



1 EINLEITUNG

Die Fahrzeugsicherheit sowie die Fahrzeugeffizienz besitzen eine herausragende Bedeutung im Straßenverkehr. Demzufolge besteht in der Fahrzeugentwicklung und durch gesetzliche Vorgaben das Ziel, sowohl die Sicherheit als auch die Effizienz weiter zu verbessern.

Im Hinblick auf die Fahrzeugsicherheit unterstützen Fahrerassistenzsysteme den Fahrer bei der Bewältigung der Fahraufgabe. Die Einteilung von Fahrerassistenzsystemen kann nach unterschiedlichen systematischen Ansätzen erfolgen. So ist nach WINNER et al. [Win+15] eine Klassifikation anhand des 3-Ebenen-Modells von DONGES [Don82] sinnvoll. Demnach erfolgt die Unterteilung von Fahrerassistenzsystemen nach der Ebene der Fahraufgabe (Navigation, Bahnführung oder Stabilisierung), auf welcher der Fahrer durch das jeweilige Fahrerassistenzsystem unterstützt wird.

Reifendruckkontrollsysteme sind Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer bei der Einhaltung des technisch optimalen Zustands des Fahrzeuges und nicht bei der Bewältigung der Fahraufgabe unterstützen. Die Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen wird damit um eine weitere Dimension mit Systemen zur Überwachung des technischen Fahrzeugzustands erweitert.

Mittels Reifendruckkontrollsystemen wird der Druck im Reifen überwacht und eine Warnung ausgegeben, wenn der Reifendruck unter eine definierte Schwelle fällt. Damit zielen Reifendruckkontrollsysteme auf die Vermeidung eines zu geringen Reifendrucks ab. Im Falle eines Minderdrucks (deutlich unterhalb des vorgeschriebenen Drucks) können sich u.a. nach LINDENMUTH [Lin06] und UNDERBERG et al. [Und+14] sowohl die Handling-Eigenschaften als auch das Bremsverhalten des Fahrzeuges verschlechtern, da der Reifen das Verbindungselement zwischen Straße und Fahrzeug darstellt. Zudem verschlechtert sich die Fahrzeugeffizienz aufgrund des steigenden Rollwiderstands des Reifens bei sinkendem Druck. Darüber hinaus ist die höhere Einfederung des Reifens (bei Minderdruck) aufgrund der zunehmenden Walkarbeit mit erhöhter mechanischer und thermischer Belastung verbunden. U.a. nach PAINE et al. [PGM07] und der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration; zivile US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit) [US 05b] erhöht dies signifikant die Gefahr eines plötzlichen Reifenversagens, was zu einem Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug führen kann. Insgesamt ist nur mit korrektem Reifendruck der optimale Kompromiss zwischen den teils in Zielkonflikt stehenden Eigenschaften (z.B. Nasshaftung und Verschleiß) des Reifens in Kombination mit dem Fahrzeug gewährleistet.

Reifendruckkontrollsysteme bilden damit einen zusätzlichen wichtigen Baustein sowohl zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit (neben anderen Assistenzsystemen wie beispielsweise dem Notbremsassistent) als auch zur Erhöhung der Fahrzeugeffizienz (neben konstruktiven Maßnahmen wie rollwiderstandsoptimierte Reifen oder motorische bzw. regelungsrechnerische Maßnahmen wie Zylinderabschaltung).

Aufgrund des Potentials von Reifendruckkontrollsystemen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit wurde in den USA ab dem Jahr 2005 schrittweise eine gesetzliche Vorgabe zum serienmäßigen



Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen erlassen. Darauf folgend hat auch die Europäische Union gesetzliche Regelungen zum Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen eingeführt, welche schrittweise ab dem Jahr 2012 greifen. Im Unterschied zur USA (Fahrzeugsicherheit) ist in der EU die Gesetzgebung jedoch um die Zielsetzung der Fahrzeugeffizienzsteigerung erweitert.

Bei indirekten Reifendruckkontrollsystemen wird der Druck im Reifen nicht direkt gemessen. Über die kontinuierliche Auswertung des druckabhängigen Rollradius sowie des druckabhängigen Reifenschwingverhaltens (im Zeit- und Frequenzbereich des Raddrehzahlsignals) erfolgt während der Fahrt eine indirekte Überwachung des Reifendrucks. Die Höhe der Rollradiusänderung und der Frequenzverschiebung ist bei einem gegebenen Druckverlust jedoch stark von der Reifenkonstruktion sowie der Reifendimension abhängig. Damit hängt auch die Sensitivität des indirekten Reifendruckkontrollsystems bzgl. der Detektion eines Druckverlusts vom verwendeten Reifen ab. Folglich müssen die relevanten Reifeneigenschaften während des Fahrzeug- bzw. Reifenentwicklungsprozesses bewertet werden.

