



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Armin Jaganjac

Untersuchung zur Kundenakzeptanz und Wirksamkeit von Reifendruckkontrollsystemen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Armin Jaganjac

**Untersuchung zur Kundenakzeptanz und
Wirksamkeit von
Reifendruckkontrollsystemen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Ing.-Büro Janentzky & Stehr GmbH
Osterladekop 116
21635 Jork

Erstprüfer: Prof. Dr. Dirk Adamski
Zweitprüfer: Prof. Peter Seyfried

Abgabedatum: 30.06.2025

Zusammenfassung

Armin Jaganjac

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung zur Kundenakzeptanz und Wirksamkeit von Reifendruckkontrollsystemen

Stichworte

Reifendruckkontrollsystem, RDKS, Umfrage, Reifendruck

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit untersucht die Wirksamkeit von Reifendruckkontrollsystemen zur Verbesserung der Fahrsicherheit. Basierend auf Reifendruckmessungen an 66 Fahrzeugen und einer Befragung von 38 Fahrzeughaltern zeigt die Studie, dass RDKS kritischen Minderdruck äußerst effektiv verhindern: Keines der RDKS-Fahrzeuge wies gefährlichen Unterdruck auf, während dies bei 10,9% der Reifen ohne RDKS der Fall war.

Überraschenderweise führen RDKS-Systeme jedoch nicht zu einer präziseren Einhaltung des Solldrucks, sondern zu einem medianen Überdruck von +5,3%. Fahrzeughalter verlassen sich stark auf RDKS, vernachlässigen manuelle Kontrollen und reagieren oft verzögert auf Warnungen. Wissenslücken zur Systeminitialisierung passiver RDKS schränken deren Praxiseffektivität zusätzlich ein.

Technisch sind RDKS ein Erfolg gegen Unterdruck. Ihr voller Nutzen wird jedoch durch das Fahrerverhalten beeinflusst, was neue Muster wie systematischen Überdruck erzeugt.

Armin Jaganjac

Title of the paper

A Study on Customer Acceptance and Effectiveness of Tyre Pressure Monitoring Systems

Keywords

Tyre Pressure Monitoring System, TPMS, survey, tyre pressure

Abstract

This bachelor's thesis investigates the effectiveness of Tyre Pressure Monitoring Systems (TPMS) in enhancing driving safety. Based on empirical tyre pressure measurements on 66 vehicles and a survey of 38 vehicle owners, the study reveals that TPMS effectively prevent critical underinflation: none of the TPMS-equipped vehicles showed dangerous underinflation, whereas 10.9% of tyres on vehicles without TPMS did.

Surprisingly, TPMS do not lead to a more precise adherence to the target pressure, instead they result in a median overinflation of +5.3%. Vehicle owners rely heavily on TPMS, often neglecting manual checks and delaying their response to warnings. Knowledge gaps, such as the necessary initialization of passive TPMS, further limit their practical effectiveness.

Technically, TPMS are a success against underinflation. However, their full benefit is influenced by driver behavior, which creates new patterns like systematic overinflation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Relevanz des Reifendrucks für die Fahrzeugsicherheit	1
1.2	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Einfluss des Reifendrucks auf Reifeneigenschaften und Fahrsicherheit	5
2.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen	7
2.3	Reifendruckkontrollsysteme	8
2.3.1	Indirekt messende Systeme	8
2.3.2	Direkt messende Systeme	9
2.4	Stand der Forschung	11
2.4.1	OICA Reifendruck Feldstudie von 2016/2017	11
2.4.2	NHTSA Studie	12
2.5	Statistische Auswertung	13
2.5.1	Deskriptive Statistik	13
2.5.2	Hypothesentests	15
2.5.3	Überprüfung auf Normalverteilung	16
2.5.4	Angewandte statistische Tests	17
3	Methodik	19
3.1	Reifendruckmessung	19
3.1.1	Zielsetzung der Feldstudie	19
3.1.2	Untersuchungsdesign und Stichprobe	19
3.1.3	Messgrößen und -werkzeug	20
3.1.4	Durchführung der Datenerhebung	21
3.1.5	Qualitätssicherung der Messungen	23
3.1.6	Software zur Datenanalyse	24
3.2	Kundenbefragung	24
3.2.1	Zielsetzung der Umfrage	24
3.2.2	Untersuchungsdesign und Stichprobe	25
3.2.3	Der Fragebogen	26
3.2.4	Durchführung der Datenerhebung	30
3.2.5	Qualitätssicherung der Umfrage	31
4	Reifendruckmessung	32
4.1	Deskriptive Statistik der Reifendruckmessung	32
4.2	Inferenzstatistische Analyse der Reifendruckmessung	35
4.2.1	Datenaufbereitung und Definition der Analysevariablen	35
4.2.2	Hypothese 1: Fahrzeuge mit RDKS haben eine unterschiedliche mediane Abweichung im Reifendruck von der Herstellerangabe als Fahrzeuge ohne RDKS	36
4.2.3	Hypothese 2: Fahrzeuge mit RDKS weisen sicherere Reifendruckzustände auf als Fahrzeuge ohne RDKS	42
4.2.4	Hypothese 3: Es gibt keine Korrelation zwischen Kilometerleistung/Fahrzeugalter und Reifendruckabweichung von Herstellervorgabe	46

4.3	Extremwertanalyse und sicherheitskritische Abweichungen	50
5	Kundenumfrage	53
5.1	Einleitung in die Umfrage: Ziele und Stichprobe	53
5.2	Ergebnisse zur Erkennung und Einordnung des RDKS-Warnsymbols	54
5.3	Ergebnisse zur Reaktion auf RDKS-Warnungen	57
5.4	Ergebnisse zur Bedienung von RDKS	61
5.5	Praktiken und Kenntnisse zur Reifendruckkontrolle	63
6	Diskussion der Ergebnisse	71
6.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Messungen und Befragungen	71
6.1.1	Selbsteinschätzung vs. Realität bei der Prüffrequenz	71
6.1.2	Kenntnis der korrekten Messbedingungen vs. Messergebnis	72
6.1.3	Fallstudien zu extremen Minderdrücken	73
6.1.4	Überdruck als systematische Wartungsstrategie	74
6.2	Limitationen der Arbeit und kritische Reflexion	75
6.2.1	Repräsentativität der Stichprobe	75
6.2.2	Auswirkungen der Umfragekonzeption	76
6.2.3	Messtechnische Aspekte	76
6.2.4	Aussagen zum Überdruck	77
6.2.5	Methodische Überlegungen zur Datenunabhängigkeit	77
7	Fazit	80
8	Literaturverzeichnis	82

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Antiblockiersystem
ECDF	Empirical cumulative distribution function
ESP	Elektronisches Stabilitätprogramm
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
HU	Hauptuntersuchung
IQR	Interquartilsabstand
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OICA	Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles
QQ	Quantile-Quantile (Plot)
RDKS	Reifendruckkontrollsystem
TREAD	Transportation Recall Enhancement, Accountability, and Documentation Act
UN/ECE	Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: RDKS-Konfiguration mit 4 Sensoren und 4 Empfängern (Zühlke, 2015, S. 23)	10
Abbildung 2: RDKS-Konfiguration mit dezentralem Empfänger und 4 Sensoren (Zühlke, 2015, S. 22 f.)	11
Abbildung 3: Boxplot mit Quartilen und IQR (Hedderich & Sachs, 2020, S. 86)	15
Abbildung 4: Flowchart – modularer Aufbau der Befragung	28
Abbildung 5: RDKS-Typen der untersuchten Fahrzeuge (n=66)	32
Abbildung 6: Verteilung der Hersteller (n=66)	33
Abbildung 7: Altersverteilung der Stichprobe (n=66)	34
Abbildung 8: Kilometerleistung der Stichprobe (n=66)	35
Abbildung 9: QQ-Plot – relative Reifendruckabweichung (mit RDKS)	37
Abbildung 10: QQ-Plot – relative Reifendruckabweichung (ohne RDKS)	38
Abbildung 11: Boxplots der relativen Reifendruckabweichung nach RDKS-Status	40
Abbildung 12: ECDF-Plots der relativen Reifendruckabweichungen	44
Abbildung 13: Korrelation zwischen Kilometerleistung und relativer Reifendruckabweichung	48
Abbildung 14: Korrelation zwischen Fahrzeugalter und relativer Reifendruckabweichung	49
Abbildung 15: Beschädigte Felge	51
Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung nach Altersgruppen	54
Abbildung 17: Erkennung des RDKS-Warnsymbols durch die Befragten (n=38)	55
Abbildung 18: Interpretation der Bedeutung des RDKS-Warnsymbols (N=38)	56
Abbildung 19: Empfundene Dringlichkeit der RDKS-Warnung (n=17)	58
Abbildung 20: Tatsächliche Reaktionsgeschwindigkeit auf die letzte RDKS-Warnung (n=17)	59
Abbildung 21: Wahrgenommene Gründe für eine verzögerte Reaktion auf RDKS-Warnungen (n=7)	60
Abbildung 22: Grundsätzliches Vertrauen in RDKS (n=17)	61
Abbildung 23: Kenntnisse zur Initialisierung passiver RDKS nach Reifendruckanpassung oder Reifenwechsel (n=12)	62
Abbildung 24: Verantwortlichkeit für die Reifendruckkontrolle (n=38)	63
Abbildung 25: Häufigkeit der manuellen Reifendruckprüfung (n=38)	64
Abbildung 26: Gründe für Reifendruckprüfung (n=36)	65
Abbildung 27: Gründe den Reifendruck nicht häufiger zu prüfen (n=36)	67
Abbildung 28: Kenntnis, ob der Reifendruck warm oder kalt geprüft wird (n=38)	68
Abbildung 29: Auswirkungen von falschem Reifendruck (n=38)	69
Abbildung 30: Box-Plot der relativen Reifendruckdifferenz aller Achsen	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Deskriptive Statistik von Fahrzeugalter und Kilometerleistung	33
Tabelle 2: Deskriptive Statistik der relativen Reifendruckabweichung (mit und ohne RDKS)	39
Tabelle 3: Mediane relative Reifendruckabweichung nach Prüffrequenz	72

