

1.1. MOTIVATION

Der Reifen stellt das alleinige Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn dar, sodass über diesen alle Vertikal- und Horizontalkräfte übertragen werden müssen, weshalb der Reifen einen integralen Bestandteil des Fahrwerks widerspiegelt. An dieser Grundfunktionalität des Reifens hat sich seit seiner Erfindung nichts verändert. Allerdings führen die stetig steigenden Kunden- sowie Gesetzesanforderungen an die Automobilindustrie zu einem massiven Innovationsbedarf für den Reifen, welcher die Verbesserung seiner grundlegenden Funktion der Kraftübertragung maßgeblich übersteigt. In Abb. 1.1 ist ein Auszug aus Anforderungen eines Presetests aufgezeigt, die bei der Fahrzeug- und Reifenentwicklung Berücksichtigung finden müssen.

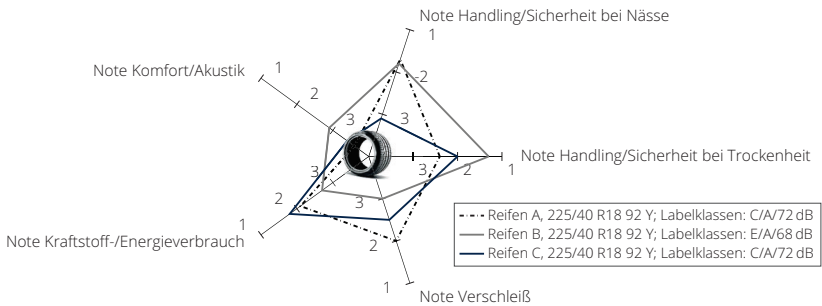


Abbildung 1.1.: Überblickender Auszug aus einem Presetest zur objektiven Beurteilung von UHP-Reifen der Dimension 225/40 R18 mit der Bewertungsskala 1 (*sehr gut*) bis 5 (*mangelhaft*) nach [Kro21]

Es ist ableitbar, dass die heutige Auslegung und Entwicklung von Reifen durch eine Vielzahl an Zielkonflikten geprägt ist. Insbesondere der Zielkonflikt zwischen Rollwiderstand und Bremsweg auf nasser Fahrbahn ist Untersuchungsgegenstand einer Vielzahl an Presetests und gilt trotz erheblicher Fortschritte bis heute als nicht vollständig beantwortet. Diese Thematik rückt erneut durch die zunehmenden Bestrebungen der Automobilindustrie die Elektromobilität einer breiten Masse der Bevölkerung zugänglich zu machen verstärkt in den Fokus gegenwärtiger und künftiger Fahrzeugentwicklungsprojekte. Denn nur durch die Minimierung sämtlicher Fahrwiderstände und Steigerung des Antriebsstrangwirkungsgrades sind kundennahe Reichweitenziele darstellbar. Diese Effizienzsteigerung ist ebenfalls in Hinblick auf die zunehmend strengeren gesetzlichen Limitierungen von CO₂-Emissionen für die Entwicklung von Fahrzeugen mit konventionellem Antriebskonzept von essenzieller Relevanz. Dabei besteht die eigentliche Problemstellung nicht in der Entwicklung von Reifen mit einem niedrigen Rollwiderstand, sondern in der Entwicklung von Reifen, die hinsichtlich Fahrdynamik und Sicherheit, Fahrkomfort sowie Effizienz einen zufriedenstellenden Kompromiss in ihren entsprechenden Charakteristika vereinen. Die hieraus ableitbare Problemstellung ist für die Kommunikation zwischen Automobil- und Reifenhersteller von zentraler Bedeutung. Abb. 1.2 ordnet den Reifenentwicklungsprozess überblickend in das V-Modell der Fahrzeugentwicklung ein.

