Wolfgang Schmid (Autor)

Entwicklung eines aktiven Radträgers zur Beeinflussung des Fahrverhaltens von Straßenfahrzeugen

https://cuvillier.de/de/shop/publications/6622

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einleitung

Dieses Kapitel führt zunächst auf eine zentrale Problemstellung der Fahrwerksentwicklung hin und veranschaulicht die Motivation, einen neuen Fahrwerksaktuator zu entwickeln. Davon ausgehend werden die Ziele dieser Arbeit definiert.

1.1 Problemstellung

Das Fahrwerk eines Fahrzeugs beeinflusst in großem Maße dessen Fahrdynamik- und Komforteigenschaften. Die Entwicklung befindet sich dabei im Spannungsfeld zwischen kinematischen und elastokinematischen Größen, Package, Kosten und Gewicht. Die gewünschten Komfortziele sowie die fahrsituativ abhängige Positionierung des Rades zur Straße (Fahrdynamik) bestimmen mit der jeweiligen Achskonstruktion die Orientierung der spezifischen Kinematikpunkte und deren Raumbedarf im Fahrzeug.

Aus fahrdynamischer Sicht stellt das Fahrwerk mit seinen kinematischen und elastokinematischen Größen eine offene Wirkungskette dar. Die am Reifen angreifenden Kräfte wirken auf die Kinematik und Elastokinematik der Achse, was zu einer veränderten Radposition führt. Die Neuorientierung des Rades beeinflusst die Reifenkräfte, die wiederum das Fahrverhalten bestimmen.

Eine Herausforderung besteht darin, mit den signifikanten Größen der Kinematik und Elastokinematik die Radposition einzustellen, die für die jeweilige Fahrsituation als optimal angesehen wird.

Um hier möglichst unabhängig auf jede Kombination an Kraftrichtungen unterschiedlich reagieren zu können, ist die Achsentwicklung stetig vorangeschritten. Heutige Mehrlenkerachsen besitzen das größtmögliche Abstimmpotential. Trotzdem sind hier viele Größen noch nicht unabhängig voneinander einstellbar.

Aufgrund der vielen Abhängigkeiten halten immer mehr mechatronische Fahrwerkssysteme Einzug, welche durch ihre aktiven Eingriffe eine weitere Eigenschaftsspreizung ermöglichen. Viele dieser Systeme verändern die Vertikaldynamik des Rades, wie z.B. geregelte Dämpfersysteme oder aktive Stabilisatoren. Durch den Eingriff in die Vertikaldynamik ändern sich in Folge dessen die dynamischen Reifennormalkräfte, die wiederum Einfluss auf die Querdynamik nehmen.

Aktive Lenksysteme wie die Überlagerungslenkung an der Vorderachse oder Lenkwinkelsteller an der Hinterachse können den Schräglaufwinkel des Rades und somit die Reifenseitenkräfte verändern.

Aktive Systeme zur Sturzwinkelbeeinflussung des Rades befinden sich im Forschungsstadium und ermöglichen, das Übertragungspotential des Reifens in lateraler Kraftrichtung zu erhöhen [47], [48], [46]. Ein aktives System, dass beide Raumwinkel des