Formelverzeichnis

Formel (1): Berechnung der relativen Reifendruckabweichung	35
Formel (2): Normalisierung des Reifendrucks	36

1 Einleitung

1.1 Relevanz des Reifendrucks für die Fahrzeugsicherheit

Die Fahrzeugsicherheit basiert auf einer Vielzahl technischer Parameter, unter denen der korrekte Reifendruck eine fundamentale Rolle spielt. Eine prominente Fallstudie, die die kritische Bedeutung dieses Faktors eindrücklich untermauerte, war die Firestone-Ford-Kontroverse um die Jahrtausendwende. In dieser Zeit wurden zahlreiche Vorfälle mit Ford Explorer-Modellen bekannt, bei denen Reifenversagen eine Rolle spielte. Untersuchungen legten nahe, dass eine Kombination aus Fahrzeugcharakteristika und den von Ford empfohlenen Reifendrücken für Firestone-Reifen zu einer ungünstigen Betriebssituation führte, die im Extremfall das Ablösen von Laufflächen bei hohen Geschwindigkeiten begünstigte. Die Folgen dieser Kontroverse waren gravierend: Bis September 2001 wurden weltweit 192 Todesfälle und über 500 Verletzte in direkte Verbindung mit diesen Vorfällen gebracht (U.S. Department of Transportation et al., 2001).

Diese tragischen Ereignisse, die eine breite öffentliche Diskussion auslösten, hatten signifikante Auswirkungen auf die Automobilindustrie. Sie resultierten unter anderem in umfangreichen Rückrufaktionen und führten in den Vereinigten Staaten zur Verabschiedung des TREAD Act (Transportation Recall Enhancement, Accountability, and Documentation Act). Dieses Gesetz schrieb die obligatorische Einführung von Reifendruckkontrollsystemen (RDKS) in Neufahrzeugen vor und etablierte damit einen neuen Standard für die Überwachung des Reifendrucks (U.S. Department Of Transportation & NHTSA, 2001). Parallel zu diesen regulatorischen Entwicklungen manifestiert sich die fortwährende Relevanz der Reifenzustandsüberwachung auch in aktuellen Unfallstatistiken.

Trotz stetiger technologischer Fortschritte kommt es jährlich zu einer beträchtlichen Anzahl von Unfällen, bei denen technische Mängel eine Rolle spielen. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes ereigneten sich in Deutschland im Jahr 2020 insgesamt 264.499 Verkehrsunfälle mit Personenschäden. Erschreckenderweise waren davon 827 Unfälle, 13 davon mit tödlichem Ausgang, direkt auf Mängel an der Bereifung zurückzuführen (Dümmer, 2022). Die Reifen bilden die einzige Verbindung des Fahrzeugs zur Fahrbahn und ihr Fülldruck beeinflusst nahezu alle Reifeneigenschaften. Ein korrekter

Reifendruck ist nicht nur essenziell für ein stabiles Fahrverhalten und kurze Bremswege, sondern auch für die Sicherheit bei höheren Geschwindigkeiten. Ein zu geringer Reifendruck führt zu einer erhöhten Einfederung und damit zu verstärkter Walkarbeit des Reifens. Dieser Prozess generiert Wärme, die zur thermischen Überhitzung und im schlimmsten Fall zum Platzen des Reifens führen kann. Darüber hinaus beeinflusst der Reifendruck auch Komfort, Rollwiderstand und somit Kraftstoffverbrauch sowie CO₂-Emissionen und sogar Aspekte wie die Lenkunterstützung bei niedrigen Geschwindigkeiten.

Um das Risiko, das von falschem Reifendruck ausgeht, zu minimieren und die Fahrzeugsicherheit signifikant zu erhöhen, wurden Reifendruckkontrollsysteme entwickelt. Diese Systeme ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung des Reifendrucks und warnen den Fahrer bei Abweichungen vom Sollwert.

1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Die Motivation für die Wahl des vorliegenden Themas ergab sich aus Beobachtungen während eines Praktikums bei der GTÜ. Im Rahmen der Hauptuntersuchung wurde wiederholt festgestellt, dass Fahrzeuge trotz einer aktiven Warnung des RDKS zur Prüfung vorgestellt wurden. Dieses Verhalten der Fahrzeughalter lässt darauf schließen, dass die Warnmeldungen entweder ignoriert, die damit verbundenen Gefahren unterschätzt oder die Funktionsweise der Systeme unzureichend verstanden wird.

Daraus leitet sich die zentrale Fragestellung ab, inwieweit RDKS unter realen Bedingungen zur Einhaltung der Reifendruck-Sollwerte beitragen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, basierend auf empirischen Messungen und einer Kundenbefragung, die Abweichung von den korrekten Reifendruckwerten bei Fahrzeugen mit und ohne RDKS zu untersuchen und die Kundenakzeptanz und Wirksamkeit dieser Systeme zu bewerten. Grundlage hierfür bilden Fahrzeuge, die zur Hauptuntersuchung vorgestellt wurden, sowie ergänzende Kundenbefragungen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel, um eine systematische und nachvollziehbare Untersuchung der Kundenakzeptanz und Wirksamkeit von RDKS zu gewährleisten.

Zunächst werden die theoretischen Grundlagen gelegt, die für das Verständnis der Thematik essenziell sind. Dies umfasst den Einfluss des Reifendrucks auf die Reifeneigenschaften und die Fahrsicherheit, die relevanten gesetzlichen Rahmenbedingungen in den USA und der EU sowie die Funktionsweise und die Unterschiede von direkt und indirekt messenden RDKS. Ergänzend wird der aktuelle Stand der Forschung durch die Vorstellung relevanter Studien der OICA und NHTSA beleuchtet. Abschließend werden die statistischen Methoden erläutert, die zur Auswertung der erhobenen Daten verwendet werden.

Kapitel 3 beschreibt detailliert das methodische Vorgehen der empirischen Untersuchung. Es gliedert sich in zwei Hauptteile: die Reifendruckmessung und die Kundenbefragung. Für beide Teile werden jeweils die Zielsetzung, das Untersuchungsdesign, die Stichprobe, die verwendeten Messgrößen und -werkzeuge bzw. der Fragebogen sowie die konkrete Durchführung der Datenerhebung und die Maßnahmen zur Qualitätssicherung dargelegt.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Feldstudie präsentiert. Nach einer deskriptiven statistischen Auswertung der Stichprobe folgt die inferenzstatistische Analyse. In diesem Rahmen werden die zuvor aufgestellten Hypothesen, welche die Unterschiede zwischen Fahrzeugen mit und ohne RDKS, deren Reifendruckzustände sowie mögliche Korrelationen mit Fahrzeugalter und Kilometerleistung betreffen, geprüft und analysiert. Eine Extremwertanalyse sicherheitskritischer Abweichungen rundet das Kapitel ab.