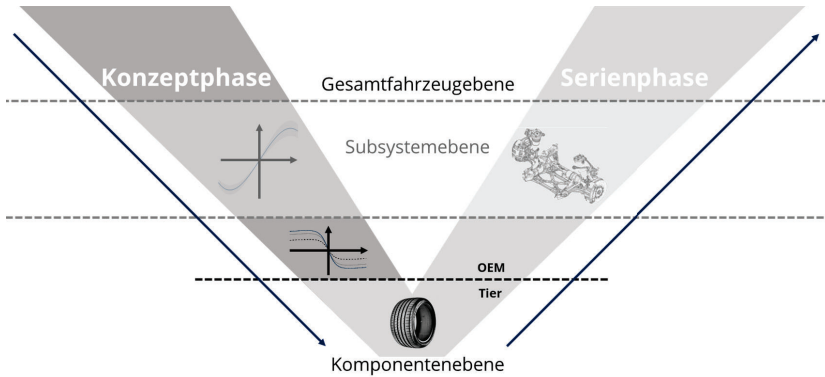


Abbildung 1.2.: Einordnung der Reifenentwicklung in das V-Modell des PEP; Achsdsdarstellung aus [Abe19]

Entsprechend der Randbedingungen und Positionierung im Umfeld der Wettbewerber werden ausgehend von Zielen auf Gesamtfahrzeugebene Ziele auf Subsystem- und schließlich Komponentenebene abgeleitet. [Abe+16] [Ang17] [SSM20] Anschließend werden gemäß der geschilderten Anforderungsdefinition objektive Kennwerte als Kommunikationsgrundlage an die Reifenhersteller übermittelt und die eigentliche Komponententwicklung beginnt. Analog zum PEP werden auf Grundlage von Erfahrungswerten, Vorhersagemodellen und komplexen FEM-Modellen virtuelle Prototypen erarbeitet, die nach diversen Iterationen als reale Komponenten aufgebaut werden. Trotz der Nutzung objektiver Kennwerte und teils komplexer Modellierungsansätze, erfolgt die finale Abstimmung des Reifens anhand subjektiver Beurteilungen auf Seiten des Automobilherstellers. Für diesen sehr aufwendigen Schritt sind meist mehrere Iterationschleifen erforderlich.

Aufgrund der stetig zunehmenden Derivatevielfalt sowie der Verkürzung der Entwicklungszeiten ist eine Effizienzsteigerung dieses Entwicklungsprozesses durch den Einsatz von virtuellen Entwicklungsmethoden sowie einer validen Objektivierungsmethodik unerlässlich. Dementsprechend ist für die zielgerichtete Anforderungsdefinition seitens des Automobilherstellers ein tiefgreifendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen objektiven Reifenkennwerten erforderlich. Dieser Erkenntniszuwachs kann dabei nicht durch den Einsatz neuer Entwicklungsmethoden, wie die Nutzung von dynamischen Fahrsimulatoren, ersetzt, sondern lediglich unterstützt werden. Hieraus resultiert die mit der vorliegenden Arbeit adressierte Zielstellung.

1.2. ZIELSETZUNG UND STRUKTUR DER ARBEIT

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Identifikation und Analyse von Wechselwirkungen zwischen objektiven Reifenkennwerten, welche die Komponenteneigenschaften in Hinblick auf Fahrdynamik, Fahrkomfort und Energieeffizienz prägen, ab (Ziel Z_1). Weiterhin ist in diesem Zusammenhang zu untersuchen, inwiefern die identifizierten Wechselwirkungen auf konstruktive und materialtechnische Reifenparameter zurückzuführen sind (Ziel Z_2). Demnach werden Einflüsse aus der Reifendimensionierung nicht berücksichtigt, da diese wesentlich von Design und Package des Fahrzeugs bestimmt werden.