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Rades zur Karosserie beeinflusst, vermag viele Zielkonflikte aufzulösen [47], [48], [46]. So ist es möglich, signifikante situationsabhängige Vorspur- und Sturzwerte unabhängig von den anliegenden Reifenkräften einzustellen. Dies ermöglicht den Reifen abhängig von der Fahrsituation in die optimalste Winkellage zur Fahrbahn zu bringen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Aktors, der den Spur- und Sturzwinkel des Rades unabhängig voneinander beeinflussen kann. Dabei soll dieses System an der Hinterachse eines heutigen allradbetriebenen Fahrzeugs integrierbar sein, ohne dessen Achskonzept und Bremskonzept radikal ändern zu müssen. Der Aktor muss unter allen fahrdynamisch auftretenden Kräften imstande sein, die Ausrichtung des Rades dynamisch verändern zu können.
Dazu sollen zunächst aktive Systeme zur Beeinflussung der Radausrichtung diskutiert und bewertet werden, um Anforderungen und Randbedingungen an das neue System zu definieren.
Anhand der gewonnen Erkenntnisse, Vorgaben und Randbedingungen soll ein neues Konzept für einen aktiven Radträger erstellt werden, das diesen Forderungen nach kommt.
Der aktive Radträger soll an einem Versuchsfahrzeug integriert werden. Dazu sind alle relevanten Auslegungsuntersuchungen analytisch als auch anhand von Simulationsmodellen durchzuführen.
Ziel ist dabei die mechanische und elektromechanische Auslegung des Systems, sodass es ohne Einschränkungen unter dem Gesichtspunkt des Ganzjahresbetriebs eingesetzt und erprobt werden kann.
Die aktive Beeinflussung des Sturzwinkels und die damit verbundenen fahrdynamischen Auswirkungen sollen mithilfe von Gesamtfahrzeugsimulationen und Fahrversuchen aufgezeigt und diskutiert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel gliedert sich in vier Themengebiete. Zu Beginn werden im Grundlagenteil die verschiedenen Mechanismen zum Seitenkraftaufbau des Reifens im Reifen-Fahrbahnkontakt diskutiert. Dabei werden die Unterschiede im Seitenkraftaufbau aus Schräglaufwinkel und Sturzwinkel erläutert. Entscheidend sind dabei Überlagerungseffekte, welche das Reifenseitenkraftpotential bis an die physikalischen Grenzen ausnutzen.
Im nächsten Abschnitt wird auf die Fahrwerksentwicklung allgemein eingegangen. Im Fokus stehen dabei die Zielkonflikte und Restriktionen, die sich eigenschaftlich durch passive Fahrwerke ergeben. Es wird ein mögliches Lösungsszenario durch aktive mechatronische Systeme aufgezeigt. Der Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf die Verbesserung der Querdynamik und das maximale Seitenübertragungspotential. Im Stand der Forschung und Technik werden zunächst beispielhaft übergeordnete aktive Systeme an der Hinterachse aufgezeigt. Schlussendlich liegt der Fokus auf dem Radträger und dessen technischen Umsetzungen zur variablen und dynamischen Einstellung von Spur- und Sturzwinkel. Dabei werden auch Lösungen und Lösungsansätze aus der Patentliteratur diskutiert.
Aus den Erkenntnissen des aktuellen Technikstandes und der physikalischen Effekte des Reifen-Fahrbahnkontakts erfolgt am Ende dieses Kapitels eine Zieldefinition. Aus diesen Zielen werden Anforderungen an einen aktiven Hinterachsradträger zur dynamischen und radindividuellen Verstellung von Spur- und Sturzwinkel abgeleitet.

2.1 Reifeneigenschaften

Der Reifen als Bindeglied zwischen Fahrbahn und Fahrzeug hat einen sehr großen Einfluss auf das Fahrverhalten des Fahrzeuges. Durch Freischneiden an der Reifenkontaktzone zur Straße wird ersichtlich, dass neben der Aerodynamik sämtliche Kräfte und Momente des Fahrzeugs über die Kontaktflächen des Reifens abgestützt werden [25]. Der Reifen trägt somit signifikant zum Längs- und Querdynamikverhalten des Fahrzeuges bei.
Die Wechselwirkungen des Lagen- und Profilaufbaus und die Reibcharakteristika der Gummimischung erzeugen unterschiedlichste Phänomene, die sich auf den Reifenfahrbahnkontakt auswirken. Übergeordnet behalten jedoch die in dieser Arbeit diskutierten allgemeinen Modellvorstellungen zum Seitenkraftaufbau und deren Beitrag zum querdynamischen Fahrzeugverhalten ihre Gültigkeit. Soweit nicht anders beschrieben gelten die aufgeführten Modelle am frei rollenden Rad ohne transiente Einflüsse. Für weiterführende Vertiefung auf diesem Gebiet sei auf nachstehende Literatur hingewiesen: [49], [25], [42], [17] und [29].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In den nächsten Abschnitten wird nun näher auf die beiden Entstehungsmechanismen der Reifenseitenkraft eingegangen.

2.1.1 Seitenkraft durch Schräglaufwinkel

Der Reifen mit seinen Profilstollen und seinem Karkassenaufbau stellt keine starre Konstruktion dar, sondern lässt sich abhängig von den auftretenden Kräften zur Drehachse unterschiedlich leicht dehnen, verbiegen und tordieren. Dieses kraftinduzierte Ausweichen des Reifens und der dadurch auftretende Querschlupf im Fahrbahnkontakt werden durch kinematische Größen beschrieben. An Hand derer können Reifencharakteristik und Auswirkungen auf das Fahrverhalten abgeleitet werden.

In **Bild 2.1** ist ein Reifen abgebildet, dem eine Kraft F_s normal zu seiner Längsachse aufgeprägt wird. Diese stützt sich in Form der selben Seitenkraft F_s im Reifen-Fahrbahnkontakt ab. Nun ist zu beobachten, dass der Reifen in seiner Rollbewegung der Kraft F_s ausweicht. Dies führt zu einer Geschwindigkeit V_y, die normal zur Reifenlängsgeschwindigkeit V_x steht. Aus der Längs- und Quergeschwindigkeit resultiert die tatsächliche Geschwindigkeit V des frei rollenden Reifens unter Seitenkraft. Der