Es folgt Kapitel 5 in dem die Auswertung der Kundenbefragung durchgeführt wird. Die Ergebnisse werden thematisch gegliedert und beleuchten die Erkennung und Einordnung des RDKS-Warnsymbols, die Reaktion der Fahrer auf Warnmeldungen, deren Fähigkeiten bei der Bedienung der Systeme sowie die allgemeinen Praktiken und Kenntnisse zur Reifendruckkontrolle.

Kapitel 6 führt die Ergebnisse aus den Messungen und der Befragung zusammen und stellt diese gegenüber. Es werden Zusammenhänge zwischen dem gemessenen Reifendruck und den Angaben der Fahrer analysiert. Darauf aufbauend werden die Limitationen der Arbeit kritisch reflektiert, um die Aussagekraft der Ergebnisse einzuordnen.

2 Grundlagen

2.1 Einfluss des Reifendrucks auf Reifeneigenschaften und Fahrsicherheit

Die Bereifung eines Fahrzeugs stellt die einzige Kontaktfläche zur Fahrbahn dar und erfüllt eine Vielzahl von grundlegenden Funktionen, die für den sicheren und effizienten Fahrzeugbetrieb unerlässlich sind. Zu den wesentlichen Anforderungen an Reifen zählen die Aufnahme der Gewichtskraft des Fahrzeugs, das Auffangen und Dämpfen von Fahrbahnstößen sowie die Übertragung von Antriebs-, Brems- und Seitenführungskräften. Darüber hinaus sind ein geringer Rollwiderstand, die präzise Übertragung der Lenkkräfte sowie eine ausreichende Lebensdauer und ein geräusch- und vibrationsarmes Abrollen wichtige Kriterien (Fischer et al., 2013, S. 520).

Der Reifendruck hat laut Leister einen entscheidenden Einfluss auf nahezu alle Reifeneigenschaften. Ein optimaler Reifendruck ist dabei ein Kompromiss zwischen verschiedenen, teils entgegengesetzten Anforderungen. Hinsichtlich des Komforts kann ein geringerer Reifendruck diesen durch eine Abnahme der vertikalen Federsteifigkeit des Reifens erhöhen. Ein höherer Luftdruck hingegen führt zu einer Abnahme des Wankwinkelgradienten, was das Wankverhalten des Fahrzeugs in Kurven beeinflusst und zu einer sportlicheren Fahrweise beitragen kann. Bezüglich des Rollwiderstands nimmt dieser mit steigendem Luftdruck ab, da ein höherer Reifendruck die Verformung des Reifens während der Abrollbewegung durch Walkarbeit reduziert (Leister, 2015, S. 251).

Die Schräglaufsteifigkeit, definiert als das Maß für die Seitenkraft, die ein Reifen bei einem bestimmten Schräglaufwinkel erzeugt, wird ebenfalls vom Reifendruck beeinflusst. Bei kleinen bis mittleren Radlasten nimmt sie bei erhöhtem Luftdruck ab, während sie bei hohen Radlasten zunimmt. Die seitliche Auswanderung unter Seitenkraft sowie die Relaxationslänge verringern sich mit zunehmendem Reifendruck. Die Relaxationslänge beschreibt hierbei die Rolldistanz, die ein Reifen benötigt, um nach einer Änderung des Schräglaufwinkels die dazugehörige Seitenkraft aufzubauen. Des Weiteren nimmt der Nachlauf des Reifens aufgrund einer kürzeren Latschlänge bei steigendem Reifendruck ab. Für den Schnelllauf ist zu beachten, dass ein zu geringer Reifendruck zu einer

größeren Einfederung und damit zu einer erhöhten Walkarbeit des Reifens führt. Dieser Prozess generiert eine verstärkte thermische Belastung, die im schlimmsten Fall zu einer Überhitzung und einem Reifenplatzer führen kann (Leister, 2015, S. 251).

Gründe für Druckverlust in Reifen sind vielfältig. Neben plötzlichen Verletzungen durch Fremdkörper oder Defekten an Ventilen und Rädern, die meist nur ein Rad betreffen, spielt die natürliche Diffusion der Luft durch den Reifen eine Rolle. Diese führt zu einem Druckverlust von etwa 40-60 mbar pro Monat, weshalb eine regelmäßige Reifendruckkontrolle unerlässlich ist (Leister, 2015, S. 252).

Ein nicht optimaler Reifendruck hat direkte und weitreichende Auswirkungen auf die Fahrsicherheit und Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugs. So können sowohl ein zu niedriger als auch ein zu hoher Reifendruck den Bremsweg signifikant verlängern, insbesondere unter nassen Fahrbahnbedingungen (Stokłosa & Bartnik, 2022). Dies beeinträchtigt die Fähigkeit des Reifens, Kräfte zwischen Fahrbahn und Fahrzeug optimal zu übertragen, und kann die Fahrsicherheit erheblich reduzieren.

Des Weiteren beeinflusst der Reifendruck den Verschleiß des Reifens erheblich. Bei Unterdruck kommt es zu übermäßigem Reifenverschleiß an beiden Schultern der Lauffläche. Die Last in der Kontaktfläche zur Fahrbahn ist ungleichmäßig verteilt, da der zentrale Bereich nicht ausreichend unterstützt wird und die Last stärker auf die äußeren Ränder verlagert wird. Diese höhere Belastung der Schultern führt zu einem beschleunigten Verschleiß an den Außenkanten. Im Gegensatz dazu führt Überdruck zu einem erhöhten Verschleiß im zentralen Bereich der Lauffläche, da dieser den Großteil der Last trägt und somit schneller abnutzt (What Can Cause Excessive Or Uneven Tyre Wear? | MICHELIN, o. D.). Der Reifenabrieb trägt zudem zur Umweltbelastung bei: In der EU fallen jährlich rund 500.000 Tonnen Reifenabrieb an, wobei synthetischer Kautschuk als Abrieb von Autoreifen in Deutschland etwa ein Drittel aller Mikroplastik-Emissionen ausmacht. Der überwiegende Teil dieses Abriebs verbleibt auf oder in der Nähe der Fahrbahn und gelangt bei Niederschlag in die Kanalisation oder versickert im Erdreich, was Gewässer und Böden belastet (Kroher, 2024).

Schließlich hat ein falscher Reifendruck auch Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch. Ein erhöhter Rollwiderstand, der durch einen nicht optimalen Reifendruck entsteht, erfordert mehr Antriebsenergie, was einen höheren Kraftstoffverbrauch und damit einhergehend einen erhöhten CO₂-Ausstoß zur Folge hat (Synák & Kalašová, 2020).

2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die Implementierung von RDKS in Kraftfahrzeugen wurde maßgeblich durch gesetzliche Vorgaben vorangetrieben, um die Fahrsicherheit zu erhöhen und negative Umweltauswirkungen zu minimieren. Hierbei lassen sich global unterschiedliche Ansätze in Bezug auf die Einführung und die technischen Spezifikationen feststellen.

In den Vereinigten Staaten wurde die RDKS-Pflicht als direkte Reaktion auf die Firestone-Ford-Kontroverse im TREAD Act verankert. Infolgedessen ist seit 2005 die Einfuhr von Fahrzeugen ohne RDKS in die USA nicht mehr gestattet. Die konkreten Anforderungen werden dabei durch den Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 138 präzisiert. Dieser schreibt vor, dass das RDKS innerhalb von 20 Minuten eine Warnung auslösen muss, wenn der Reifendruck eines oder mehrerer Reifen um 25% oder mehr unter den vom Hersteller empfohlenen Wert für kalte Reifen fällt, oder alternativ unter einen Mindestdruck von 140 kPa, je nachdem, welcher Wert der höhere ist. Diese Regelung deckt sowohl schleichenden Druckverlust als auch plötzlichen Druckabfall für bis zu vier Reifen ab (U.S. Department Of Transportation & NHTSA, 2001). Die Wahl der 25%-Schwelle erfolgte unter anderem mit der Begründung, übermäßig häufige und als störend empfundene Warnungen zu vermeiden, da dies dazu führen könnte, dass Fahrzeugnutzer die Warnmeldungen ignorieren (U.S. Department Of Transportation & NHTSA, 2001, S. II-5 f.).