Darauf aufbauend sollen anhand von konstruktiven und materialtechnischen Reifenparametern Maßnahmen zur Beeinflussung objektiver Reifencharakteristika und deren Auswirkungen auf das objektiv beschreibbare Gesamtfahrzeugverhalten hinsichtlich Fahrdynamik, Fahrkomfort und Energieeffizienz untersucht werden (Ziel Z₃). Auf Grundlage des resultierenden Verständnis der Wirkzusammenhänge wird die teils konträre Zielwertableitung von Gesamtfahrzeug- auf Komponentenebene in Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit unter gegebenen Randbedingungen bewertbar. Daran anschließend sollen als zentrale Zielstellung der vorliegenden Arbeit Ansätze zur Auflösung der potenziell bestehenden Zielkonflikte auf Komponenten- und Gesamtfahrzeugebene durch konstruktive und materialtechnische Maßnahmen im Reifen abgeleitet werden (Ziel Z₄). Zur Bestätigung der abgeleiteten Zusammenhänge sowie zur Unterstützung bei der Identifikation etwaiger Lösungsansätze ist ein Reifenmodell mit physikalischem Ansatz auszuarbeiten, welches das Reifenverhalten anhand einflussreicher objektiver Kennwerte widerspiegeln kann (Ziel Z₅). Zur Beurteilung des Einflusses von Reifeneigenschaften auf Fahrdynamik-, Fahrkomfort- und Effizienzziele der Gesamtfahrzeugebene ist für die Anforderungsdefinition ein kompakter Satz objektiver Reifenkennwerte auszuarbeiten, welcher bereits in frühen Phasen des PEP anwendbar ist (Ziel Z₆). Weiterhin ist abzuschließen, dass die identifizierten Interaktionen auf Gesamtfahrzeugebene mittels virtueller Methoden des frühen PEP abgebildet werden können (Ziel Z₇).

Abschließend soll die These geprüft werden, ob von objektiven Reifeneigenschaften zurück auf konstruktive und materialtechnische Reifenparameter geschlossen werden kann (Ziel Z₈). Die grundlegende Struktur der vorliegenden Arbeit, welche zur Bearbeitung der Zielstellung angewendet wird, kann durch Abb. 1.3 nachvollzogen werden.

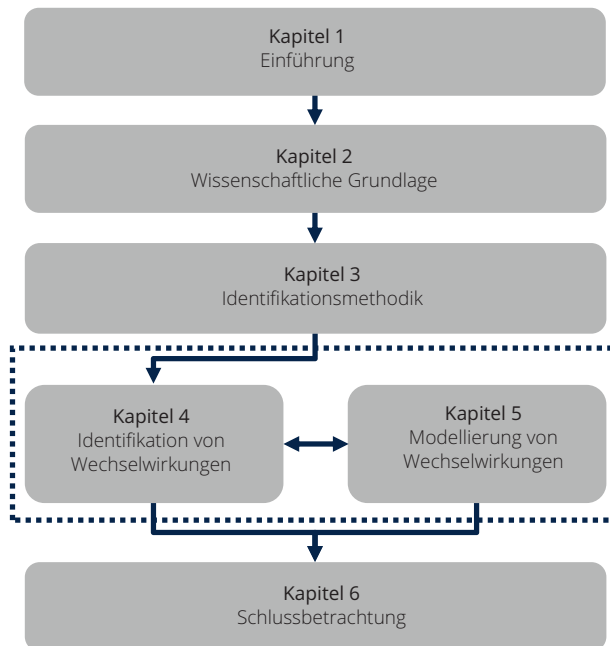


Abbildung 1.3.: Übersicht zur Struktur der vorliegenden Arbeit

2. WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Entsprechend der in Kap. 1 gesetzten Aufgabenstellung sollen in der vorliegenden Arbeit die Wechselwirkungen zwischen Reifeneigenschaften sowie deren Einfluss auf das Gesamtfahrzeugverhalten identifiziert und analysiert werden. Einen zentralen Untersuchungsgegenstand bilden dabei konstruktive und materialtechnische Reifeneigenschaften, weshalb zu Beginn ein Überblick zum konstruktiven Aufbau sowie zu Funktionen der Reifenbestandteile gegeben wird. Dabei wird vertiefend auf Eigenschaften von Elastomeren eingegangen. In den folgenden Abschnitten wird der bisherige Kenntnisstand zu objektiven Bewertungsmethoden von Fahrdynamik, Fahrkomfort sowie Energieeffizienz und den bestehenden Wechselwirkungen zwischen den dedizierten Reifeneigenschaften betrachtet. Abschließen erfolgt eine Diskussion des bestehenden Kenntnisstandes im Kontext der eingangs gesetzten Zielstellung.