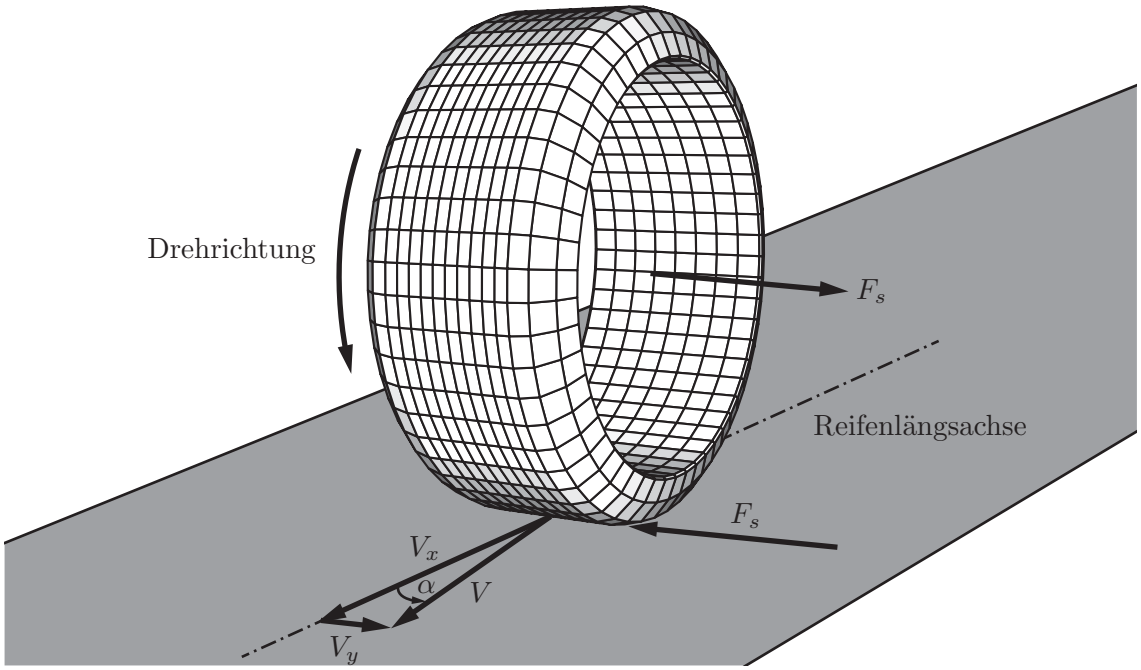

Bild 2.1: *Entstehung des Schräglaufwinkels α bei einem frei rollenden Rad unter Seitenkraft F_s. Durch elastische Nachgiebigkeit des Gummis und Gleiten des Reifens auf der Fahrbahnoberfläche entsteht zur Längsgeschwindigkeitskomponente V_x eine Quergeschwindigkeitskomponente V_y und eine daraus resultierende Geschwindigkeit V. Der Winkel zwischen der Reifenlängsachse und der resultierenden Geschwindigkeit V wird als Schräglaufwinkel α bezeichnet (Zusammenfassung aus [32], [25], [29] und [20]).*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Winkel zwischen dem resultierenden Vektor V und der Längsachse des Reifens wird als Schräglaufwinkel α bezeichnet [32], [25].
In Abhängigkeit vom Reifen ergibt sich in einem Winkelbereich von $\alpha \leqq 3 - 4°$ ein konstanter Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkel und Seitenkraft. Ab dieser reifenindividuellen Grenze gerät der Reifen in Sättigung und die Seitenkraft fällt bei weiter steigendem Schräglaufwinkel wieder ab [25].

Um dieses Phänomen besser beschreiben zu können, muss die Reifenaufstandfläche näher betrachtet werden. Im linken **Bild 2.2** ist der Reifen aus Bild 2.1 in Unteransicht dargestellt. Eingezeichnet ist wiederum die Seitenkraft F_s, die von der Straße abgestützt wird. Im Einlaufbereich (Bereich zwischen grüner und schwarzer Querlinie) haften alle Profilelemente auf der Straße. Es kommt es zur elastischen Aus-