In der EU wird die RDKS-Pflicht durch die Regelung Nr. 64 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) reguliert. Diese Pflicht gilt für alle neu homologierten Fahrzeuge der Klasse M1 und N1 seit dem 1. November 2012 und wurde ab dem 1. November 2014 auf alle neu zugelassenen Fahrzeuge dieser Klassen ausgeweitet. Die Anforderungen an RDKS gemäß UN/ECE-Regelung Nr. 64 beinhalten spezifische Auslöseschwellen und Reaktionszeiten. Das System muss spätestens ab einer Geschwindigkeit von 40km/h bis zur bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs funktionsfähig sein. Bei einem plötzlichen Druckabfall (Durchschlag) muss das System eine Warnung auslösen, wenn der Reifendruck um 20% unter den Referenzdruck oder unter 1,5 bar abfällt, je nachdem, welcher Wert der höhere ist. Diese Warnung muss spätestens nach 10 Minuten erfolgen (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE), 2010, Kapitel 5.3.2). Bei schleichendem Druckverlust (Diffusion) muss das System warnen, wenn der Reifendruck um 20% unter den

Referenzdruck fällt, wobei die Warnung hier spätestens nach 60 Minuten ausgegeben werden muss (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE), 2010, Kapitel 5.3.3).

2.3 Reifendruckkontrollsysteme

2.3.1 Indirekt messende Systeme

Indirekt messende RDKS ermitteln den Reifendruck nicht direkt, sondern leiten diesen aus der Reifendrehzahl ab. Das Funktionsprinzip basiert auf der physikalischen Gegebenheit, dass mit zunehmendem Druckverlust der Abrollumfang eines Reifens abnimmt, was wiederum zu einer höheren Raddrehzahl bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit führt (Zühlke, 2015, S. 17). Eine wesentliche Herausforderung für diese Systeme ist die Tatsache, dass der Abrollumfang primär von der Radlast und erst sekundär vom Luftdruck abhängt. Dies erfordert eine präzise Abstimmung des Systems auf variable Zustände wie unsymmetrische Beladung, Dachlast oder Anhängerbetrieb (Leister, 2015, S. 255).

Ein großer Vorteil indirekter RDKS liegt in ihrer Kosteneffizienz, da sie die bereits vorhandenen Raddrehzahlsensoren nutzen, die für Systeme wie ABS und ESP ohnehin verbaut sind, wodurch weniger zusätzliche Bauteile benötigt werden (Zühlke, 2015, S. 17). Die Raddrehzahlen werden an das ABS/ESP-Steuergerät übertragen und miteinander verglichen, insbesondere während der Geradeausfahrt, um Druckverluste zu detektieren (Zühlke, 2015, S. 18 f.). Durch den Einsatz von aktiven Radsensoren, die nach dem Hall-Effekt arbeiten, kann die Genauigkeit der Messung im Vergleich zu induktiven Sensoren erhöht werden, da diese bereits im Stillstand auswertbare Signale liefern (Zühlke, 2015, S. 19 f.). Diese aktiven Sensoren ermöglichen zudem eine bessere Eigendiagnose durch ein Standby-Signal. Sie sind in der Lage, Luftspaltschwankungen zwischen dem Polkopf des Sensors und dem Geberrad zu überwachen, was die Erkennung von schleichendem Druckverlust (Diffusion) ermöglicht. Ein sinkender Reifendruck führt zu einer höheren Radeigenfrequenz, die sich in solchen Luftspaltschwankungen äußert (Zühlke, 2015, S. 20). Durch die Spektralanalyse der Luftspaltschwankung in Kombination mit der Raddrehzahl, dem Lenkwinkel und dem

Motordrehmoment kann ein gleichzeitiger Druckverlust an allen Reifen erkannt werden (Zühlke, 2015, S. 20; Leister, 2015, S. 257).

Nach jeder Änderung an der Bereifung, sei es durch einen Räderwechsel, die Montage neuer Reifen oder eine Anpassung des Reifendrucks, ist eine Anlernphase des Systems erforderlich (Zühlke, 2015, S. 21; Leister, 2015, S. 255). Dieser Anlernprozess wird manuell über Bedienelemente im Fahrzeug (Funktionsschalter oder Menü) ausgelöst und darf nur bei zulässiger Bereifung mit korrektem Reifendruck gestartet werden, um die Anlernung fehlerhafter Sollwerte zu vermeiden. Während dieses Prozesses, der in der Regel mindestens 15 Minuten bei Geschwindigkeiten über 20 km/h dauert, wird die Abrollcharakteristik der einzelnen Räder ermittelt (Zühlke, 2015, S. 21). Es ist zudem notwendig, bestimmte Fahrzustände wie Fahrten mit Schneeketten, Spikes, Fahrten auf Schotter oder Gras sowie schlechte Landstraßen oder Feldwege zu erkennen und gegebenenfalls im Algorithmus auszublenden. Auch die Kurvenfahrt muss mittels eines Lenkradwinkelsensors erkannt und im Algorithmus speziell behandelt werden (Leister, 2015, S. 255).

Zu den Vorteilen indirekt messender Systeme zählen neben den bereits erwähnten niedrigeren Kosten eine einfache Handhabung im Falle eines Reifenwechsels und ihre Wartungsfreiheit. Der wesentliche Nachteil besteht jedoch darin, dass der absolute Reifendruck nicht ermittelt und somit auch nicht angezeigt werden kann (Leister, 2015, S. 255 f.). Zudem birgt eine falsche Bedienung der Reset-Taste das Risiko, dass das System fehlerhafte Referenzwerte anlernt und somit seine Warnfunktion nicht korrekt erfüllt (Leister, 2015, S. 258).

2.3.2 Direkt messende Systeme

Direkt messende RDKS zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit aus, was jedoch mit erhöhten Kosten in der Produktion und Wartung einhergeht (Zühlke, 2015, S. 17). Das Funktionsprinzip basiert auf batteriebetriebenen Sensoren, die in jedem Rad montiert sind und kontinuierlich den Reifendruck sowie die Temperatur erfassen. Diese Messwerte werden zusammen mit der Sensor-ID zur eindeutigen Identifikation des jeweiligen Rades per Funk an ein zentrales Steuergerät im Fahrzeug übermittelt (Zühlke, 2015, S. 17, 22).

Je nach Fahrzeug- und Systemhersteller existieren grundsätzlich zwei Hauptkonfigurationen für direkt messende RDKS (Zühlke, 2015, S. 22 f.). Die erste Konfiguration, wie in Abbildung 1 dargestellt, verwendet mehrere Empfänger, typischerweise vier, die jeweils in unmittelbarer Nähe eines Rades (oft im Radkasten) platziert sind.

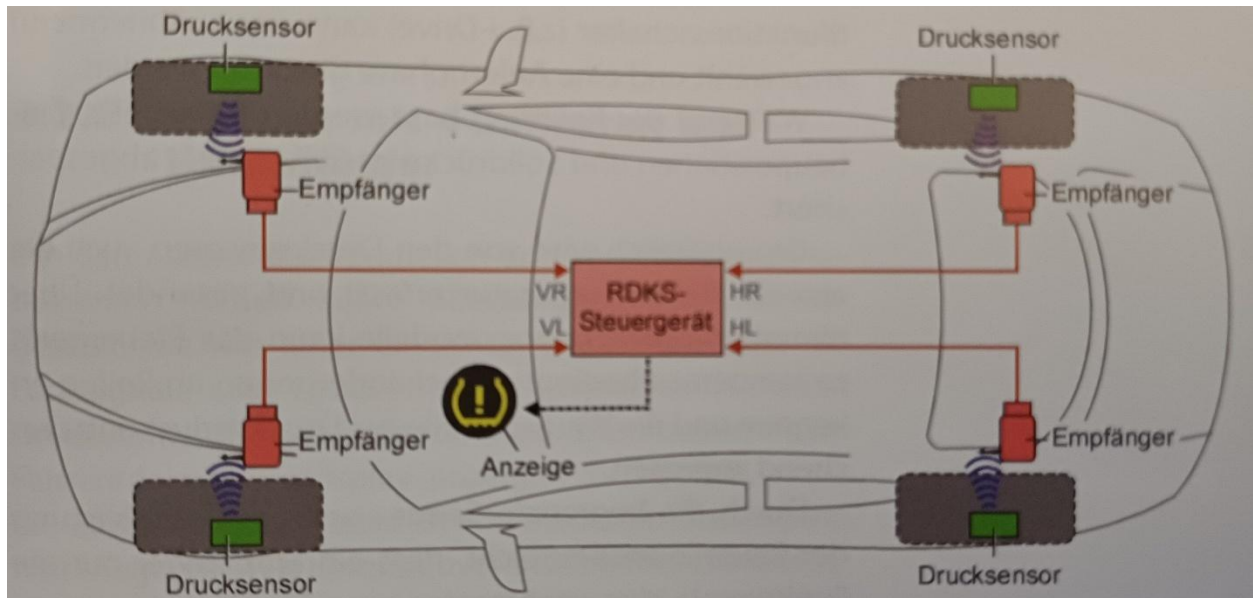


Abbildung 1: RDKS-Konfiguration mit 4 Sensoren und 4 Empfängern (Zühlke, 2015, S. 23)

Die begrenzte Sende- und Empfangsleistung der einzelnen Bauteile sorgt dafür, dass jeder Empfänger primär das Signal des nächstgelegenen Sensors empfängt, was eine automatische Positionserkennung der Räder ermöglicht (Zühlke, 2015, S. 23 ff.).