2.1. GRUNDLAGEN ZUM KONSTRUKTIVEN REIFENAUFBAU UND MATERIALVERHALTEN VON ELASTOMEREN

Zunächst wird der konstruktive Aufbau von Reifen sowie die Funktion der einzelnen Bestandteile überblickend beschrieben. Anschließend wird aufgrund der zentralen Bedeutung vertiefend auf die viskoelastischen Eigenschaften von Elastomeren eingegangen.

2.1.1. GRUNDLAGEN ZUM KONSTRUKTIVEN AUFBAU VON REIFEN

Der Reifen stellt eine komplexe Komponente des Fahrwerks dar und setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Materialien zusammen. Gegenwärtig weist der Radialreifen mit Stahlgürtel die höchste Verbreitung für die Anwendung im Pkw-Sektor auf. Der prinzipielle Aufbau eines Stahlgürtelreifens, welcher aus über 20 verschiedenen Gummimischungen bestehen kann, ist in Abb. 2.1 dargestellt. [Lei15]

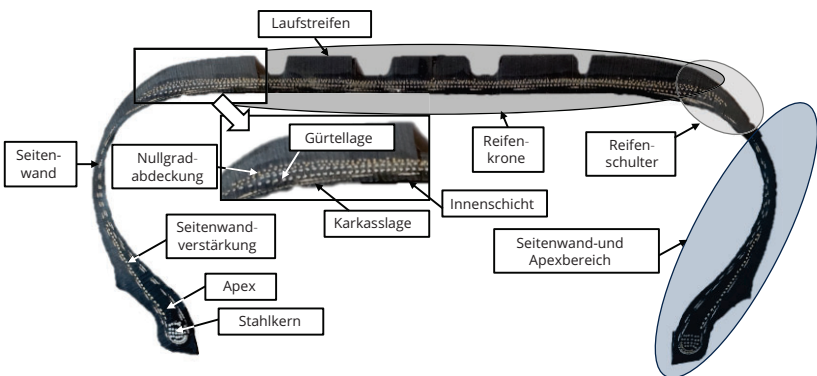


Abbildung 2.1.: Überblick zum konstruktiven Aufbau von Pkw-Radialreifen anhand eines Reifenquerschnittes

Der **Stahlkern** besteht aus mit Elastomeren ummantelten Stahldrähten, welche in diversen Durchmessern und Konfigurationen angeordnet sind. Dieser gewährleistet den Sitz des Reifens auf der Felge und beeinflusst damit das Fahrverhalten. Darüber befindet sich der **Apex**, welcher den Raum zwischen der umgeschlagenen Karkasslage füllt. Die Apexhöhe und Steifigkeit des eingesetzten Elastomers prägt Lenkpräzision und Fahrstabilität sowie

