

Bestimmung und Modellierung der Einflüsse auf den Reifenrollwiderstand

– Kurzbericht –

Forschungsstellen

Universität Stuttgart

Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen – IVK –

Hochschule Esslingen

Das Projekt wurde beauftragt vom Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg.

Die Belastungen durch Feinstaub und Abgase durch Pkws und Lkws werden vor allem in Großstädten zunehmend kritisch betrachtet. Abhilfe erhofft man sich durch die Weiterentwicklung der Antriebe in Richtung Hybridantriebe und durch die längerfristige Umstellung auf kompletten Elektroantrieb. Eine Reduktion der Fahrwiderstände kann unabhängig von der Antriebsart den Energieverbrauch senken, Ressourcen schonen und die Reichweite erhöhen.

Der Rollwiderstand gehört zu den Fahrwiderständen. Während Steigungs- und Beschleunigungswiderstand eine Wandlung in kinetische Energie bewirken, die theoretisch durch Rekuperation bei einem E-Fahrzeug zurückgewonnen werden kann, führt der Rollwiderstand zu einer irreversiblen Wandlung in Wärme, die an die Umgebung abgegeben wird. Für zukünftige Fahrzeuge, mit größerem Potential an Energierückgewinnung gewinnen daher Luft- und Rollwiderstand an Bedeutung.

Während der Rollwiderstand nur in geringem Maße von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, nimmt der Luftwiderstand näherungsweise mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu. Bis ca. 70 km/h ist der Rollwiderstand dominant, d.h. bei Fahrzeugen, die ausschließlich in der Stadt bewegt werden, trägt in Zukunft der Rollwiderstand am stärksten zum Fahrwiderstand und somit zum Energieverbrauch des Fahrzeugs bei. Sollten die Batterien der E-Fahrzeuge zum Erzielen höherer Reichweite vergrößert werden, würden die Fahrzeuge tendenziell schwerer werden und der Anteil des Rollwiderstands würde ebenfalls zunehmen.

Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor führen die neu eingeführten Abgastests, die im praktischen Fahrbetrieb durchgeführt werden, zu Prüfbedingungen, die näher an der Realität liegen.

Damit gewinnt insgesamt die Reduzierung des Rollwiderstands unter realen Bedingungen stark an Bedeutung. Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurden unterschiedliche Betriebszustände, wie sie im realen Fahrbetrieb auftreten können, untersucht und systematische Zusammenhänge erarbeitet und mit Modellrechnungen abgeglichen.

Grundlage der Versuche bildete die Erarbeitung, Weiterentwicklung und Erprobung einer neuen Messmethode zur Ermittlung des Rollwiderstands. Der Rollwiderstand wird hierbei mittels eines Messrades der Fa. Kistler Instrumente AG ermittelt, das gewöhnlich für Fahrdynamikversuche und Dauererprobungen bei wesentlich höheren Kraftbereichen eingesetzt wird. Die Verwendung eines Messrades bietet den theoretischen Vorteil, dass dieses auf unterschiedlichen Prüfständen und auch auf einem Rollwiderstandsmessanhänger eingesetzt werden kann. Die Herausforderung bei der Verwendung eines Messrades besteht darin, dass mit denselben Sensoren die Radlast und die Rollwiderstandskraft, die nur ca. ein Prozent der Radlast beträgt, gemessen werden. Um die beiden Größen zu separieren, muss der exakte Drehwinkel des Rades relativ zur Fahrbahn bekannt sein. Um eine Genauigkeit von 3 % bei der Bestimmung des Rollwiderstands erreichen zu können, muss der Winkel auf $0,0128^\circ$ genau bestimmt werden. Im Rahmen des Projektes wurde eine Methode entwickelt, die durch Abrollen des Rades in beiden Richtungen die Winkelzuordnung mit der gewünschten Genauigkeit ermöglicht.