Die zweite Konfiguration nutzt lediglich einen Empfänger für alle vier Sensoren, was die Anzahl der benötigten Bauteile und den Verkabelungsaufwand reduziert (Zühlke, 2015, S. 25). Bei Systemen mit nur einem Empfänger kann die Positionserkennung der Räder entweder manuell oder automatisch erfolgen. Bei Systemen ohne Eigenraderkennung müssen die Sensoren und ihre Positionen manuell angelernt werden. Demgegenüber ermöglichen Systeme mit Eigenraderkennung, bei denen die Empfangseinheit dezentral im Fahrzeugboden angebracht ist (Abbildung 2), eine automatische Positionserkennung, da die Signalstärke der Sensoren je nach Radposition variiert und somit eine Zuordnung zulässt (Zühlke, 2015, S. 28).

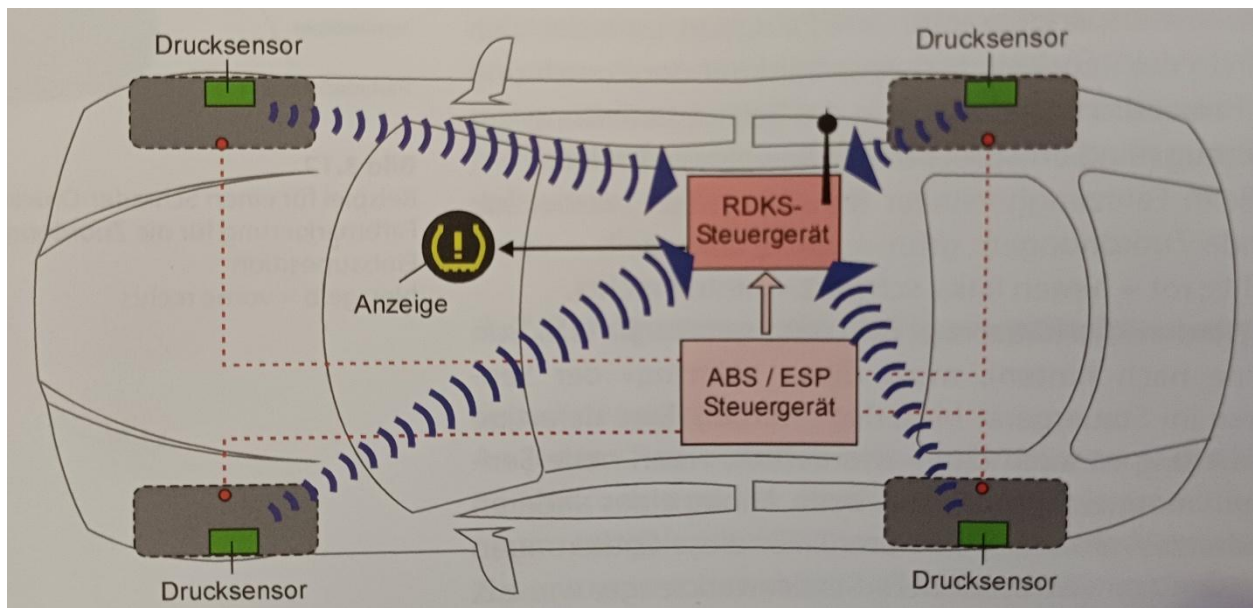


Abbildung 2: RDKS-Konfiguration mit dezentralem Empfänger und 4 Sensoren (Zühlke, 2015, S. 22 f.)

Trotz ihrer Vorteile in der Messgenauigkeit weisen direkt messende RDKS auch Nachteile auf. Die Batterien der Sensoren haben eine begrenzte Lebensdauer von typischerweise sieben bis zehn Jahren, was regelmäßigen Wartungsaufwand und Kosten für den Austausch verursachen kann. Zudem erfordern diese Systeme die Verwendung von Spezialventilen, die für die hohen Belastungen durch Fliehkräfte bei hohen Geschwindigkeiten ausgelegt sind. Ein weiterer Nachteil ist ihre Anfälligkeit für elektromagnetische Störungen, die die Funkübertragung der Messwerte beeinträchtigen können (Leister, 2015, S. 261 f.).

2.4 Stand der Forschung

2.4.1 OICA Reifendruck Feldstudie von 2016/2017

Eine grundlegende Studie zur Beurteilung der Effektivität von RDKS wurde von der Organisation OICA (Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles) unter dem Titel "TPMS and Tyre Inflation Pressure Field Study 2016/2017" durchgeführt. Obwohl es sich hierbei nicht um eine offiziell publizierte Studie im Sinne eines Peer-Review-Verfahrens handelt, sondern um eine Präsentation von Untersuchungsergebnissen, bietet sie wertvolle Einblicke. Die Untersuchung verglich die gemessenen

Reifendrücke mit den vom Hersteller empfohlenen Reifendrücken bei 1470 Fahrzeugen in Schweden, Deutschland und Spanien. Die erfassten Daten umfassten neben dem RDKS-Typ auch Reifengröße, Beladungszustand, Reifendruck und -temperatur sowie die Umgebungstemperatur. Die Stichprobe setzte sich aus 54% Fahrzeugen ohne RDKS, 21% mit passivem RDKS und 25% mit aktivem RDKS zusammen (OICA, 2017).

Die wichtigsten Ergebnisse der OICA-Studie sind für die vorliegende Arbeit von hoher Relevanz. Sie zeigten, dass die Ausstattung mit einem RDKS die Anzahl der Fahrzeuge mit starkem Unterdruck (unter -20% der Sollwertabweichung) um 90% reduziert. Auch der Anteil von Fahrzeugen mit Unterdruck von mehr als 5% verringerte sich durch RDKS um 40%. Bemerkenswert ist zudem, dass indirekte und direkt messende RDKS als gleichermaßen effektiv eingestuft wurden. Die Studie fand keine Fälle, in denen der Reifendruck eines oder mehrerer Reifen bei Fahrzeugen mit RDKS unter 150kPa lag, ohne dass bereits eine Warnung ausgegeben worden wäre. Im Gegensatz dazu wurden 46 Reifen mit einem Druck unter 150kPa bei 33 Fahrzeugen ohne RDKS festgestellt. Ferner wiesen Daten von RDKS-ausgestatteten Fahrzeugen eine um ca. 60% geringere Standardabweichung auf als solche ohne RDKS (OICA, 2017).

Die OICA-Studie bildet einen zentralen Vergleichspunkt für die eigene Reifendruckmessung, da sie in ihrer Methodik weitgehend identisch ist, wenngleich sie auf einer wesentlich größeren Datenbasis beruht. Die Ergebnisse der OICA-Studie, insbesondere die Feststellung einer geringeren Streuung der Reifendrücke bei RDKS-ausgestatteten Fahrzeugen, bestätigen die ersten Erkenntnisse aus der eigenen Pilotstudie. Obwohl die erhobenen Daten der OICA-Studie aus den Jahren 2016/2017 stammen und somit in Bezug auf den heutigen Anteil von RDKS-ausgestatteten Fahrzeugen in der Flotte leicht veraltet sein könnten, liefert sie dennoch valide und für die vorliegende Untersuchung hochrelevante Erkenntnisse zur Wirksamkeit von RDKS.

2.4.2 NHTSA Studie

Eine weitere maßgebliche Studie zur Bewertung der Effektivität von RDKS wurde von Robert Sivinski für die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) im November 2012 veröffentlicht, mit dem primären Ziel, die Wirksamkeit von RDKS bei der Reduzierung von Unterdruck in der im Straßenverkehr befindlichen Pkw-Flotte zu beurteilen. Die Methodik umfasste die landesweite Erhebung von Reifendrücken an

Fahrzeugen der Baujahre 2004 bis 2011 innerhalb der USA. Als Schlüsselvariablen wurden der vom Hersteller vorgegebene Reifendruck, der tatsächlich gemessene Reifendruck und die Reifentemperatur erfasst. Die Stichprobe umfasste insgesamt 6103 Fahrzeuge, davon 3208 Pkw und 2895 leichte Nutzfahrzeuge. Von diesen waren 4391 Fahrzeuge mit RDKS ausgestattet (davon 209 mit passivem und 4182 mit aktivem System), während 1712 Fahrzeuge kein RDKS besaßen (Sivinski, 2012).