2. Wissenschaftliche Grundlagen

die vertikale Federsteifigkeit. Neben dem **Apex** befindet sich zur Außenseite gerichtet die optionale **Seitenwandverstärkung**, welche vornehmlich aus Nylon oder Aramid besteht. Analog zum **Apex** dient die Seitenwandverstärkung zur Verbesserung von Fahrstabilität und Lenkpräzision. In Hinblick auf Reifen mit Notlauf Eigenschaften, wird die Seitenwand durch zusätzlichen Einsatz von Elastomeren oder zusätzliche Seitenwandverstärkungen versteift, um die Resttragfähigkeit sowie Fahrstabilität des Reifens bei vollständigem oder teilweise Fülldruckverlust zu gewährleisten. Die **Seitenwand** besteht aus Natur- oder Synthekautschuk und schützt die Karkasse vor seitlichen Beschädigungen sowie vor Witterungseinflüssen. Weiterhin dient dieser Reifenbestandteil als Designmerkmal und Beschriftungsträger. Durch Materialbeschaffenheit und Geometrie werden darüber hinaus Fahrdynamik sowie Fahrkomfort beeinflusst. Die nach innen abschließende dünne Elastomerschicht, welche als **Innenschicht** bezeichnet wird, gewährleistet die Luftdichtheit von schlauchlosen Reifen. Darüber sind die ein- oder mehrschichtigen **Karkasslagen** angeordnet, die aus radialen mit Gummi kalandrierten Polyester- oder Rayonfasern aufgebaut sind. Die gewöhnlich zweilagig aufgebauten Karkasslagen orientieren sich etwa 90° zur Fahrtrichtung und stellen den wesentlichen Dauerfestigkeitsträger des Reifens dar. Durch die Gestaltung der Karkasslagen wird die Formbeständigkeit gegenüber dem Reifendruck geprägt. Eine **Gürtellage** besteht aus gummiertem Stahlcord in einem definierten Winkel zur Laufrichtung. Der Gürtel besteht mindestens aus zwei gegenläufig übereinander gelegten Stahlcord-Gürtel einlagen, welche aus verdrehten Stahldrähten in einer Elastomerschicht gefertigt sind. Die Stahldrähte werden teils mit Messing überzogen. Insbesondere querdynamische Reifencharakteristika werden durch die Gürtellagen bestimmt. Weiterhin sind durch die Gestaltung der Gürtellagen Rollwiderstand und Laufleistung positiv beeinflussbar. Der Reifenaufbau schließt mit der **Nullgradabdeckung** ab. Diese ist meist aus Nylon gefertigt und für die Hochgeschwindigkeitstauglichkeit des Reifens verantwortlich. In der Reifenkrone ist der **Laufstreifen** von den **Reifenschultern** eingeschlossen. Der Laufstreifen ist mehrlagig aufgebaut und besteht aus einer Mischung von Elastomeren, Füllstoffen, Verstreckungsölen, Alterungsschutzmitteln und Vulkanisationsmitteln. Dabei sind Ruß und Kieselsäure wesentliche Füllstoffe des Laufstreifens und führen zu einer Verbesserung des Abriebverhaltens sowie des Rollwiderstandes. Verstreckungsöle werden zur Erhöhung der Verarbeitbarkeit der Mischungen eingesetzt. Um Schädigungen durch Ozonwirkungen vorbeugen, werden Alterungsschutzmittel verwendet. Das Vulkanisationsmittel, das neben Schwefel unter anderem aus Stearinsäure und Zinkoxid besteht, ist für die Vernetzung während des Vulkanisationsprozesses erforderlich. Durch die Vulkanisation in der Reifenfertigung werden die Polymerstränge des Kautschuks bei Temperaturen von über 170 °C mittels Schwefelbrücken untereinander vernetzt, wodurch der Kautschuk in ein Elastomer überführt wird. Hauptaufgabe des Laufstreifens ist die Kraftübertragung beim Beschleunigen, Bremsen, Kurvenfahrt oder kombinierten Betriebszuständen. Das eingesetzte Laufstreifenelastomer stellt in der Eigenschaftsausprägung stets einen Kompromiss zwischen Verschleiß, Traktion, Fahrstabilität, Geräuschemission, Fahrkomfort und Rollwiderstand dar. Unterhalb der obersten Laufstreifenmischung, welche in direktem Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche steht, ist meist eine weitere Elastomerschicht mit niedriger Materialhysterese angeordnet. Diese dient demnach zur Reduzierung des Rollwiderstandes und weiterhin zur Optimierung von akustischem und mechanischem Fahrkomfort sowie der Fahrdynamik. Zwischen Laufstreifen und Nullgradabdeckung ist eine hochadhäsive Elastomerlage angeordnet, welche die Reifenkonstruktion während des Aufbaus stabilisiert. Durch die Profilierung des Laufstreifens werden ebenfalls Geräuschemissionen, der Verschleiß, Aquaplaning und der Reibwert auf nasser Fahrbahn beeinflusst. [GW05] [Lei15]