Es wurde versucht, dasselbe Messsystem für Messungen des Rollwiderstands auf der Straße zu etablieren. Das beschriebene Verfahren eignet sich für Messungen auf dem Prüfstand, nicht aber für einen Rollwiderstandsmessanhänger, da mit ihm keine längere Strecke mit konstanter Geschwindigkeit rückwärts gefahren werden kann. Parallel wurde eine Methode entwickelt, bei der das Rad bei stehendem Fahrzeug im abgehobenen Zustand elektrisch angetrieben wird. Die Gewichtskraft ändert am drehenden Rad die Wirkrichtung relativ zum Rad, sodass theoretisch die Lage des Rades relativ zur Erdbeschleunigung bestimmt werden kann. Hier zeigten aber die Versuche, dass die Gewichtskraft im Vergleich zur Auflösung des Messrades zu gering ist, um die Relativlage des Rades mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen.

Rollwiderstandsmessungen haben das prinzipielle Problem, dass Verluste durch Radlagerreibung und Ventilationswiderstand zu einem zu großen Messergebnis führen. Das rotierende Messrad bietet hier den Vorteil, dass es das Moment durch die Radlagerreibung direkt messen kann. Da der dynamische Rollradius aus dem Verhältnis der Fahrgeschwindigkeit zur Raddrehzahl bekannt ist, kann damit der durch die Radlagerreibung verursachte Fehler eliminiert werden. Durch Zusatzmessungen bei geringer Radlast gelingt es auch, den Ventilationswiderstand näherungsweise in Abhängigkeit der Geschwindigkeit zu ermitteln und damit das Messergebnis zu korrigieren.

Der so ermittelte Längskraftwert im Messrad muss dann noch korrigiert werden, um den Einfluss der Trommelkrümmung zu berücksichtigen.

Mit diesem Verfahren wurde ein Reifenkollektiv aus Sommer- und Winterreifen vermessen. Neben den Parametern Radlast, Reifendruck und Geschwindigkeit

wurden für einen ausgewählten Reifen auch die Parameter Sturz und Spur variiert.

Da der Rollwiderstand stark von der Temperatur abhängt, sind zwei Dinge erforderlich:

1. Es muss die Reifentemperatur an unterschiedlichen Stellen gemessen werden. Im Rahmen des Projektes wurde die Oberflächentemperatur an drei Stellen gemessen und bei einzelnen Messungen zusätzlich die Innenlufttemperatur und die Innenlaufflächentemperatur.
2. Die Messung jedes einzelnen Betriebspunktes muss so lange durchgeführt werden, bis der Reifen die Beharrungstemperatur näherungsweise erreicht hat. Hierzu ist abhängig von Radlast und Fülldruck eine Messdauer von 30 Minuten und mehr erforderlich. Um die gesamte Messdauer zu reduzieren, wurde eine Messung mit gestaffelter Radlast entwickelt, sodass innerhalb einer Stunde der Rollwiderstand bei fünf verschiedenen Radlasten bestimmt werden kann. Vergleichsmessungen mit der klassischen Methode jede Radlast separat zu messen, führen zu den gleichen Beharrungstemperaturen und Rollwiderstandsbeiwerten.

Mit zunehmender Reifentemperatur nimmt der Rollwiderstand ab. In Abbildung 1 ist die Entwicklung des Rollwiderstandsbeiwerts über der Zeit zusammen mit der Entwicklung der Innenlaufflächentemperatur dargestellt für einen stationären Betrieb bei 80 km/h und eine konstante Radlast von ca. 4950 N dargestellt.