Damit wird deutlich, dass mit neuen, innovativen Systemen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit und der Fahrzeugeffizienz wirksame Methoden benötigt werden, um die Entwicklung dieser Systeme in den Fahrzeugentwicklungsprozess zu integrieren sowie die Systemfunktionalität zuverlässig abzusichern.

In der vorliegenden Dissertation wird eine Methodik zur Absicherung der Systemfunktionalität von indirekten Reifendruckkontrollsystemen in Bezug auf das druckabhängige Reifenverhalten vorgestellt. Das Ziel besteht darin, die notwendige Reifenbewertung anstatt mit einem Fahrversuch an einem Reifenprüfstand durchzuführen. Zum einen lassen sich damit die Entwicklungskosten reduzieren. Zum anderen ist eine optimierte Integration der Reifenbewertung in den Fahrzeugentwicklungsprozess realisierbar, da kein Versuchsfahrzeug bzw. Prototyp erforderlich ist. Dadurch ist die Reifenbewertung zu einem früheren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess durchführbar.



2 MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG

Die Motivation für den Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen wird im Folgenden anhand der Beantwortung der untenstehenden drei Fragen verdeutlicht:

1. Wie hoch ist der Anteil an Reifen mit einem zu geringem Druck (im Vergleich zum vorgeschriebenen Druck)?
2. Welche Auswirkungen hat ein zu geringer Druck auf die Fahrzeug- und Verkehrssicherheit sowie auf die Fahrzeugeffizienz?
3. Welches Potential bieten Reifendruckkontrollsysteme für die Reduzierung des Anteils an Reifen mit einem zu geringen Druck?

Mit den USA und der Europäischen Union bestehen in zwei der größten Automobilmärkten weltweit bereits gesetzliche Regelungen zum Einsatz von Reifendruckkontrollen, die in ihren wesentlichen Merkmalen vorgestellt werden. Die Aufgabenstellung und Zielstellung der vorliegenden Dissertation ergeben sich nachfolgend aus dem prinzipiellen Systemvergleich von direkten und indirekten Reifendruckkontrollsystemen und den daraus resultierenden Anforderungen für den Einsatz von indirekten Reifendruckkontrollsystemen.

2.1 MOTIVATION FÜR REIFENDRUCKKONTROLLSYSTEME

ANZAHL AN REIFEN MIT ZU GERINGEM DRUCK

Wissenschaftlich fundierte Datenerhebungen und Datenauswertungen bzgl. des Reifendrucks bei Fahrzeugen wurden in den USA von der zivilen US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) seit dem Jahr 2000 durchgeführt [US 01b; US 01a; US 01c; SKC09; Siv12].

Infolge der Vorgabe, eine gesetzliche Richtlinie für den Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen umzusetzen (siehe Kap. 2.2), wurde im Februar 2001 von der NHTSA die „Tire Pressure Special Study (TPSS)“ durchgeführt, eine spezielle Untersuchung bzgl. der Höhe des Reifendrucks im Straßenverkehr. Die Studie sollte aufzeigen, in welchem Maße sich Fahrer über den vorgeschriebenen Reifendruck ihres Fahrzeuges bewusst sind, wie häufig der Druck kontrolliert wird und inwieweit der aktuelle Reifendruck aller vier Reifen vom vorgeschriebenen Druck abweicht. Dazu wurden Daten von insgesamt 11.530 Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 10.000 Pfund (≈ 4.536 kg) erhoben, wobei die Verteilung der einzelnen Fahrzeugklassen dem gesamten Fahrzeugbestand in den USA entsprach. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass

27% der überprüften PKW (PKW machten $\approx 56\%$ aller überprüften Fahrzeuge aus) mindestens einen Reifen mit einem zu geringen Druck von wenigstens acht Psi ($\approx 0,55$ bar) im Vergleich zum vorgeschriebenen Reifendruck hatten. [US 01b; US 01a; US 01c]

Eine Studie zur Analyse der Effektivität von Reifendruckkontrollsystemen bei der Einhaltung des korrekten Reifendrucks wurde von der NHTSA im Jahr 2011 durchgeführt [Siv12]. Dazu sind Daten von insgesamt 6.103 Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 10.000 Pfund aus den Modelljahren 2004-2011 erhoben worden, deren Zusammensetzung nach Fahrzeugklassen repräsentativ für die landesweite Zusammensetzung ist. Die Ergebnisse werden unterteilt in die Modelljahre 2004-2007 sowie 2008-2011. Hintergrund ist die seit 2007 voll aktive, gesetzliche Vorgabe zum Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen für alle Neufahrzeuge bis 10.000 Pfund (siehe Kapitel 2.2). Ältere Modelljahre vor 2004 wurden nicht berücksichtigt, da der Anteil von Fahrzeugen ohne Reifendruckkontrollsystem zu hoch für eine sinnvolle, statistische Analyse ist. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass insgesamt 23,1% aller Fahrzeugen der Modelljahre 2004-2007 ohne Reifendruckkontrollsystem mindestens einen Reifen mit wenigstens 25% Minderdruck gegenüber dem vorgeschriebenen Reifendruck haben. Die Studie kommt damit zu einem ähnlichen Ergebnis wie die „Tire Pressure Special Study (TPSS)“: [Siv12]