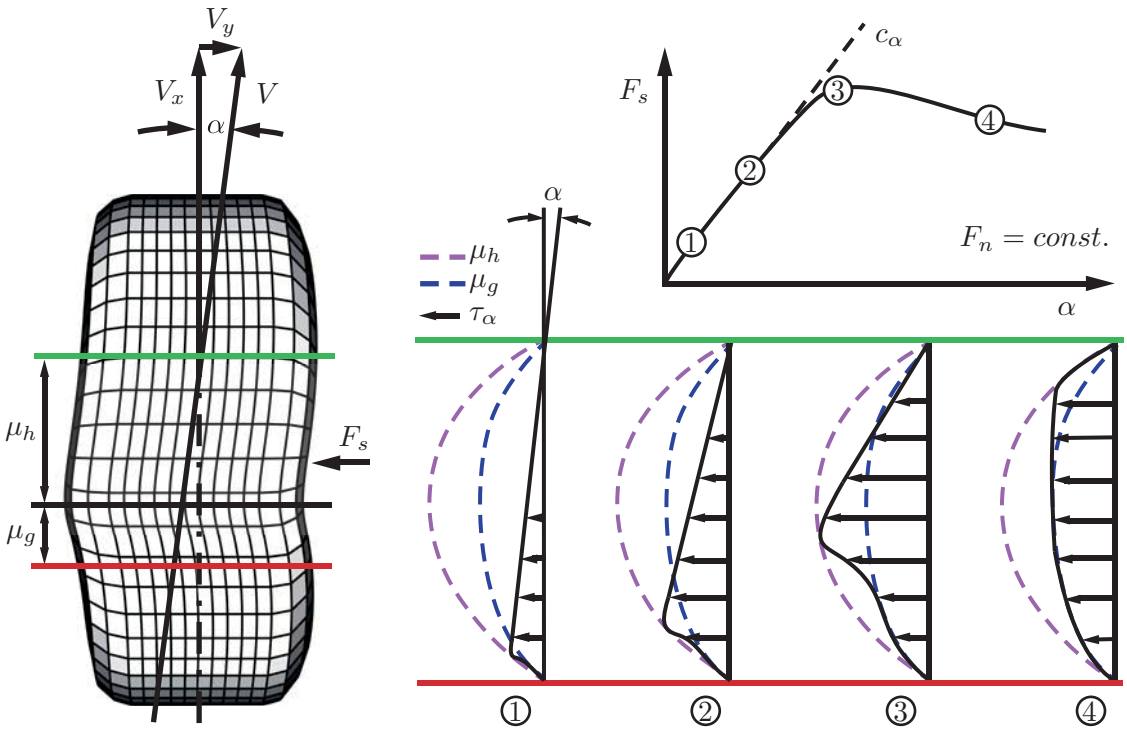

Bild 2.2: *Links: Unteransicht des Reifens aus Bild 2.2 der unter Seitenkraft F_s abrollt. Im Einlaufbereich haften die Profilstollen, wodurch diese kinematisch verformt werden und sich der Schräglaufwinkel α einstellt. Im Auslaufbereich gehen die Profilstollen ins Gleiten über und nehmen ihre ursprüngliche Position ein.*
Rechts: Vergrößerte Ansicht der Reifenaufstandsfläche mit Linien maximaler Haft- und Gleitreibung μ_h und μ_g. Dargestellt sind die Verformungen der Profilstollen und resultierender Schubspannung für steigende Schräglaufwinkel bei konstant wirkender Normalkraft F_n auf den Reifen. Darüber ist das korrespondierende Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Diagramm für die vier Fälle dargestellt. (Zusammenfassung aus [32], [25], [29], [37], [26], [42] und [20]).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