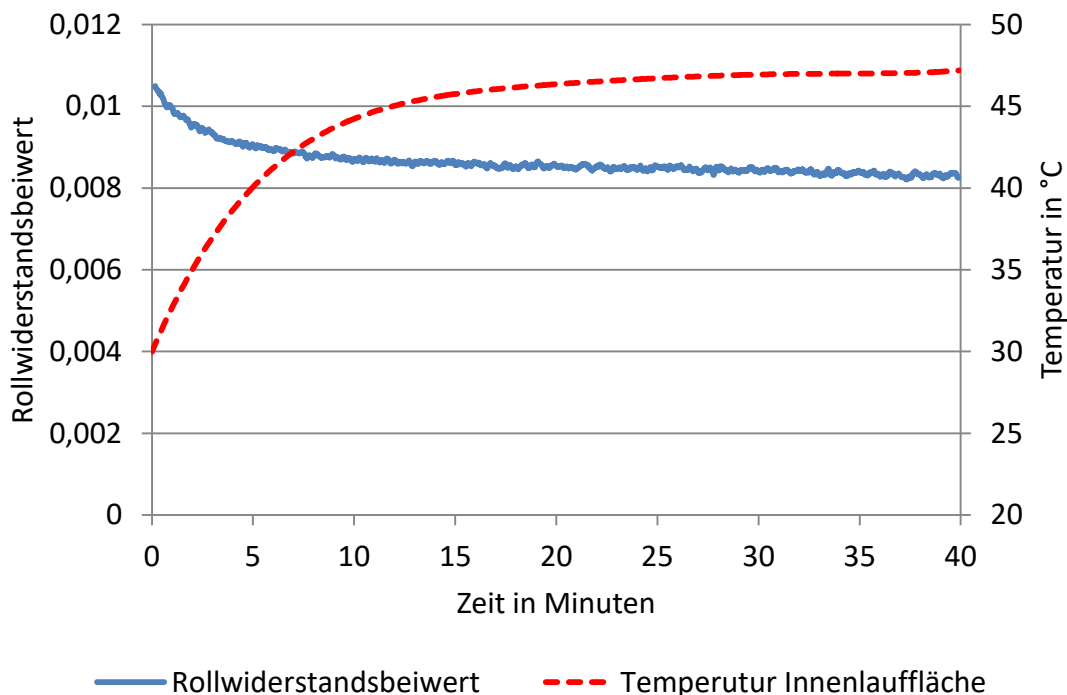


Abbildung 1: Rollwiderstandsbeiwert als Funktion der Zeit

Der Rollwiderstand nimmt mit zunehmender Radlast nur degressiv zu. Besonders deutlich erkennbar wird dieser Zusammenhang in der Betrachtung des Rollwiderstandsbeiwerts, also des auf die Radlast normierten Rollwiderstands. Wie in Abbildung 2 dargestellt, nimmt dieser mit zunehmender Radlast ab. Dargestellt sind Werte im Temperaturgleichgewicht für vier Reifen.

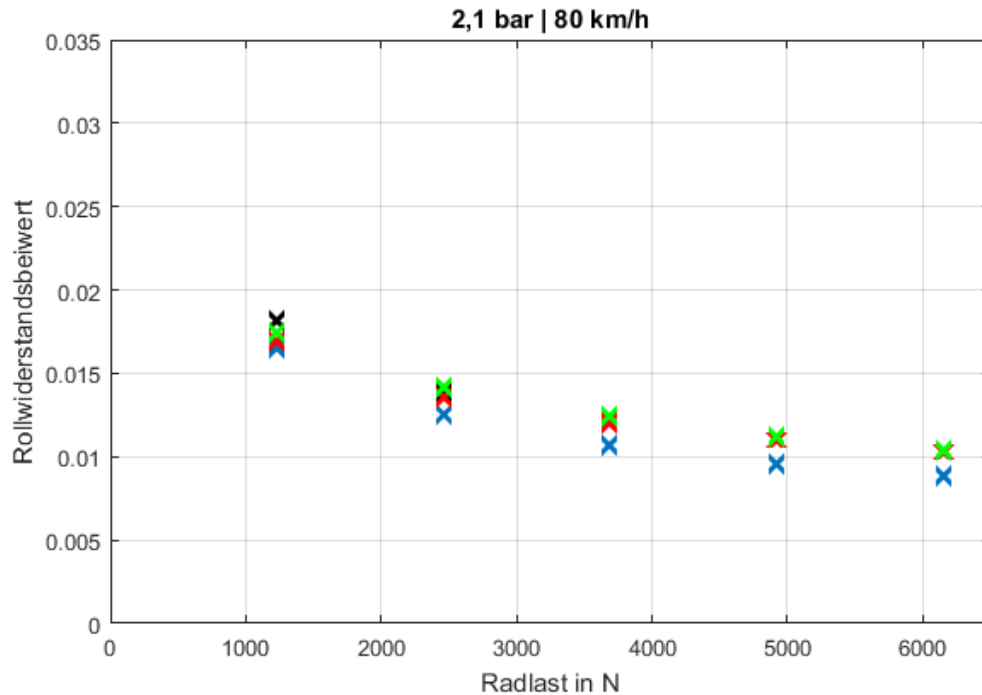


Abbildung 2: Radlastabhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwerts für vier Reifen