Zu einem deutlich höheren Anteil an Fahrzeugen mit zu geringem Druck kommt eine Untersuchung der NHTSA zur Effektivität von Reifendruckkontrollsystemen aus dem Jahr 2009 [SKC09]. Demnach haben 53,8% aller überprüften Fahrzeuge ohne Reifendruckkontrollsystem mindestens einen Reifen mit wenigstens 25% Druckdifferenz zum vorgeschriebenen Druck. Allerdings ist die Anzahl der überprüften Fahrzeuge mit 2.316 im Vergleich zu den Studien in [Siv12] sowie [US 01b; US 01a; US 01c] deutlich geringer. Des Weiteren wird bereits in [US 01c] die direkte Korrelation zwischen Fahrzeugalter und Fahrzeuganteil mit zu geringem Reifendruck nachgewiesen, was durch SIVINSKI [Siv12] nochmals bestätigt wird. Mit den betrachteten Modelljahren 1997-2003 sind die von SINGH et al. [SKC09] untersuchten Fahrzeuge deutlich älter als beispielsweise die von SIVINSKI betrachteten.

In einer Veröffentlichung der Arbeitsgruppe Reifendruckkontrollsysteme der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) werden die Ergebnisse verschiedener Datenerhebungen aufbereitet und dargestellt [UNE08]. Enthalten sind Studien aus den Niederlanden (Jahr 2001 und 2007/2008), Großbritannien (Jahr 2007, durchgeführt von Michelin), Frankreich (Jahr 2007, durchgeführt von Michelin), Japan (Jahr 2001, durchgeführt von der JAMA) sowie europaweite Erhebungen (Jahr 2005 und 2006, durchgeführt von Bridgestone). Die Anzahl der überprüften Fahrzeuge variiert stark zwischen 420 (Japan) und 20.300 (Europa, 2006). Entsprechend der vorgestellten Ergebnisse liegt der Anteil an Reifen mit einem zu niedrigen Druck von wenigstens 0,5 bar zwischen 7,8% (Niederlande, 2007/2008) und 37,5% (europaweit, 2005). [UNE08]

Zudem existieren zahlreiche, weniger ausführlich dokumentierte bzw. publizierte Untersuchungen und Aussagen über den Anteil an Fahrzeugen mit einem zu geringen Reifendruck. Die Auswertung von mehr als 28.000 Reifensicherheitsüberprüfungen von Bridgestone im Jahr 2012 ergab, dass bei 78% aller Fahrzeuge der Reifendruck zu niedrig war [Bri]. Nach ALVAREZ [Alv08] ist es denkbar, dass 40% der Fahrzeuge in Europa und Nordamerika einen zu niedrigen Reifendruck haben. Eine Untersuchung von 3.012 Reifen durch die National Roads and Motorists' Association (NRMA) in Australien im Jahr 1993 (Ergebnisse vorgestellt in [PGM07]) kommt zu dem Ergebnis, dass bei 29% der überprüften Reifen der vorgeschriebene Druck um 0,2 - 0,49 bar und bei 10% um 0,5 bar oder mehr unterschritten wird. BULLAS [Bul04] stellt in einem Report der „Foundation for Road Safety Research“ Ergebnisse einer Studie des „Tyre Industry Council“ vor. Demnach hatten nur 14% der 1.072 überprüften Reifen den korrekten Druck, während bei 72% der Druck zu niedrig war.



AUSWIRKUNGEN EINES ZU GERINGEN REIFENDRUCKS

Der Reifendruck bzw. der Druckverlust im Reifen wirkt sich sowohl auf die Fahrzeugsicherheit als auch auf die Fahrzeugeffizienz aus. Im Folgenden wird daher die Abhängigkeit des Bremsverhaltens, der Fahrzeugvertikaldynamik sowie des Fahrwiderstands vom Reifendruck diskutiert. Darüber hinaus werden statistische Analysen vorgestellt, die den Einfluss des Reifendrucks auf die Verkehrssicherheit quantifizieren.