lenkung der Reifenflanken und der Profilelemente, was dazu führt, dass der Reifen längs des resultierenden Geschwindigkeitsvektors V verformt wird. Dies bedeutet, dass der Reifen zu seiner Längsgeschwindigkeit eine Querkomponente V_y aufbaut. Es stellt sich ein Schräglaufwinkel α ein. In der Auslaufzone (Bereich zwischen schwarzer und roter Querlinie) beginnen die Profilelemente zu gleiten, wodurch diese wieder in ihre Ausgangsposition zurückzukehren [29], [25].
Rechts neben dem Reifen in Bild 2.2 ist der Ein- und Auslaufbereich der Reifenaufstandsfläche als Kraft- und Wegverteilung dargestellt. Korrespondierend zu den vier unterschiedlichen Verteilungen sind diese im Seitenkraft-Schräglaufwinkel Diagramm darüber eingezeichnet.
Im ersten Fall wird dem Reifen eine kleine Seitenkraft aufgeprägt. Durch den lokalen Bodendruck der Profilelemente und den Kraftschlussbeiwert μ_h erfolgt unter Vernachlässigung der Auslaufzone auf der gesamten Reifenlatschlänge eine elastische Verformung ohne Gleiten. Der korrespondierende Schräglaufwinkel, der sich durch kinematische Verformung ergibt, ist relativ gering. Die elastische Auslenkung erzeugt eine Schubspannung τ_α in den Profilementen, welche nun einem Deformationsschlupf unterliegen [25].
Im zweiten Fall liegt eine höhere Reifenseitenkraft an. Der Schräglaufwinkel vergrößert sich. Die eingeschlossene Fläche unterhalb der Kurve steigt. Die Profilelemente sind nahezu alle im Haftreibungsbereich. Punkt zwei im Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Diagramm befindet sich noch im linearen Bereich.
Bei Fall drei ist die Seitenkraft auf den Reifen abermals gestiegen. Der Schräglaufwinkel ist im Vergleich zu den beiden vorhergehenden Fällen überproportional angestiegen. Im hinteren Drittel gehen die die Profilelemente ins Gleiten über, da die Haftgrenze überschritten wurde. Diese Profilelemente können aufgrund des verminderten Gleitreibungskoeffizienten μ_g nicht mehr so viel Seitenkraft aufnehmen und fallen auf ein vermindertes Plateau ab. Die Fläche unterhalb der Kurve steigt jedoch noch weiter an. Der Punkt drei im Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Diagramm hat den linearen Bereich verlassen und befindet sich bereits in der Degression.
Im vierten Fall wird dem Reifen so viel Seitenkraft aufgezwungen, dass bis auf wenige Profilelemente in der Einlaufzone nahezu alle gleiten. Der Schräglaufwinkel ist abermals progressiv angestiegen. Die Fläche unterhalb der Kurve hat abgenommen, was im Seitenkraft-Schräglaufwinkel Diagramm ersichtlich ist.
Diese Modellvorstellung gilt für das frei rollende Rad mit gleichbleibender Normalkraft. Werden dem Rad noch Antriebs- oder Bremsmomente aufgeprägt, so ändern sich die Druckverhältnisse im Reifenlatsch und die kinematische Auslenkung der einzelnen Profilelemente.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Diagramm ist die Kenngröße c_α eingetragen, welche die Steigung im linearen Bereich charakterisiert und als Schräglaufsteifigkeit bezeichnet wird [25]. Die Schräglaufsteifigkeit findet unter anderem bei der Berechnung von Ein- und Zweispurmodellen Anwendung und gilt bis zu einer Querbeschleunigung von etwa $4\,\mathrm{m/s^2}$ (dies entspricht in etwa einem Schräglaufwinkelbereich $|\alpha| < 3°$) [25]. Das qualitative Seitenkraft-Schräglaufwinkel Diagramm aus Bild 2.2 zeigt, dass der Reifen ein Seitenkraftmaximum besitzt. Befindet man sich bereits an diesem Punkt, so ist ein weiteres Erhöhen des Lenkwinkels und dadurch ein Vergrößern des Schräglaufwinkels kontraproduktiv. Dies muss bei einer späteren Regelung aktiver Stellelemente berücksichtigt werden.

Im nächsten Abschnitt wird nun näher auf einen zweiten Effekt zur Erzeugung von Seitenkraft eingegangen.

2.1.2 Seitenkraft aus Sturz- und Schräglaufwinkel

Neben den Seitenkräften, die aus dem Schräglaufwinkel resultieren, können am Rad über einen weiteren Mechanismus Lateralkräfte abgestützt werden. Hierfür muss das Rad in seiner Längsebene relativ zur Straße geneigt werden. Dieses Reifenverhalten wird nun an Hand einer Modellvorstellung näher erklärt.

Im linken Teil von **Bild 2.3** ist ein Rad abgebildet, welches unter einem Sturzwinkel γ abrollt. Der Sturzwinkel γ wird durch den Winkel zwischen Reifenlängsebene und der Fahrbahnnormalen definiert [32], [25]. Bei dem Abrollvorgang treffen die einzelnen Profilklötzchen in der Einlaufzone auf die Fahrbahn und folgen kinematisch der Fahrzeugbewegung (siehe Bild 2.3 rechts). Durch den Sturzwinkel γ erfolgt eine Verformung des Reifens in seiner Aufstandsfläche relativ zu den Profilstollen, welche auf der Fahrbahn haften (siehe Bild 2.3 rechts). Diese Verformungen der Profilstollen erzeugen Schubspannungen τ_γ, die immer symmetrisch zur Reifenhochachse ausgebildet sind [25]. Die Summe der Schubspannungen τ_γ im Reifenlatsch ergibt die Sturzseitenkraft.
Anders als die Seitenkraftentstehung über Schräglaufwinkel ist keine Richtungsänderung des rollenden Rades von Nöten. Würde das Rad jedoch nicht durch das Fahrwerk gefesselt, so würde es sich durch die Sturzseitenkraft auf einer Kreisbahn bewegen [75]. Die Seitenkräfte, welche durch ein gestürztes Rad entstehen sind bei gleicher Winkelgröße um den Faktor 5 - 10 geringer als Seitenkräfte durch Schräglaufwinkel. Der Grund für die reduzierte Wirkung liegt in den relativ kleinen Profilverformungen und den damit geringen Schubspannungen τ_γ. Bei einem frei rollenden gestürzten Rad liegt daher ausschließlich Deformationsschlupf und kein Gleiten der Profilelemente vor [25].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