Eine Reifendruckerhöhung führt zu einer Reduzierung des Rollwiderstands, wie in Abbildung 3 für einen Reifen und verschiedene Radlasten dargestellt ist. Für die vermessenen Reifen ergibt sich eine mittlere Abnahme von 17 % des Rollwiderstands bei einer Erhöhung des Fülldrucks von 1,6 auf 3,1 bar im kalten Zustand. Die Abhängigkeit des Rollwiderstands vom Fülldruck, bezogen auf einen Referenzdruck, lässt sich durch die aus der Literatur bekannte Formel

$$F_r = F_{r,ref} \cdot \left(\frac{p_r}{p_{r,soll}} \right)^\beta$$

beschreiben. In Abbildung 3 sind die Kurven für einen Referenzdruck von 2,1 bar dargestellt und die ermittelten Koeffizienten aufgelistet. Die Rollwiderstandsreduzierung ist bei hohen Radlasten sehr ausgeprägt, bei geringen Radlasten je nach Reifen wesentlich geringer bis nicht messbar.

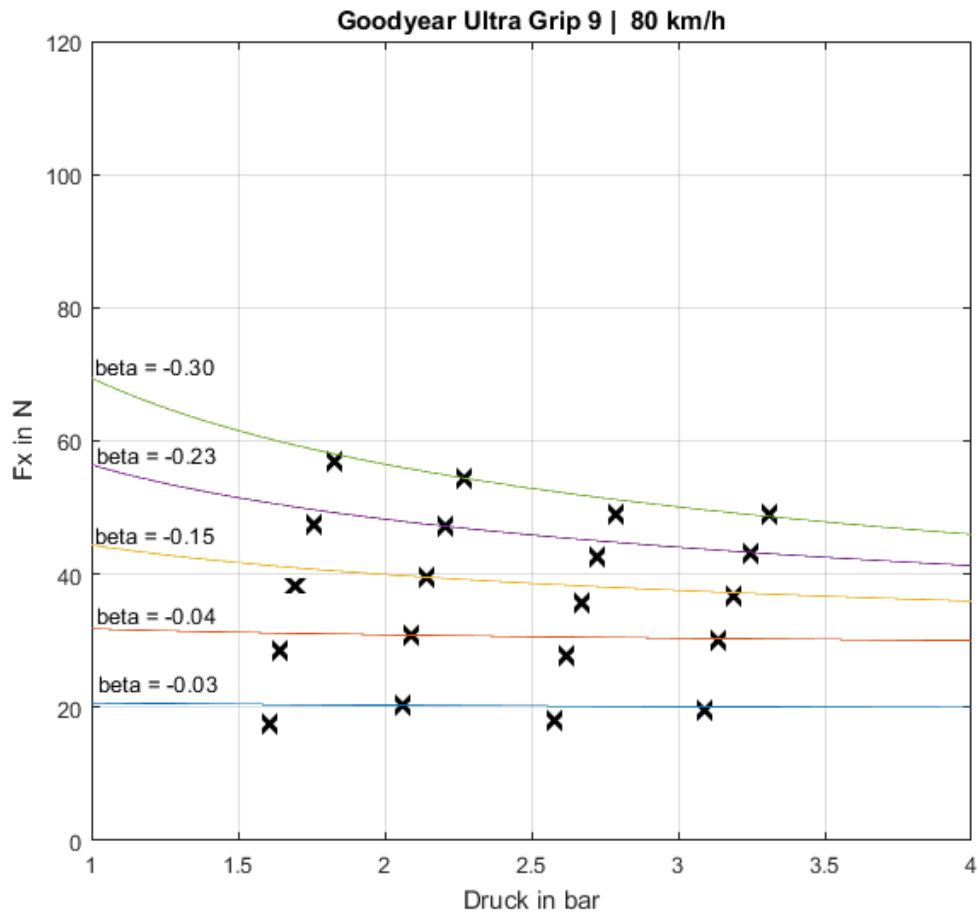


Abbildung 3: Variation des Fülldrucks für verschiedene Radlaststufen

Der Geschwindigkeitseinfluss ist im untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 120 km/h bei den Radialreifen sehr gering.

Der Sturz bewirkt eine Rollwiderstandserhöhung, die mit einem Polynom 2. Ordnung als Funktion des Sturzes sehr gut angenähert werden kann, wie in Abbildung 4 zu sehen ist.