COLLIER et al. [CW80] analysieren u.a. das Bremsverhalten und den Rollwiderstand des Reifens in Abhängigkeit vom Reifendruck. Die Resultate zeigen, dass die während der Bremstests ermittelten Reibungskoeffizienten eines Radialreifens nahezu unbeeinflusst vom Reifendruck sind bzw. auf nasser Straße bei geringen Geschwindigkeiten mit sinkendem Druck leicht abfallen. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen MARSHEK et al. [MCJ02], welche den Einfluss des Reifendrucks auf das Bremsverhalten bei Notfallbremsmanövern von Fahrzeugen mit ABS untersuchen. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Reifendruck auch in einem großen Variationsbereich (0,69 bar - Maximaldruck lt. Hersteller) nur einen geringen Einfluss auf die erreichte, physikalische Verzögerung hat. Es wird ein Index zur Bewertung des Bremsverhaltens (Verhältnis aus mittlerer Verzögerung bei ABS-Bremmung zur Verzögerung bei Bremsung ohne ABS) eingeführt, dessen Wert in Abhängigkeit vom Reifendruck nur im Bereich 1 - 6% variiert. Dennoch zeigt sich im Allgemeinen, dass das optimale Bremsverhalten in Bezug auf Verzögerung und Bremsweg in der Nähe des vorgeschriebenen Drucks liegt. Einen deutlicheren Einfluss des Reifendrucks auf das Bremsverhalten von Fahrzeugen mit ABS ermitteln HADRYN et al. [HWM08]. Demnach ergibt sich das optimale Bremsverhalten in Bezug auf die maximale physikalische Verzögerung und den Bremsweg für den Sollfülldruck von 2 bar. Sowohl bei zu hohem Druck (3 bar) als auch bei zu niedrigem Druck (1 bar) ergeben sich zum Teil deutliche Verschlechterungen beider Bewertungsgrößen; beispielsweise eine Vergrößerung des Bremsweges auf nasser Fahrbahn von 25,4 m (2 bar) auf 33 m (1 bar). RIEVAJ et al. [RVH13] analysieren das Bremsverhalten bzgl. des Bremswegs und der mittleren physikalischen Verzögerung bei den Drücken 1,9 bar, 2,4 bar (Sollfülldruck) und 2,9 bar. Im betrachteten Druckbereich ergibt sich, dass sich der Bremsweg bei Minderdruck um 0,016 m verkürzt; jedoch verlängert sich der Bremsweg bei zu hohem Druck um 2,446 m. Die NHTSA untersucht in [US 05b] den Einfluss des Reifendrucks auf den Bremsweg anhand von Test-Daten, welche speziell für diese Analyse von Goodyear mit zwei unterschiedlichen Versuchsfahrzeugen mit jeweils verschiedener Bereifung erhoben wurden. Variiert werden neben dem Reifendruck (1,38 bar, 1,93 bar und 2,41 bar) auch die Profiltiefe (volle und halbe Profiltiefe) sowie die Wasserfilmdicke (0,51 mm und 1,27 mm) bei den Tests auf nasser Fahrbahn. Zusätzlich wurden die Tests mit voller Profiltiefe auch mit deaktiviertem ABS durchgeführt. Bis auf zwei Ausnahmen, jeweils bei Tests mit Neureifen des gleichen Reifentyps, zeigen alle Ergebnisse eine direkte Korrelation zwischen Druckverringerung und Bremswegverlängerung. So ergibt sich zum Beispiel bei trockener Fahrbahn mit aktiviertem ABS eine Bremswegverlängerung von bis zu 1,22 m bei der Druckreduzierung von 1,93 bar auf 1,38 bar.

Im Hinblick auf Fahrsicherheit und Fahrkomfort beeinflusst die Druckabhängigkeit der dynamischen Vertikalsteifigkeit die Vertikaldynamik des Gesamtfahrzeuges. MITSCHKE et al. [MW04] beschreiben, dass ein vertikal weicherer Reifen (was nach NIEMEYER et al. [Nie+11] bei einer Druckreduzierung der Fall ist) zu geringeren Amplituden sowohl der Aufbaubeschleunigung als auch der Radlastschwankung im Bereich der Radresonanz führt (bezogen auf die Fahrbahnanregung). Damit geht eine Verbesserung sowohl der Fahrsicherheit (Einfluss der Radlastschwankung) als auch des Fahrkomforts (Einfluss der Aufbaubeschleunigung) einher. Allerdings weisen MITSCHKE et al. [MW04] ausdrücklich darauf hin, dass mit einem weicheren Reifen nicht die Reduzierung des Luftdruckes gemeint ist (aufgrund der sich verschlechternden Seitenführungseigenschaften), sondern die Verwendung von Reifen mit konstruktiv bedingter geringerer Vertikalsteifigkeit. HAMED et al. [Ham+15] bestätigen anhand von Gesamtfahrzeug-Messfahrten über eine definierte Bodenwelle, dass ein reduzierter Reifendruck im Bereich der Achsresonanz zu verringerten Schwingamplituden führt.