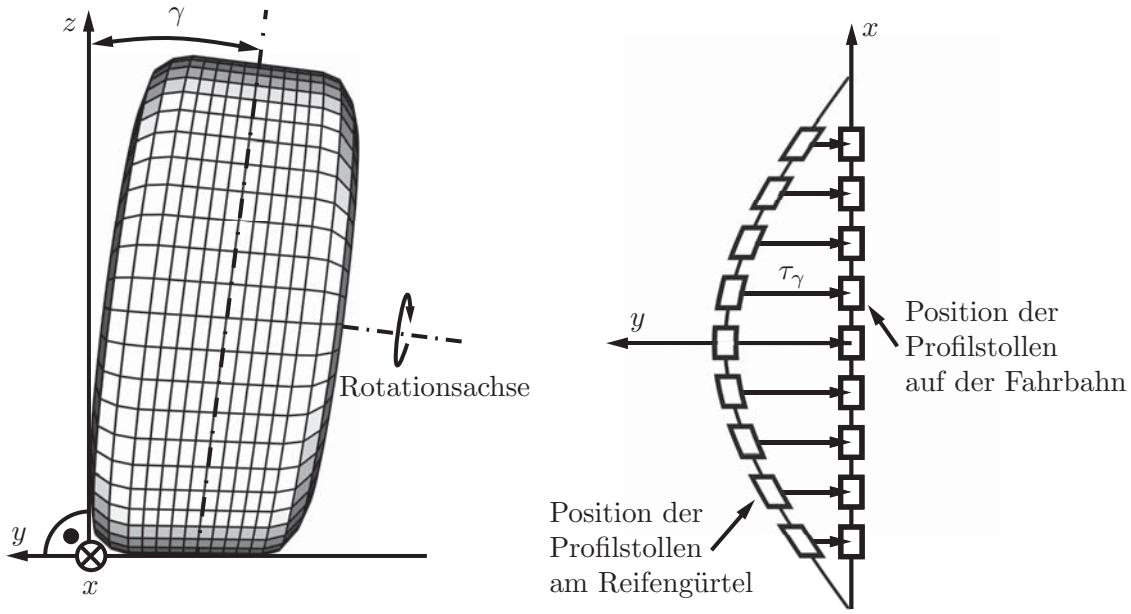

Bild 2.3: *Links: Abgebildet ist ein frei rollendes Rad, welches unter einem Sturzwinkel γ abrollt. Der Sturzwinkel ist durch den Winkel zwischen der Reifenlängseben und der Fahrbahnnormalen definiert.*
Rechts: Die Profilstollen werden durch Haftreibung mit dem Fahrbahnkontakt in Richtung der Abrollgeschwindigkeit gefesselt. Durch den Sturzwinkel γ erfolgt eine Deformation des kreisförmigen Reifens relativ zu den Profilstollen, welche auf der Fahrbahn haften. Es entsteht eine Schubspannung τ_γ, deren Summe über den Reifenlatsch bezogen die Sturzseitenkraft entspricht. Zusammenfassung aus [25], [29], [42] und [20])

Wird nun einem frei rollenden Rad, welches unter einem Sturzwinkel γ abrollt, eine Seitenkraft F_s aufgeprägt, wirken auf die Profilstollen die Schubspannungsverteilungen von τ_α und τ_γ. Diese Schubspannungsverteilungen müssen nun unter Berücksichtigung der maximal übertragbaren Schubspannung $\tau_{max}(p_{local}, \mu_h)$ superpositioniert werden [25]. Dabei hat der Sturzwinkel neben des in Bild 2.3 erklärten Effektes der Sturzseitenkraft noch einen Einfluss auf die Bodendruckverteilung p_{local} im Reifenlatsch.
In **Bild 2.4** ist ein frei rollendes Rad unter konstanter Normalkraft abgebildet. Dabei rollt der linke Reifen unter einer Seitenkraft F_s ab. Die Reifenschulter und Profilelemente weichen der Belastung aus. Es ergibt sich eine qualitative Verformung des Reifens wie abgebildet. Unterhalb in Bild 2.4 ist die Bodendruckverteilung und die qualitative Reifenlatschform dargestellt. Der Latsch nimmt durch die anliegende Seitenkraft eine Trapez-Form an. Dabei entstehen ausgeprägte Druckmaxima auf der Seitenkraft zugewandten Seite.
Der Reifen in der Mitte von Bild 2.4 rollt nur unter einem Sturzwinkel von $\gamma = 4°$ ohne Seitenkraft ab. Die Reifenschulter und die Profilelemente erfahren eine Defor-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