2.1.2. VISKOELASTISCHES MATERIALVERHALTEN

Aufgrund der Bedeutung von Elastomer- und Gummwerkstoffen, welche insbesondere die Kraftübertragung des Reifens maßgeblich prägen, werden im folgenden Abschnitt die in Abb. 2.2 veranschaulichten viskoelastischen Materialeigenschaften dieser Werkstoffe genauer beschrieben.

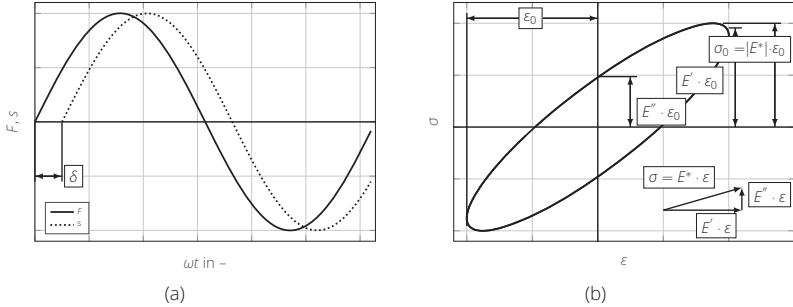


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung des (a) aus dem viskoelastischen Materialverhalten resultierenden Phasenverzuges und (b) der damit verbundenen Verluhysterese von Elastomeren nach [Cla71]

Gemäß Abb. 2.2 folgt aus dem Phasenverzug δ zwischen Krafteinwirkung F und Verformung s des Elastomers eine Materialhysterese. Dazu sind Kräfte F und Verformungen s anhand der geometrischen Abmessungen der Materialprobe durch Gln. 2.1 und Gln. 2.2 in Spannung σ und Dehnungen ϵ zu überführen. [Cla71]

$$\sigma = \frac{F}{A_q} \tag{2.1}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2.2}$$

Das aus Spannung σ und Dehnung ϵ ableitbare komplexe Elastizitätsmodul E^* kann nach Gln. 2.3 bis Gln. 2.5 in einen Real- und Imaginäranteil aufgliedert werden, welche als Speicher- und Verlustanteil E' sowie E'' interpretierbar sind.

$$E^* = E' + iE'' \tag{2.3}$$

$$E' = E^* \cdot \cos \delta \tag{2.4}$$

$$E'' = E^* \cdot \sin \delta \tag{2.5}$$

Mit Hilfe von Gln. 2.6 kann das komplexe E-Modul E^* in das für die Kraftübertragung des Reifens relevantere und durch Gln. 2.7 beschriebene komplexe Schubmodul G^* übertragen werden. Unter der Annahme, dass sich das Elastomer annähernd inkompressibel verhält, ergibt sich eine Poissonzahl ν von 0,5. In diesem Fall entspricht das komplexe Schubmodul näherungsweise einem Drittel des komplexen Elastizitätsmoduls.

$$G^* = \frac{1}{2(1 + \nu)} \cdot E^* \approx \frac{E^*}{3} \tag{2.6}$$

$$G^* = G' + iG'' \tag{2.7}$$

2. Wissenschaftliche Grundlagen

Aus dem Verhältnis von Speicher- und Verlustanteil des komplexen Schubmoduls ist nach Gln. 2.8 der Verlustbeiwert $\tan \delta$ als das Verhältnis dieser Anteile bestimmbar. Demnach stellt der Verlustbeiwert ein Maß für die hysteresebedingten Energieverluste bei der Verformung des Elastomers dar.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (2.8)$$

Der Verlustbeiwert $\tan \delta$ zeigt in Analogie zu dem Verlust- und Speichermodul des komplexen Schubmoduls eine Abhängigkeit von einer Vielzahl an Betriebsbedingungen auf (Frequenz f , Temperatur T , Dehnung ϵ , ...). Aufgrund der besonderen technischen Relevanz ist demnach in Abb. 2.3 der Verlauf des Verlustbeiwertes $\tan \delta$, des Speicher- und Verlustschubmoduls G' sowie G'' über der Frequenz f dargestellt.