Die Ergebnisse der Sivinski-Studie belegen die Wirksamkeit von RDKS. Es wurde geschätzt, dass RDKS zu einer Reduzierung von kritischem Unterdruck (definiert als $\geq |25\%|$ unter dem Solldruck gemäß FMVSS No. 138) um 55,6% beitragen. Interessanterweise wurde auch eine Effektivität von 30,7% bei der Verhinderung von kritischem Überdruck (mindestens 25% über dem empfohlenen Kaltdruck des Herstellers) festgestellt. Sivinski schlussfolgerte aus seinen Befunden, dass Fahrzeuge mit RDKS ein geringeres Risiko für Unfälle im Zusammenhang mit Reifenversagen, längeren Bremswegen oder Traktionsverlust aufweisen sollten. Zudem prognostizierten sie, dass diese Fahrzeuge einen besseren Kraftstoffverbrauch erzielen und Reifen besitzen sollten, die länger halten und eine verbesserte Reaktion und Handhabung bieten (Sivinski, 2012).

Die Studie von Sivinski ist für die vorliegende Bachelorarbeit von hoher Relevanz, da sie im Kern eine ähnliche Forschungsfrage verfolgt und Daten zur Reifendruckabweichung im Verhältnis zu Herstellervorgaben sammelt, um die Effektivität von RDKS zu beurteilen. Allerdings sind die Daten (erhoben zwischen August 2010 und April 2011) bereits etwas älter und beziehen sich spezifisch auf den US-Markt, was bei der Übertragung der Ergebnisse auf die europäische Flotte und die aktuelle Situation zu berücksichtigen ist.

2.5 Statistische Auswertung

2.5.1 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik bildet die Grundlage jeder Datenanalyse, indem sie die vorliegenden Messwerte zusammenfassend beschreibt. Ihr Hauptziel ist es, die zentrale Tendenz und die Streuung von Messungen sowie die Form der Verteilung der Daten zu charakterisieren (Hedderich & Sachs, 2020, S. 70).

Ein zentrales Maß zur Beschreibung der Datenverteilung ist der Median. Anders als der arithmetische Mittelwert, der durch Ausreißer stark beeinflusst werden kann, ist der Median robust gegenüber extremen Werten und eignet sich daher besonders gut für nicht-normalverteilte Datensätze. Der Median ist jener Wert, der die geordnete Reihe von Beobachtungen in zwei gleich große Hälften teilt (Hedderich & Sachs, 2020, S. 83). Jeder einzelne Wert nimmt dabei einen festen Rang innerhalb der Anordnung der gesamten Datenmenge ein (Hedderich & Sachs, 2020, S. 81).

Zur weiteren Charakterisierung der Verteilung werden Quantile herangezogen. Quantile teilen die der Größe nach aufsteigend sortierten Beobachtungen in gleich große Teile ein. Ein häufig verwendeter Spezialfall der Quantile sind die Quartile, welche die Beobachtungen in vier gleich große Teile gliedern (Hedderich & Sachs, 2020, S. 84).

Aus den Quartilen lässt sich der Interquartilsabstand (IQR) ableiten. Dieser Wert ergibt sich aus der Differenz zwischen dem dritten und dem ersten Quartil und umfasst die mittleren 50% der Beobachtungen. Dementsprechend liegen 25% der Beobachtungen unterhalb des ersten Quartils und 25% oberhalb des dritten Quartils (Hedderich & Sachs, 2020, S. 85).

Eine effektive Methode zur grafischen Darstellung dieser deskriptiven Maßzahlen ist der Boxplot. Er visualisiert übersichtlich den Median, die Quartile und den Interquartilsabstand und gibt zudem Aufschluss über die Spannweite der Daten sowie potenzielle Ausreißer. Ein Beispiel für die Darstellung dieser Maßzahlen mittels eines Boxplots ist in Abbildung 3 dargestellt.

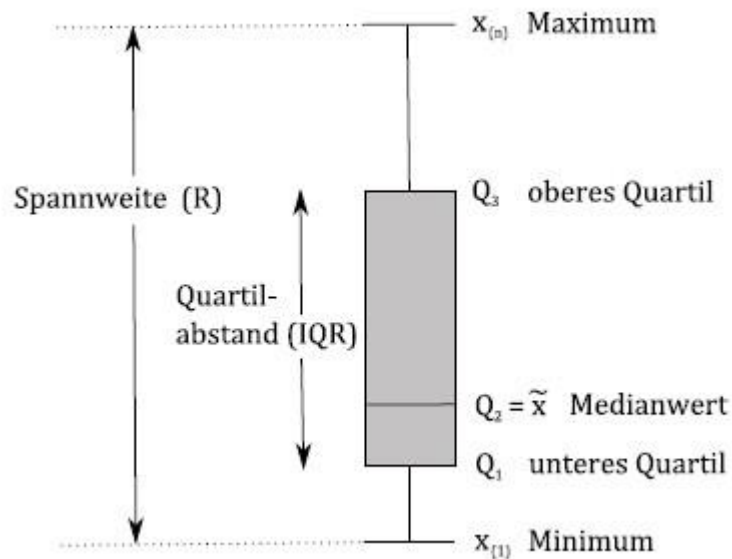


Abbildung 3: Boxplot mit Quartilen und IQR (Hedderich & Sachs, 2020, S. 86)

2.5.2 Hypothesentests

Eine statistische Hypothese ist eine Behauptung oder Annahme über eine oder mehrere Populationen, die man mithilfe von Stichprobendaten überprüfen kann. Diese Hypothesen sind jedoch nur indirekt prüfbar. Das bedeutet, man kann eine Arbeitshypothese (oder Alternativhypothese H_1) nicht direkt bestätigen. Stattdessen versucht man, die Nullhypothese (H_0) zu widerlegen. Gelingt dies, kann man die Alternativhypothese indirekt stützen (Hedderich & Sachs, 2020, S. 456).

Die meisten statistischen Tests beruhen auf der Annahme, dass die Beobachtungen in der Stichprobe unabhängig voneinander sind. Für die Entscheidung über die Nullhypothese berechnen die meisten Tests eine spezifische Prüfgröße (Hedderich & Sachs, 2020, S. 457).

Bei der Durchführung von Hypothesentests können Fehler auftreten, da die Schlussfolgerungen auf Stichprobenergebnissen basieren:

Ein Fehler 1. Art tritt auf, wenn die Nullhypothese (H_0) verworfen wird, obwohl sie in Wirklichkeit wahr ist (Hedderich & Sachs, 2020, S. 457).

Ein Fehler 2. Art liegt vor, wenn die Nullhypothese (H_0) nicht verworfen wird, obwohl sie in Wirklichkeit falsch ist (Hedderich & Sachs, 2020, S. 457).

Der P-Wert dient als Evidenzmaß für die Nullhypothese. Er gibt die Wahrscheinlichkeit an, die beobachteten Daten zu erhalten, wenn die Nullhypothese wahr wäre. Je kleiner der P-Wert ist, desto leichter lässt sich die Nullhypothese ablehnen, da dies bedeutet, dass die beobachteten Daten unter Annahme der Nullhypothese unwahrscheinlich sind (Hedderich & Sachs, 2020, S. 461).

Traditionell wird ein nominelles Signifikanzniveau von 0,05 verwendet. Liegt der P-Wert über diesem Niveau, gilt das Ergebnis als statistisch nicht signifikant. Je kleiner der P-Wert ausfällt, desto signifikanter ist das Ergebnis (Hedderich & Sachs, 2020, S. 461). Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass der P-Wert die Nullhypothese nicht direkt widerlegt. Er liefert lediglich die statistische Evidenz, um sie basierend auf einem festgelegten Signifikanzniveau zu verwerfen oder nicht zu verwerfen (Hedderich & Sachs, 2020, S. 457).

2.5.3 Überprüfung auf Normalverteilung

Vor der Anwendung vieler statistischer Tests ist es entscheidend, die Verteilungsform der Daten zu prüfen, insbesondere auf Normalverteilung. Hierfür kommen sowohl grafische Methoden als auch statistische Tests zum Einsatz.