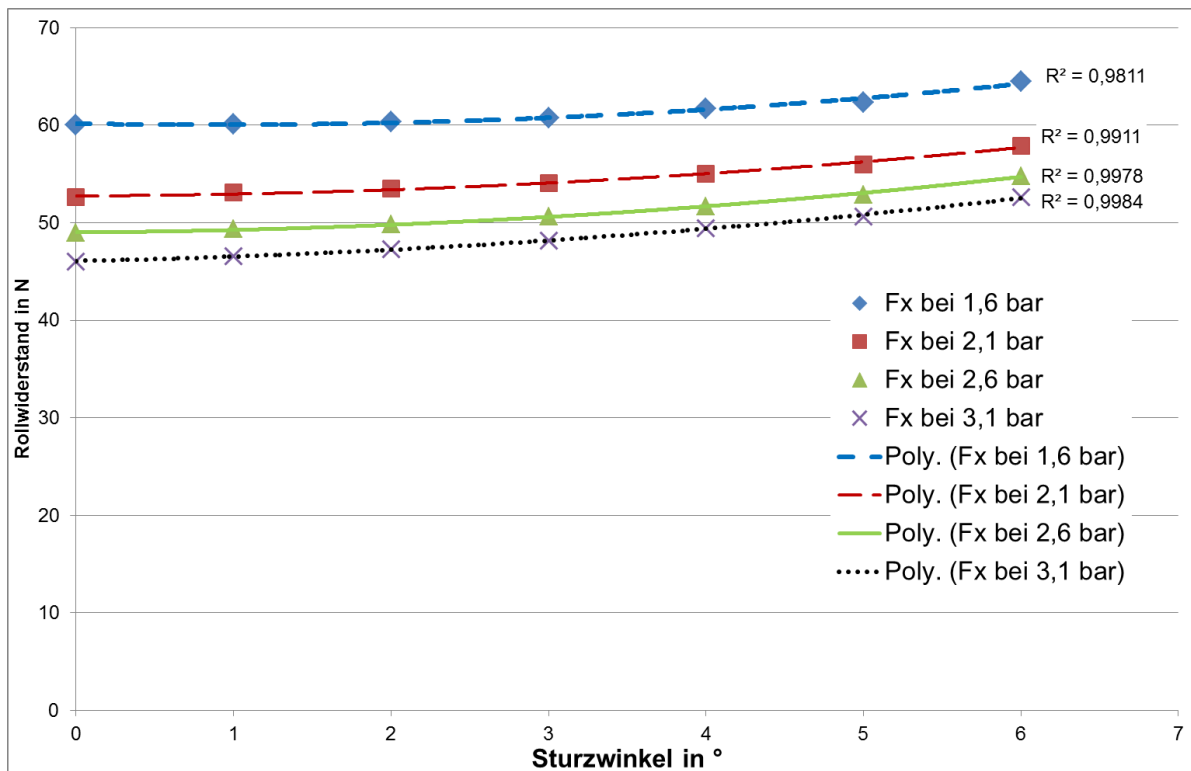


Abbildung 4: Rollwiderstand als Funktion vom Sturzwinkel für unterschiedliche Reifeninnendrucke bei 5000 N Radlast. Die dargestellten Messwerte wurden durch Mittelung aller Messwerte bei einem Sturzwinkel und einem Reifendruck gewonnen

Für kleine Beträge des Sturzes gilt die aus der Literatur bekannte Annahme, dass der Rollwiderstand pro Grad Sturz um ein Prozent steigt. Die Bedingung ist aber, dass der Reifendruck zur Radlast passt.

Die Variation des Schräglaufwinkels zeigt für sehr kleine Werte eine leichte Reduktion des Roll- und Radwiderstands, die durch eine Erhöhung der Reifentemperatur erklärt werden kann und in Abbildung 5 dargestellt ist. Die Betrachtung des Radwiderstands ist sinnvoll, da mit steigendem Schräglauf ein größer werdender Anteil der Seitenkraft als Kurvenwiderstand der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs entgegenwirkt.