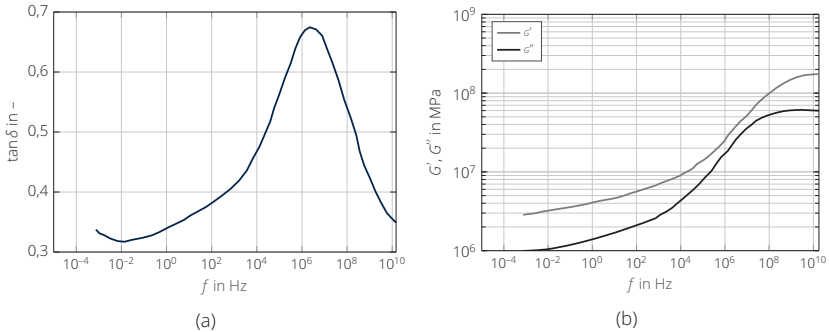


Abbildung 2.3.: Exemplarische Darstellung der Frequenzabhängigkeit (a) des Verlustbeiwertes $\tan \delta$ und (b) des Speicher- und Verlustanteils des komplexen Schubmoduls G' sowie G'' von Elastomeren für $T_{\text{ref}} = 70^\circ$ bei 3% Schu- bplamplitude nach [LK17]

Im Frequenzbereich der Raddrehzahl (10 bis 100 Hz) zeigt der Verlustbeiwert $\tan \delta$ ein annähernd konstantes und vergleichsweise niedriges Niveau auf. Dieser niederfrequente Bereich ist für den Rollwiderstand des Reifens ausschlaggebend, weshalb in diesem Bereich ein niedriger Wert anzustreben ist. Im Gegensatz dazu weist der Verlauf des Verlustbeiwert im höherfrequenten Bereich (10×10^4 bis 10×10^6 Hz) ein ausgeprägtes Maximum auf, welches für die hysteresebedingten Reibungsmechanismen von entscheidender Bedeutung ist. Folglich führen höhere Verlustbeiwerte in diesem Frequenzbereich zu einem höheren Reibwertniveau. Insbesondere bei niedrigen Temperaturen oder Nässe wird durch diesen Zusammenhang ein wesentlicher Zielkonflikt zwischen niedrigen Rollwiderstandsbeiwerten f_r und hohen Reibwerten μ ersichtlich. [Sch+10] Zur Bestimmung der in Abb. 2.3 gezeigten Frequenzabhängigkeit des komplexen Schubmoduls wird eine DMA durchgeführt. Allerdings ermöglicht eine DMA infolge von Limitierungen der zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtung lediglich Auswertungen im Frequenzbereich von deutlich unterhalb 10×10^4 bis 10×10^6 Hz. Aufgrund des breiten Frequenzspektrums, welches zur Charakterisierung des Elastomers abgedeckt werden muss, wird die empirische WLF-Beziehung, benannt nach WILLIAMS, LANDEL und FERRY, für diese Materialcharakterisierung genutzt. Grundsätzlich sagt diese Beziehung aus, dass sich eine Absenkung der Elastomertemperatur bei einer Anregung durch Kraft oder Verformung äquivalent zu einer Erhöhung der Anregungsfrequenz auswirkt und umgekehrt. [LK17] Dementsprechend kann durch Gln. 2.9 und Gln. 2.10 ein Materialverhalten, welches bei einer festen Anregungsfrequenz $f_{\text{Anr},0}$, aber verschiedenen Temperaturen bestimmt worden ist, über ein breites Frequenzspek-