Bei einem reduzierten Reifendruck steigt aufgrund der erhöhten mechanischen Belastung und der erhöhten Erwärmung des Reifens infolge der größeren Walkarbeit signifikant die Gefahr eines Reifenversagens (siehe z.B. [Siv12; US 01b; US 01a; US 01c; PGM07]). Nach [US 00] bildet ein zu geringer Luftdruck die häufigste Einzelursache für ein Reifenversagen. In [US 05b] wird angegeben, dass ein plötzlicher Druckverlust an der Vorderachse dazu führen kann, von der Straße abzukommen bzw. in den Gegenverkehr zu geraten. Ein plötzlicher Druckverlust an der Hinterachse kann dagegen zu einem Übersteuern des Fahrzeuges und damit zu einem Kontrollverlust führen. Es existieren zudem veröffentlichte statistische Untersuchungen, welche den Zusammenhang zwischen dem Reifendruck (bzw. Reifendruckverlust) und der Unfallstatistik analysieren. So kommt die NHTSA [US 03] zu dem Ergebnis, dass vor der Einführung von Reifendruckkontrollsystemen jährlich 414 Personen bei Verkehrsunfällen infolge von Reifenplatzern oder luftleeren Reifen starben und 10.275 nicht-tödlich verletzt wurden. Es wird angenommen, dass 20% dieser Verkehrsunfälle im Zusammenhang mit zu niedrigem Reifendruck standen. Die genaue Zahl ist demnach nicht bekannt, da Reifenausfälle bzw. Reifenversagen und deren Einfluss auf Unfälle nicht ausreichend dokumentiert sind. Zudem wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Reifenversagens bei zu geringem Druck jeweils zu 50% vom Reifendruck und von den Reifeneigenschaften abhängt. Daraus ergeben sich jährlich 41 tödlich verletzte und 1.028 nicht-tödlich verletzte Personen in den USA, was durch korrekten Reifendruck hätte vermieden werden können. Eine weitere Studie der NHTSA aus dem Jahr 2012 [Eun12] analysiert reifenbezogene Faktoren in der Pre-Crash-Phase. Dabei wurden insgesamt 5.470 Unfälle aus den Jahren 2005-2007, also vor der offiziellen Einführung der gesetzlichen Vorgaben für Reifendruckkontrollsysteme, analysiert. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit eines Reifenproblems in der pre-Crash-Phase um den Faktor drei steigt, wenn einer oder mehrere Reifen einen zu geringen Druck von 25% oder mehr, ausgehend vom vorgeschriebenen Druck, aufweisen.

Eine umfangreiche Einflussanalyse des Reifendruckes auf die Fahrzeugsicherheit wird von PAINE et al. [PGM07] gegeben. Es wird ebenfalls betont, dass ein zu geringer Reifendruck neben einem erhöhten Reifenverschleiß auch zu einer Überhitzung und zu mechanischer Beschädigung des Reifens führen kann, was ein vorzeitiges Reifenversagen zur Folge haben kann. Der Einfluss des Reifendruckes auf die Fahrsicherheit wird u.a. anhand der Verkehrsunfallstatistik von Australien aus dem Jahr 2002 mit insgesamt 57.896 Verkehrsunfällen analysiert. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass insgesamt rund 3% aller Autounfälle bei korrekt eingestelltem Reifendruck vermieden werden können. Dies entspricht 26 weniger Verkehrstote sowie 1.478 weniger Leicht- und Schwerverletzte. Damit liegen die ermittelten Zahlen in vergleichbarer Größenordnung zu denen von der NHTSA in [US 03] angegebenen. Zum Vergleich lag die Zahl der Verkehrstoten in Deutschland im Jahr 2014 bei insgesamt 3.377 [Bun15]. Es wird jedoch auch (vergleichbar mit den Aussagen der NHTSA) darauf hingewiesen, dass in offiziellen Polizeiberichten, auf denen die Analyse u.a. beruht, technische Fahrzeugmängel zu wenig Berücksichtigung finden, wodurch die tatsächliche Zahl an Unfällen mit Reifendruck als Einflussfaktor höher liegen kann. Des Weiteren muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass mit ca. 1,5% die Hälfte der angegebenen Unfälle aus Kontrollverlust von Fahrzeugen ohne ESP resultiert. Die weltweit zunehmende Durchdringung des Stabilitätsprogramms im PKW-Bestand geht damit bzgl. der Fahrzeugsicherheit Hand in Hand mit einem Reifendruckkontrollsystem.