Für die Bewertung bei höheren Schräglaufwinkeln, wie sie bei Kurvenfahrt auftreten, ist die Beurteilung bezogen auf die Seitenkraft sinnvoll, da eine Temperaturänderung auch die Schräglaufsteifigkeit verändert. In Abbildung 6 ist der Radwiderstand als Funktion der Seitenkraft aufgetragen. Aus der Darstellung wird deutlich, dass der Radwiderstand mit steigender Seitenkraft progressiv zunimmt. Eine Seitenkraft von 2000 N entspricht in diesem Beispiel einer Querschleunigung von 0,4 g und bewirkt knapp eine Verdoppelung des Radwiderstands gegenüber Geradeausfahrt.

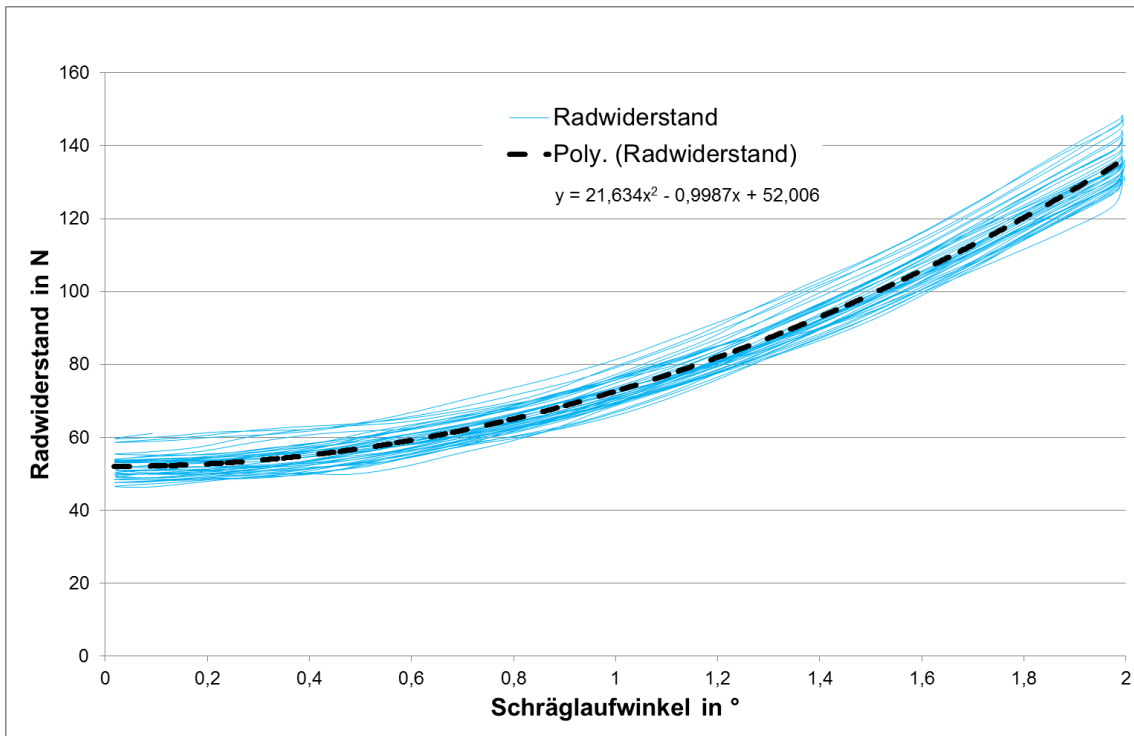


Abbildung 5: Radwiderstand als Funktion des Schräglaufwinkels

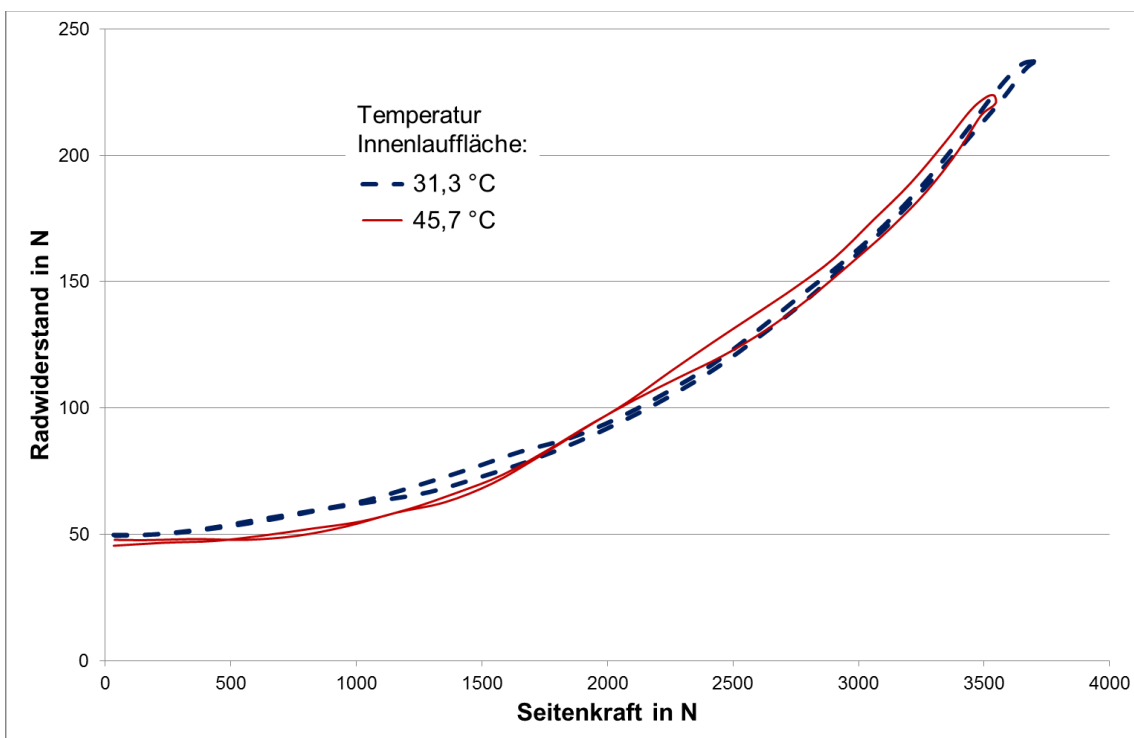


Abbildung 6: Radwiderstand als Funktion der Seitenkraft für zwei verschiedene Temperaturen bei 5000 N Radlast. Die dargestellten Messwerte wurden durch Mittelung aller Messwerte bei einem Sturzwinkel und einem Reifendruck gewonnen

Die Variation der Spur bzw. des Schräglaufwinkels zeigt, dass die heute gebräuchlichen Vorspurwinkel unter zehn Winkelminuten zu keiner merklichen

Fahrwiderstandserhöhung führen. Größere Schräglaufwinkel, wie sie bei Kurvenfahrt auftreten, reduzieren die in Richtung des Rades gemessene Längskraft, führen aber zusammen mit der schrägstehenden Seitenkraft zu einer merklichen Erhöhung des gesamten Radwiderstands.