Quantile-Quantile Plots (QQ-Plots) sind grafische Werkzeuge, die dazu dienen, die Quantile zweier Messwertreihen miteinander zu vergleichen oder die Quantile einer Messwertreihe mit denen einer theoretischen Verteilung abzugleichen. Für die Prüfung auf Normalverteilung werden die Quantile der beobachteten Stichprobendaten gegen die Quantile einer theoretisch idealen Normalverteilung aufgetragen (Hedderich & Sachs, 2020, S. 486 f.).

Als Referenzlinie wird eine 45-Grad-Linie in den Plot eingezeichnet. Liegen die Datenpunkte im QQ-Plot annähernd entlang dieser Referenzlinie, deutet dies darauf hin, dass die Daten einer Normalverteilung folgen. Starke Abweichungen von der Winkelhalbierenden hingegen sind ein deutliches Indiz dafür, dass die Daten nicht normalverteilt sind.

Neben der visuellen Prüfung durch QQ-Plots kann die Normalverteilung auch mithilfe statistischer Tests überprüft werden. Der Shapiro-Wilk-Test ist ein solcher Test, der prüft, ob eine Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt (Hedderich & Sachs, 2020, S. 489 f.). Die Nullhypothese dieses Tests geht davon aus, dass die Daten normalverteilt sind. Ein kleiner P-Wert (unter 0,05) würde daher auf eine Ablehnung der Normalverteilungsannahme hindeuten.

2.5.4 Angewandte statistische Tests

Der t-Test ist ein parametrisches Verfahren, das im Kern die Mittelwerte zweier Stichproben vergleicht, um festzustellen, ob ein signifikanter Unterschied zwischen ihnen besteht (Hedderich & Sachs, 2020, S. 547). Eine der Hauptvoraussetzungen für die Anwendung des t-Tests ist die Normalverteilung der Daten in den verglichenen Gruppen (Hedderich & Sachs, 2020, S. 546). Wie in Kapitel 2.5.3 erläutert, lässt sich diese Voraussetzung mithilfe von QQ-Plots und dem Shapiro-Wilk-Test überprüfen.

Falls die Voraussetzung der Normalverteilung für den t-Test nicht erfüllt ist, kommt der Mann-Whitney-U-Test zum Einsatz, auch bekannt als Wilcoxon-Rangsummentest. Dies ist eine nicht-parametrische Alternative zum t-Test, die bei nicht-normalverteilten Daten angewendet werden kann. Anstatt Mittelwerte zu vergleichen, prüft der Mann-Whitney-U-Test, ob sich die Mediane zweier Stichproben signifikant voneinander unterscheiden (Hedderich & Sachs, 2020, S. 566).

Zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen kategorialen Variablen wird der exakte Fisher-Test verwendet. Dieser Test eignet sich besonders zur Überprüfung eines Zusammenhangs zwischen den Häufigkeiten zweier kategorialer Variablen, die in einer 2x2-Vierfeldertafel dargestellt sind. Ein wesentlicher Vorteil des exakten Fisher-Tests liegt in seiner Zuverlässigkeit auch bei sehr kleinen Zellbesetzungen, selbst wenn einzelne Zellen den Wert Null aufweisen (Hedderich & Sachs, 2020, S. 741).

Wenn mehr als zwei unabhängige Gruppen verglichen werden sollen und die Daten nicht normalverteilt sind, ist der Kruskal-Wallis-H-Test die geeignete Methode. Dieser Mehrstichprobentest prüft die Nullhypothese, dass die Stichproben aus derselben Grundgesamtheit stammen bzw. dass die Verteilungsfunktionen der Gruppen gleich sind. Die

Alternativhypothese besagt, dass mindestens zwei der Gruppen unterschiedliche Verteilungen aufweisen (Hedderich & Sachs, 2020, S. 651).

Der Spearman-Korrelationskoeffizient (r_s) ist ein nicht-parametrisches Maß, das die Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen bestimmt. Er wird bevorzugt angewendet, wenn die Voraussetzungen für den parametrischen Pearson-Korrelationskoeffizienten, wie beispielsweise die Normalverteilung der Daten, nicht gegeben sind (Hedderich & Sachs, 2020, S. 132).

3 Methodik

3.1 Reifendruckmessung

3.1.1 Zielsetzung der Feldstudie

Die Reifendruckmessung im Rahmen dieser Arbeit verfolgt das Ziel, die Wirksamkeit von RDKS unter realen Betriebsbedingungen zu beurteilen. Im Vordergrund steht dabei die Untersuchung, inwieweit RDKS dazu beitragen, die vom Fahrzeughersteller vorgegebenen Reifendruck-Sollwerte einzuhalten. Durch die systematische Erfassung empirischer Daten soll eine objektive Faktenlage geschaffen werden, welche die tatsächliche Reifendrucksituation in der Fahrzeugflotte, differenziert nach dem Vorhandensein von RDKS, widerspiegelt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse bilden die quantitative Basis für die Bewertung der Effektivität dieser Sicherheitssysteme im Alltag.

3.1.2 Untersuchungsdesign und Stichprobe

Die vorliegende Untersuchung ist als Querschnittsstudie konzipiert, welche darauf abzielt, die Reifendrucksituation zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erfassen.

Die Zielpopulation dieser Studie umfasst alle Fahrzeuge der Klassen M1 und M1G, die im deutschen Straßenverkehr zugelassen sind. Als Stichprobenrahmen dienen hierbei Fahrzeuge, die im Erhebungszeitraum bei einer GTÜ-Prüfstelle zur Hauptuntersuchung vorstellig werden. Die Methode der Stichprobenziehung ist eine Gelegenheitsstichprobe. Diese Wahl erfolgte aufgrund der praktischen Zugänglichkeit der Fahrzeuge im Rahmen des täglichen Prüfbetriebs.

Die angestrebte Stichprobengröße wurde mittels einer a-priori Poweranalyse unter Verwendung des Tools G*Power ermittelt, um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten (Faul et al., 2009). Für diese initiale Berechnung wurde ein unabhängiger t-Test zugrunde gelegt. Dieser Test wurde zu diesem Zeitpunkt als geeignetes Verfahren für den Vergleich der Mittelwerte einer kontinuierlichen Variable (in diesem Fall der relativen Reifendruckabweichung) zwischen zwei unabhängigen Gruppen (Fahrzeuge mit und ohne RDKS) erachtet.

Die Effektstärke wurde auf Basis der Daten einer im Vorfeld dieser Studie absolvierten Pilotstudie berechnet, in der die Reifendrücke von 30 Fahrzeugen (16 mit RDKS, 14 ohne RDKS) gemessen wurden. Die resultierende Effektstärke von 0,47 deutet auf einen mittleren bis großen Unterschied zwischen den Gruppen hin. Das Signifikanzniveau α wurde konservativ mit 5% angenommen, ein häufig verwendeter Standardwert in der empirischen Forschung, der die Wahrscheinlichkeit eines Typ-I-Fehlers (fälschliche Ablehnung der Nullhypothese) auf ein vertretbares Maß begrenzt. Bei einem Allokationsverhältnis N_2/N_1 von 0,875 (entsprechend dem Verhältnis der RDKS-Gruppen in der Pilotstudie) und einer angestrebten Teststärke von 95% ergab die Berechnung eine notwendige Stichprobengröße von 240 Reifen. Da ein Fahrzeug der Klasse M1 und M1G vier Reifen besitzt, resultiert dies in einer benötigten Stichprobengröße von 60 Fahrzeugen.

Nach der Datenerhebung wurde die Voraussetzung der Normalverteilung für die tatsächlichen Daten beider Stichproben geprüft. Da die Shapiro-Wilk-Tests statistisch signifikante Abweichungen von der Normalverteilung aufzeigten ($p < 0.05$ für beide Gruppen, visuell bestätigt durch QQ-Plots), wurde für die finale Hypothesenprüfung der Mann-Whitney-U-Test als angemessene Alternative zum t-Test eingesetzt.

Für die Ein- und Ausschlusskriterien der Fahrzeuge wurden folgende Festlegungen getroffen: Ausschließlich Fahrzeuge der Klassen M1 und M1G wurden in die Studie einbezogen. Ausgeschlossen wurden hingegen Oldtimer, Luxusfahrzeuge und Wohnmobile sowie Fahrzeuge mit nicht serienmäßigen Rad-Reifenkombinationen, für die keine Herstellerwerte zum Reifendruck verfügbar sind. Dies gewährleistet eine Homogenität der Stichprobe.