Der Fahrwiderstand (und damit der Kraftstoffverbrauch und der Schadstoffausstoß) eines Fahrzeuges wird signifikant vom Rollwiderstand der Reifen beeinflusst (weitere Einflussfaktoren sind beispielsweise der Luftwiderstand oder die Effizienz des Verbrennungsmotors). Die Höhe des Einflusses hängt u.a. nach CLARK et al. [CD79] jedoch stark vom Fahrzyklus und dem Fahrzeug selbst ab. Nach JUNIO et al. [JRC99] verringert sich der Kraftstoffverbrauch um 1% bei einer Verringerung des Rollwiderstandes der Reifen um 7% (als Mittelwert über alle realen Fahrzyklen). GLAESSER et al. [GZ05] geben eine Kraftstoffersparnis von 5% bei einer Verringerung

des Rollwiderstandes der Reifen um 30% an, was in gleicher Größenordnung im Vergleich zu JUNIO et al. [JRC99] liegt. Des Weiteren zeigen u.a. CLARK et al. [CD79], JUNIO et al. [JRC99] und UNRAU [Unr12], dass der Rollwiderstand mit sinkendem Reifendruck signifikant ansteigt (die Abhängigkeit des Rollwiderstands vom Reifendruck wird detailliert in Kapitel 3.4 diskutiert). Aus diesen Zusammenhängen geht hervor, dass die Vermeidung eines zu geringen Reifendrucks einen nennenswerten Beitrag zur Fahrzeugeffizienz leistet.

POTENTIAL VON REIFENDRUCKKONTROLLSYSTEMEN

Die Frage, inwieweit sich die Zahl der Reifen mit einem deutlich zu geringen Reifendruck mit Reifendruckkontrollsystemen verringert lässt, wird ebenfalls von der US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit NHTSA analysiert.

So kommt die bereits angesprochene Studie von SINGH et al. [SKC09] aus dem Jahr 2009 zu dem Ergebnis, dass 57% aller Fahrzeuge mit einem Reifendruckkontrollsystem korrekte Reifendrücke aufwiesen; dagegen waren es 43% bei einer entsprechenden Vergleichsgruppe ohne Reifendruckkontrollsystem. Im Mittel hatten die Reifen der Fahrzeuge mit Reifendruckkontrollsystemen einen zu geringen Druck von 14%; die Reifen der Vergleichsgruppe dagegen von 16%. Des Weiteren kommen SINGH et al. [SKC09] zu dem Ergebnis, dass der Unterschied zwischen der Vergleichsgruppe und den Fahrzeugen mit indirekten Reifendruckkontrollsystemen marginal ist. Allerdings ist zu beachten, dass die Anzahl der untersuchten Fahrzeuge mit 2.316 vergleichsweise gering ist. Zudem ist mit den Modelljahren 1997-2003 das hohe Alter der untersuchten Fahrzeuge zu berücksichtigen. Wie bereits angesprochen, korreliert die Anzahl an Reifen mit zu geringem Druck mit dem Fahrzeugalter. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der Entwicklungsstand insbesondere von indirekten Reifendruckkontrollsystemen (welche mit $\approx 83\%$ den Großteil der mit Reifendruckkontrollsystemen ausgerüsteten Fahrzeuge darstellen) in diesen Modelljahren noch nicht den heute gültigen gesetzlichen Anforderungen entsprach. So stellen UNDERBERG et al. [Und+14] dar, dass zu Beginn des Jahrtausends indirekte Reifendruckkontrollsysteme der ersten Generation (bei denen lediglich die Drehzahländerung im Zeitbereich ausgewertet wird, um einen Druckverlust an einem einzelnen Reifen detektieren zu können) verbreitet waren. Im Zuge der gesetzlichen Vorschriften (siehe auch Kapitel 2.2) wurden später indirekte Reifendruckkontrollsysteme der zweiten Generation eingeführt, bei denen zusätzlich aus dem Frequenzbereich des Raddrehzahlsignals auf einen Druckverlust in allen vier Reifen gleichzeitig geschlossen werden kann (siehe auch Kapitel 2.3). Auf diesen Punkt geht auch SIVINSKI [Siv12] ein, der auf die Weiterentwicklung der indirekten Reifendruckkontrollsysteme infolge der Einführung der gesetzlichen Vorgaben in den USA ab 2005 (siehe Kapitel 2.2) hinweist.

Generell stellt die ebenfalls bereits angesprochene statistische Analyse von SIVINSKI [Siv12] in Bezug auf die untersuchten Modelljahre und die Anzahl der untersuchten Fahrzeuge eine deutlich aussagekräftigere Analyse dar. Jedoch ist hier zu beachten, dass von den untersuchten Fahrzeugen mit Reifendruckkontrollsystem weniger als 3% mit einem indirekten System ausgerüstet waren. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass bei Fahrzeugen der Modelljahre 2004-2007 ohne Reifendruckkontrollsystem insgesamt 23,1% mindestens einen Reifen mit zu niedrigem Druck (25% oder mehr ausgehend vom vorgeschriebenen) hatten; dagegen waren es im Vergleichszeitraum nur 11,8% bei den Fahrzeugen mit Reifendruckkontrollsystem. Für den Zeitraum von 2008-2011, d.h. nach der vollständigen Einführung der gesetzlichen Regelung in den USA, reduziert sich der Anteil nochmals auf 5,7%. Basierend auf den Daten von 2004-2007 verringert sich damit die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens ein Reifen einen deutlich zu geringen Druck aufweist, um 55,6%. Zusätzlich wird angegeben, dass durch Reifendruckkontrollsysteme im Jahr 2011 in den USA über alle relevante Fahrzeugklassen insgesamt ca. \$511 Millionen US-Dollar an Kraftstoff eingespart werden konnten.