Die Ergebnisse der Messungen wurden auf bekannte Rollwiderstandsmodelle angewendet und deren Abbildung der Messwerte bewertet. Die Güte der Repräsentation verschiedener Reifen durch das Modell erlaubt eine Beurteilung der Gültigkeit von Zusammenhängen von Einflussgrößen. Des Weiteren wurde überprüft, inwiefern mit einer möglichst kleinen Anzahl an Messungen durch einen solchen modelbasierten Ansatz eine vollständige Beschreibung des Rollwiderstandsverhaltens in Abhängigkeit von Radlast, Fülldruck und Geschwindigkeit möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer geeigneten Auswahl an Messpunkten eine Reduktion der nötigen Versuche erreicht werden kann.

Ziel der durchgeführten Straßenmessungen mit dem Pkw war es, das bei realer Fahrt auftretende Temperaturniveau zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturen am Reifen bei von Geradeausfahrten mit konstanter Geschwindigkeit geprägten Fahrprofilen geringer sind als am Prüfstand und daher ein etwas höherer Rollwiderstand erwartet werden kann. Um den Einfluss von Schräglauf und allgemein eines Fahrprofils mit höherer Dynamik darzustellen wurden weitere Untersuchungen durchgeführt.

Als Resultat der Messungen wurde ein thermisches Reifenmodell entwickelt, das die Prognose des Temperaturzustands der Reifen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen ermöglicht. Ein weiterer Ausbau des Modells und eine umfangreichere Validierung anhand von Messungen bei Straßenfahrten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Fahrprofilen sind in Bearbeitung.