. und Chapter 12: Rolling resistance, LaClair T. J., National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC, August 2005
- [4] Präsentation ohne Author mit dem Thema: “Amendment of Rolling Resistance in R117”, Informal Document No. GRRF-66-28, 66th GRRF 15-17 September 2009, unter: <https://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grrf/grrf66.html.html> (abgerufen am 23.09.2019)
- [5] Karlsson R., Hammarström U., Sörensen H., Eriksson O.: „Road surface influence on rolling resistance - Coastdown measurements for a car and an HGV“, VTI notat 24A-2011, Utgivningsår Published 2011
- [6] Bergiers A. , Goubert L., Vuye C.: “About the rolling resistance trailer and parameters influencing rolling resistance”, SURF 2012 : 7th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Norfolk, September 19-22, 2012
- [7] Sandberg U. et. al.: “Rolling Resistance – Basic Information and State-of the Art on Measurement methods”, Report MIRIAM SP1 Deliv. 1, Juni 2011
- [8] Ronowski G.: “Design and Calibration of Rolling Resistance Test Trailer R²Mk.2”, 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 148 012026, Scientific Conference on Automotive Vehicles and Combustion Engines (KONMOT 2016), doi:10.1088/1757-899X/148/1/012026
- [9] Zöller M.: “State of the art on rolling resistance measurement devices”, Report RO-SANNE Deliv. D3.1, Feb. 2014

- [10] Hammarström U., Eriksson J., Karlsson R., Yahya M., : "Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions", VTI rapport 748A, ISSN: 0347-6030, Project Miriam, 2012
- [11] Trupia L., Parry T., Neves L., Presti D.: "Rolling resistance contribution to a road pavement life cycle carbon footprint analysis", DOI 10.1007/s11367-016-1203-9, This article is published with open access at Springerlink.com, veröffentlicht am 01.10.2016; abgerufen am 24.10.2018 unter:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1203-9>
- [12] Willis R., Robbins M., Thompson M.: "Effects of pavement properties on vehicular rolling resistance: a literature review", NCAT Report 14-07, National Center for Asphalt Technology Auburn University, Auburn, Alabama, Revised June 2015
- [13] Vashisth A., Kumar R.: "Review on Effect of Pavement Characteristics on Fuel Consumption", International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), ISSN: 2249 – 8958, Volume-7 Issue-4, April 2018, Published By: Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication Pvt. Ltd.
- [14] Sandberg U., Bergiers A., Ejsmont J., Goubert L., Karlsson R., Zöller M., „Road surface influence on tyre/road rolling resistance“, MIRIAM SP 1, Deliverable 4, Version, 2011-12-31
- [15] Ejsmont J.: "Results of rolling resistance laboratory drum tests", ROSANNE, Deliverable D3.2, Collaborative Project FP7-SST-2013-RTD-1, 11.03.2015
- [16] Pettinari M., Axelsen C., Nielsen E., Larsen M., Raaberg J., Thøgersen F.: „Climate friendly asphalt Demonstration project“, Doc. Nr. 18/05744-10, Vejdirektoratet, August 2019
- [17] Ejsmont, J., Taryma, S., Ronowski, G., & Świczko-Żurek, B. (2016). Influence of load and inflation pressure on the tyre rolling resistance. International Journal of Automotive Technology, 17, 237-244.
- [18] Ejsmont, J., Taryma, S., Ronowski, G. et al. Influence of temperature on the tyre rolling resistance. Int.J Automot. Technol. 19, 45–54 (2018) doi:10.1007/s12239-018-0005-4

- [19] Movahed, S.O., Ansarifard, A. and Song, M. (2009), Comparing the dynamic behaviour of several rubbers filled with silanized silica nanofiller. Polym. Int., 58: 209-217. doi:10.1002/pi.2518
- [20] Joop P. Pauwelussen (2015), Chapter Two - Fundamentals of Tire Behavior, Essentials of Vehicle Dynamics, Butterworth-Heinemann, Pages 7-74, ISBN 9780081000366, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100036-6.00002-9>.
- [21] RVS 13.01.16 Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken, November 2012, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr FSV
- [22] Durrant C. "The Surprising Cost Of Rolling Resistance", <https://dynamon.co.uk/2017/08/30/burning-rubber-the-surprising-cost-of-rolling-resistance/>, August 2017, abgerufen am 15.10.2019
- [23] Bode, O., Bode, M.: "Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen", FAT Schriftenreihe Nr. 255 (2013), ISSN 2192-7863
- [24] Bode, O.: „Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn“, FAT Schriftenreihe Nr. 285 (2016), ISSN 2192-7863
- [25] Bode, M. "Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen", FAT Schriftenreihe 304 (2018), ISSN 2192-7863
- [26] Bode, M.: "Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen", FAT Schriftenreihe 308 (2018), ISSN 2192-7863
- [27] Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>, abgerufen am 14.10.2019
- [28] Elias D. et. al.: "Untersuchung der Dekarbonisierung durch Geschwindigkeitsharmonisierung am A+S Netz – A+S Decarb" Ergebnisbericht VIF 2017, 2019, Wien
- [29] VERORDNUNG NR. 1222/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. November 2009 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1222&from=EN>, Quelle abgerufen am 09.10.2019

- [30]Regelung Nr. 117 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Reifen hinsichtlich der Rollgeräuschemissionen und der Haftung auf nassen Oberflächen und/o-der des Rollwiderstandes, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X1123\(03\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X1123(03)&from=EN), Quelle abgerufen am 09.10.2019
- [31]https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Tech-nik/PFF.pdf?__blob=publicationFile&v=6, Quelle abgerufen am 27.09.2019:
- [32]<https://www.trm.dk/nyheder/2019/regeringen-vil-udlaegge-klimavenlig-asfalt-paa-statsvejene/>, (in dänisch) Quelle abgerufen am 09.12.2019
- [33]Pettinari M., Schmidt B., Jensen B., Hededal O.: "New surface layers with low rolling resistance tested in Denmark", DOI: 10.1201/b17219-46, Conference: ISAP 2014, https://www.researchgate.net/publication/264934335_New_surface_layers_with_low_rolling_resistance_tested_in_Denmark
- [34]Chatti K., Zaabar I.: "Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs", TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 720, <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/166904.aspx>, abgerufen am 03.12.2019