Die Gesamtanzahl von Verkehrsunfällen sowie dadurch verletzten oder getöteten Personen, die mit zu niedrigem Reifendruck in Zusammenhang stehen, fällt z.B. im Vergleich mit Unfällen

infolge von überhöhter Geschwindigkeit gering aus. Dennoch muss in Bezug auf die Verkehrssicherheit festgehalten werden, dass jede Reduzierung an Unfällen, Verletzten und Getöteten Personen ein Gewinn ist, unabhängig von der Höhe der Reduktion. Auch in Bezug auf die Fahrzeugeffizienz stellt der korrekte Reifendruck nur ein Teil von vielen, wie z.B. Luftwiderstand oder Effizienz von Verbrennungsmotoren, dar. Zudem führt der flächendeckende Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen nicht dazu, dass kein Fahrzeug mehr Reifen mit deutlich zu geringem Druck hat, was auch von PAINE et al. [PGM07] angemerkt und durch die Studien der NHTSA bestätigt wurde.

Dennoch entsteht mit dem flächendeckenden Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen ein nachweisbarer Zugewinn an Verkehrssicherheit und Fahrzeugeffizienz, weshalb in den größten Automobilmärkten weltweit gesetzliche Richtlinien für den Einsatz entsprechender Systeme entstanden, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.2 AKTUELLER STAND DER GESETZGEBUNG

Mit den USA (seit 2005) und Europa (seit 2010) sind in zwei der größten Automobilmärkten weltweit bereits verpflichtende Gesetzgebungen zum Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen aktiv. Da auch China auf dem Weg ist, eine entsprechende Gesetzgebung einzuführen, wird künftig in den drei weltweit größten Automobilmärkten eine gesetzliche Regelung zum Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen existieren. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Eckpunkte der bereits bestehenden gesetzlichen Regelungen in den USA und in der Europäischen Union gegeben.

USA

Im Jahr 2000 hat der US-Kongress den TREAD Act (Transportation Recall Enhancement, Accountability and Documentation Act) verabschiedet, welcher ein Gesetz zur Erhöhung der Verbrauchersicherheit im Hinblick auf fahrzeugtechnische Mängel darstellt [00]. Dem Beschluss vorausgegangen waren eine Reihe schwerer Verkehrsunfälle infolge von Reifenversagen bzw. Reifenmängeln [CT00]. Im TREAD Act ist der Beschluss enthalten, innerhalb eines Jahres nach dem Inkrafttreten des Gesetzes eine Vorschrift für den verpflichtenden Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen zu definieren [00]. Daraus hervorgegangen ist der Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 138 (FMVSS 138), die gesetzliche Anforderung zum Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen [US 05a].

Entsprechend der Unfallserie als Hintergrund bzw. als Auslöser der Gesetzgebung zielt diese eindeutig auf die Erhöhung der Verkehrssicherheit ab. Die Einführung der Regelung erfolgte schrittweise ab 2005. Ab 2007 müssen alle neuen PKW, Mehrzweck-Fahrzeuge, LKW und Busse bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 10.000 Pfund, welche in den USA verkauft werden sollen, mit einem Reifendruckkontrollsystem gemäß den gesetzlichen Vorgaben ausgestattet sein. Das Gesetz schreibt vor, dass der Fahrer innerhalb von 20 Minuten gewarnt werden muss, wenn der Druck in einem oder mehreren Reifen 25% unter den vorgeschriebenen Druck fällt. Auch bei einer Systemfehlfunktion ist der Fahrer zu informieren. Die Art der technischen Umsetzung der Reifendruckkontrolle wird nicht vorgeschrieben. Somit sind sowohl direkte als auch indirekte Reifendruckkontrollsysteme einsetzbar (siehe auch Kapitel 2.3). [US 05a; Und+14]