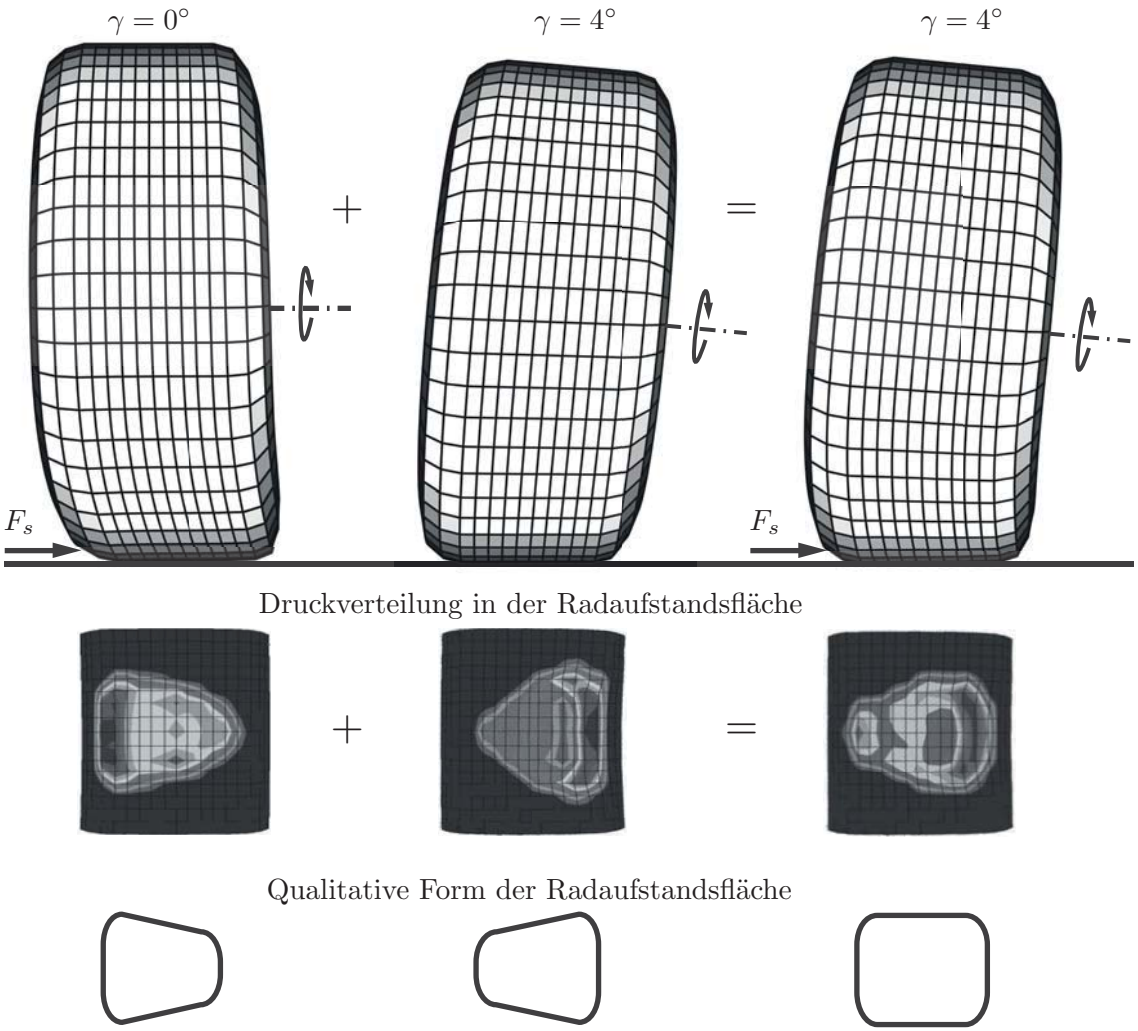

Bild 2.4: *Bodendruckverteilung und qualitative Reifenaufstandsform am frei rollenden Rad: Links unter Seitenkraft, Mitte unter Sturzwinkel $\gamma = 4°$ und rechts unter Seitenkraft und Sturzwinkel $\gamma = 4°$. Durch Überlagerung der Druckformen aus Seitenkraft und Sturzwinkel kann eine homogenere Druckverteilung im Reifenlatsch erzeugt werden. Gleichzeitig kann die Fahrbahnkontaktfläche maximiert werden. Zusammenfassung aus [81], [78] und [2].*

mation, wie sie bereits unter Bild 2.3 beschrieben wurden. Die Bodendruckverteilung des gestürzten Rades ähnelt dem eines unter Seitenkraft abrollenden Rades. Die Druckmaxima entstehen an der Seite, die durch den Sturzwinkel am meisten deformiert werden. Die qualitative Form des Reifenlatsches ähnelt einem Trapez. Durch die Richtung des Sturzwinkels kann also die Bodendruckverteilung unabhängig von der auftretenden Seitenkraft beeinflusst werden.

Der rechte Reifen rollt unter Seitenkraft ab und ist dabei entgegen der Seitenkraft mit $\gamma = 4°$ gestürzt. Durch die Überlagerung der beiden Effekte kann eine Homogenisierung der Bodendruckverteilung erreicht werden. Durch die Egalisierung des Druckniveaus im Reifenlatsch kann das Seitenkraftpotential im Reifen-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

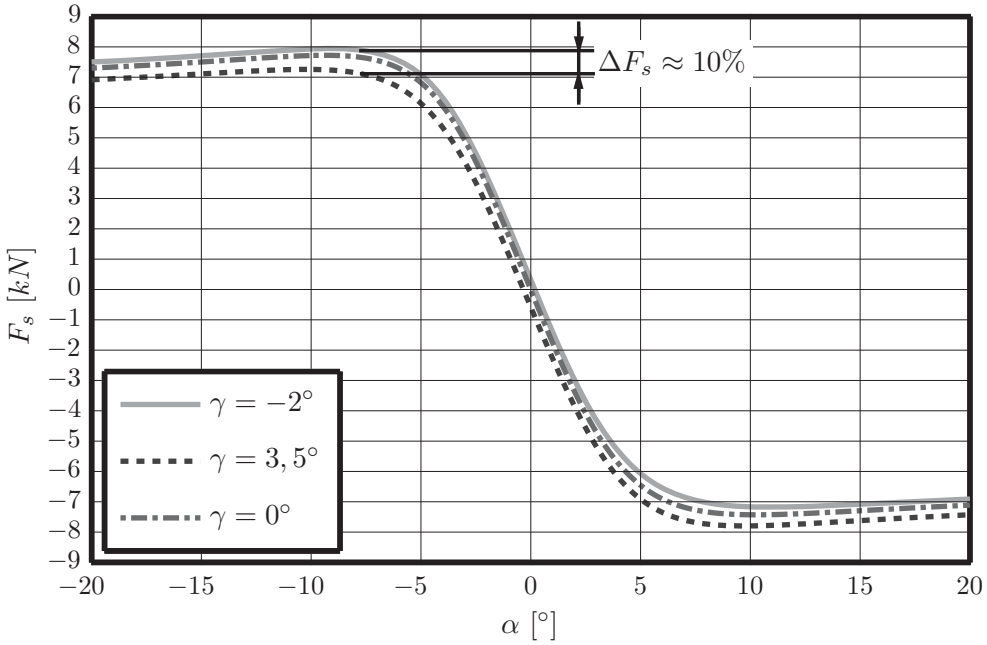

Bild 2.5: *Seitenkraft F_s über Schräglaufwinkel α für einen Reifen 235/40 $R18$ $8,0J$ bei einer Normalkraft von $F_n = 8\,\text{kN}$ und unterschiedlichen Sturzwerten γ. Durch Aufbauwanken und Elastizitäten der Achse gelangt das kurvenäußere Rad in positive Sturzbereiche. Würde das Rad entgegen der Seitenkraft gestützt werden, könnte das Seitenkraftniveau um $\Delta F_s \approx 10\%$ erhöht werden [2], [78], [56].*

Fahrbahnkontakt optimal ausgenutzt werden, da der Quotient von übertragbarer Seitenkraft zu Anpressdruck mit zunehmendem Druck degressiv verläuft. Wird der Reifen hingegen in Richtung der abstützenden Seitenkraft gestürzt, so erreicht man eine Erhöhung des Druckgefälles im Reifenlatsch, was das Seitenkraftübertragungspotential mindert, [81], [78] und [2].
Welchen Einfluss dieser Effekt auf das Seitenkraftübertragungsverhalten hat, zeigt **Bild 2.5**. Dargestellt ist der Seitenkraft-Schräglaufwinkelverlauf für den Reifen 235/40 $R18$ $8,0J$ bei einer Normalkraft von $F_n = 8\,\text{kN}$ bei unterschiedlichen Sturzwinkeln. Der abgebildete Sturzwert von $\gamma = 3,5°$ tritt dabei bei Fahrmanövern mit hoher Querbeschleunigung auf. Induziert durch Aufbauwanken und Elastizitäten der Achse treten je nach Fahrzeugtyp und Schwerpunktslage positive Sturzwinkel am kurvenäußeren Rad auf. Wenn das Rad in dieser Situation mit einem Sturzwinkel zur Straße von $\gamma = -2°$ entgegen der Seitenkraft gestürzt wird, könnte das Seitenkraftniveau um $\Delta F_s \approx 10\%$ erhöht werden [2], [56]. Dieser Effekt tritt bei trockener und teilweise bei nasser Straße, jedoch nicht mehr bei vereister Fahrbahn auf [25].

Im folgenden Kapitel werden die Zielkonflikte passiver Fahrwerkssysteme aufgezeigt und die Auswirkungen aktiver Systeme diskutiert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.