EUROPÄISCHE UNION

Die gesetzlichen Regelungen zum Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen sind in der EU-Verordnung Nr. 661/2009 [Eur09] sowie in der ECE-Regelung Nr. 64 [Wir10] festgehalten. Demnach wurde der verpflichtende, serienmäßige Einsatz von Reifendruckkontrollsystemen zunächst ab 1. November 2012 für alle neu zu homologierenden Fahrzeugtypen der Klassen M₁ sowie N₁ (PKW und Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 3,5 Tonnen)

eingeführt. Ab 1. November 2014 greift die gesetzliche Verpflichtung für alle Neuzulassungen der entsprechenden Fahrzeugklassen. Im Gegensatz zum FMVSS 138 in den USA steht in der EU neben dem Sicherheitsaspekt die Erhöhung der Fahrzeugeffizienz im Vordergrund [Eur09]. Entsprechend der ECE-R 64 liegt die Warnschwelle bei 20% ausgehend vom „Druck bei warmen Reifen“ [Wir10]. Allerdings wird zwischen zwei unterschiedlichen Druckverlustszenarien unterschieden (siehe Kapitel 2.3), für die unterschiedliche Warnzeiten definiert sind. Bei einem plötzlichen Druckverlust an einem einzelnen Reifen aufgrund einer Leckage oder Undichtheit (beispielsweise ein eingefahrener Nagel) muss der Fahrer innerhalb von 10 Minuten gewarnt werden, wenn der Druck unter die Warnschwelle fällt. Sinkt der Druck langsam in einem oder mehreren Reifen gleichzeitig (z.B. infolge von Diffusionseffekten), muss das System im Laufe von 60 Minuten eine Warnung ausgeben, wenn der Druck in allen Reifen unter die Warnschwelle fällt. Die in der EU definierte Warnschwelle ist damit im Vergleich zur FMVSS 138 in den USA signifikant reduziert; einerseits liegt die Schwelle durch die 20%-Vorgabe schon niedriger, andererseits ist in der EU, durch den Bezug auf den Druck bei warmen Reifen, auch der Referenzdruck höher. Äquivalent zur FMVSS 138 ist in der EU eine erforderliche Warnung bei einer Systemfehlfunktion vorgesehen. [Eur09; Wir10; Und+14]

2.3 SYSTEMVERGLEICH

Entsprechend den Gesetzgebungen dienen Reifendruckkontrollsysteme dazu, den Reifendruck in allen vier Rädern zu überwachen und dem Fahrer eine Warnung zu geben, wenn der Reifendruck in mindestens einem Reifen unter eine festgelegte Schwelle fällt. Damit können Reifendruckkontrollsysteme zu den Fahrerassistenzsystemen gezählt werden, welche den Fahrer dabei unterstützen, das Fahrzeug im technisch optimalen Zustand zu betreiben. Nach UNDERBERG et al. [Und+14] kann zwischen drei Druckverlustszenarien unterschieden werden (siehe Abb. 2.1). Reifenpannen oder Reifenplatzer führen zu einem vollständigen Druckverlust innerhalb weniger Minuten bzw. Sekunden. Aufgrund einer Leckage bzw. Undichtheit sinkt der Druck im Reifen im Verlauf von einem bis zu mehreren Tagen in nennenswerten Größenordnungen. Das dritte Druckverlustszenario wird durch die Diffusion von Luftmolekülen durch den Reifen und das Reifenventil hervorgerufen und führt zu relevanten Druckverlusten im Laufe von Wochen und Monaten. Der Arbeitsbereich von Reifendruckkontrollsystemen erstreckt sich dabei ausschließlich über die beiden letzteren Szenarien. Grundsätzlich lassen sich Reifendruckkontrollsysteme in direkt messende Systeme und indirekt messende Systeme unterteilen. Sowohl die direkten als auch die in der vorliegenden Arbeit diskutierten indirekten Systeme der 2. Generation erfüllen die gesetzlichen Anforderungen in den USA sowie in der EU. Im Folgenden werden beide Systemgruppen vorgestellt. [Und+14]

DIREKTE REIFENDRUCKKONTROLLSYSTEME

Direkt messende Reifendruckkontrollsysteme basieren auf der direkten Messung des Drucks und der Temperatur mittels eines Sensors, welcher üblicherweise innen am Reifenventil befestigt ist; allerdings existieren auch Lösungen, bei denen der Sensor direkt mit dem Reifen verbunden ist. Über Radiowellen werden die Sensordaten an eine im Fahrzeug verbaute Antenne übertragen. Die Auswertung der Daten erfolgt in einem separaten Steuergerät, welches mit dem Fahrzeug-Kommunikationsnetzwerk verbunden ist. Über Anzeigeelemente im Kombi-Instrument kann sich der Fahrer den aktuellen Reifendruck anzeigen lassen bzw. erhält der Fahrer eine Warnung, wenn der Druck unter eine vorgegebene Schwelle bzgl. des Sollfülldrucks fällt. Der aktuelle Sollzustand, d.h. der Sollfülldruck bei gegebener Temperatur, wird dem System vom Fahrer vorgegeben, der den Druck idealerweise entsprechend den Vorgaben vom Fahrzeughersteller einstellt. Danach vergleicht das Reifendruckkontrollsystem den aktuellen Zustand mit dem vorgegebenen Sollzustand. Die technische Komplexität zur direkten Messung von Druck