3.1.3 Messgrößen und -werkzeug

Als primäres Instrument zur Messung des Reifendrucks kam ein analoges Präzisionsreifendruckmessgerät der Firma Flaig, Modellbezeichnung RM/4, zum Einsatz. Dieses Gerät ermöglicht Messungen im Bereich von 0 bis 4 bar. Die Genauigkeit des Messgeräts ist gemäß EN 837 – 1/6 mit $\pm 1\%$ des Skalenendwertes angegeben. Dies resultiert in einer Messgenauigkeit von $\pm 0,04$ bar über den gesamten Messbereich, was eine hohe Präzision für die Erfassung der Reifendruckwerte sicherstellt. Zur Erfassung der Reifentemperatur wurde ein Infrarotthermometer von Bosch (UniversalTemp) verwendet.

Dieses Gerät verfügt über einen Messbereich von -30°C bis 500°C , wobei die Messgenauigkeit für den relevanten Temperaturbereich zwischen 0°C und 100°C mit $\pm 1,8^{\circ}\text{C}$ angegeben wird.

Die erhobenen Messgrößen umfassten neben dem Reifendruck und der Reifentemperatur aller vier Reifen auch deren jeweilige Reifengröße an Vorder- und Hinterachse. Von zentraler Bedeutung für die spätere Analyse war zudem die Protokollierung des vom Hersteller vorgegebenen Reifendruck-Solldrucks, sowohl für leichte als auch für schwere Beladung. Des Weiteren wurde der Beladungszustand des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Messung erfasst. Für die spätere Auswertung war es von großer Bedeutung zu dokumentieren, ob eine RDKS-Warnleuchte im Fahrzeug existierte und funktionierte, ob sie eine aktive Warnung anzeigte und welcher RDKS-Typ (direkt oder indirekt) im Fahrzeug verbaut war. Ergänzend wurden allgemeine Fahrzeugdaten wie Hersteller, Modell, Datum der Erstzulassung und der aktuelle Kilometerstand festgehalten. Jede Messung erhielt eine fortlaufende Nummer, zusammen mit dem Datum und der Uhrzeit der Messung.

3.1.4 Durchführung der Datenerhebung

Die Datenerhebung im Rahmen dieser Feldstudie erfolgte systematisch an einer GTÜ-Prüfstelle und wurde darauf ausgelegt, den regulären Prüfablauf der Hauptuntersuchung möglichst wenig zu stören. Der Prozess der Datenerfassung begann unmittelbar nach der Übergabe des Fahrzeugscheins durch den Kunden, da dieser die ersten wichtigen Informationen wie Erstzulassungsdatum, Marke und Modell des Fahrzeugs liefert.

Nach der Vergabe einer eindeutigen laufenden Nummer wurde zunächst der RDKS-Typ des Fahrzeugs bestimmt und der aktuelle Beladungszustand festgestellt. Parallel dazu wurden die Reifengröße an Vorder- und Hinterachse sowie der vom Hersteller empfohlene Solldruck für leichte und schwere Beladung dokumentiert. Der Solldruck wurde primär über den Aufkleber im Bereich des Fahrertür-Einstiegs oder im Tankdeckel ermittelt. Sollte dieser nicht vorhanden gewesen sein, erfolgte die Recherche in der Betriebsanleitung, entweder direkt im Handschuhfach des Fahrzeugs oder im Nachgang durch Download aus dem Internet. Diese Schritte konnten üblicherweise während der Abgasuntersuchung des Fahrzeugs durchgeführt werden. Sobald die laufende Nummer

und der RDKS-Typ erfasst waren, konnte, sofern vorgesehen, mit der ergänzenden Kundenbefragung begonnen werden.

Die eigentliche Reifendruck- und Temperaturmessung erfolgte anschließend, meist wenn das Fahrzeug bereits auf der Hebebühne stand oder für das Aufbocken vorbereitet wurde. Die Positionierung auf der Hebebühne oder Grube mit Achsfreiheber ermöglichte es, die Messungen in einem Zug durchzuführen und somit konsistente Ergebnisse zu gewährleisten, da das Fahrzeug währenddessen am längsten am selben Platz verweilt. Zuerst wurde die Reifentemperatur mit einem Infrarotthermometer (Bosch Universal-Temp) gemessen. Pro Reifen wurden hierfür zwei Messungen an der 3-Uhr- und 9-Uhr-Position durchgeführt und der Mittelwert gebildet. Gemessen wurde mit einem Emissionsgrad von 0,95, dem für Gummi passenden Modus laut Gebrauchsanweisung, und einem Messabstand von einem Meter. Unmittelbar danach folgte die Reifendruckmessung. Vor jeder Messung wurde die Nullposition des Zeigers überprüft und bei Bedarf das Ziffernblatt entsprechend justiert. Die Reihenfolge der Reifenmessung war nicht strikt festgelegt, um den Prüfablauf nicht zu verzögern. Es sei anzumerken, dass eine Sicherstellung "kalter" Reifen nicht notwendig war, da die gemessene Reifentemperatur später für die Normalisierung des Reifendrucks auf 20°C verwendet wurde.

Die Bestimmung des RDKS-Typs erfolgte durch eine Kombination mehrerer Indizien. Bei einer Erstzulassung des Fahrzeugs nach dem 1. November 2014 war das Vorhandensein eines RDKS obligatorisch. Bei älteren Fahrzeugen wurde durch Einschalten der Zündung geprüft, ob die RDKS-Warnleuchte im Selbsttest aufleuchtet. Ein erster Hinweis auf den RDKS-Typ konnte oft über das Reifenventil gewonnen werden: Gummiventile deuteten auf ein passives RDKS hin, während Metallventile in der Regel ein aktives System signalisierten. Zusätzliche sichere Indizien für ein passives RDKS waren ein Hinweis auf dem Solldruck-Aufkleber zur Betätigung der Set-Taste nach Druckkorrektur, das Vorhandensein einer physischen Set-Taste im Armaturenbrett oder Handschuhfach oder ein entsprechender Menüpunkt zur Initialisierung des Reifendrucks im Infotainment-System oder Bordcomputer. Ein klares Indiz für ein aktives RDKS war das Vorhandensein einer Anzeige der tatsächlichen Reifendrucke im Infotainment-System oder Bordcomputer des Fahrzeugs.

Alle erhobenen Daten, einschließlich der Fahrzeugdaten und der gemessenen Werte, wurden in einem standardisierten Messprotokoll in Papierform dokumentiert. Diese

manuell erfassten Daten wurden im Anschluss an die Messreihe in eine Excel-Tabelle zur weiteren Verarbeitung übertragen.

3.1.5 Qualitätssicherung der Messungen

Ein zentraler Aspekt der Qualitätssicherung war die Verwendung von qualitativem Messwerkzeug. Das eingesetzte analoge Präzisionsreifendruckmessgerät, ein Produkt deutscher Herstellung mit Qualitätszertifikat, sowie das Infrarotthermometer von Bosch, einer etablierten Marke, wurden aufgrund ihrer hinreichend hohen Genauigkeit für diese Arbeit ausgewählt. Obwohl keine formale Kalibrierung der Geräte im Labor stattfand, wird die ausreichende Präzision für die Forschungsfrage angenommen.

Ein weiterer wichtiger Faktor war die Standardisierung des Messvorgangs. Es wurde großer Wert darauf gelegt, dass der gesamte Ablauf der Reifendruck- und Temperaturmessung sowie die Erfassung der Fahrzeugdaten stets nach demselben, zuvor festgelegten Schema erfolgte. Diese konsistente Vorgehensweise minimiert Fehler durch unterschiedliche Handhabung und erhöht die Vergleichbarkeit der erhobenen Daten. Die sorgfältige Dokumentation aller gemessenen und erfassten Daten in einem Messprotokoll trug ebenfalls zur Vermeidung von Fehlern.

Im Umgang mit potenziellen Störfaktoren wurde ein besonderes Augenmerk auf die thermische Beeinflussung der Reifen durch Sonneneinstrahlung gelegt. Insbesondere vormittags konnte die direkte Sonneneinstrahlung durch die Ostfenster der Prüfstelle die Reifen auf der Fahrerseite, sobald die Fahrzeuge auf die Hebebühne gehoben wurden, temporär erwärmen. Dies führte innerhalb weniger Minuten zu Temperaturunterschieden von bis zu 10°C zwischen sonnenexponierten und schattigen Bereichen desselben Reifens. Obwohl eine solche kurzzeitige lokale Erwärmung den Reifendruck vermutlich nicht signifikant beeinflusst, wurde versucht diesen Effekt zu minimieren. Um konsistente Messergebnisse zu erzielen, erfolgte die Temperaturmessung idealerweise, solange das Fahrzeug noch auf dem Boden stand und die Reifen im Schatten waren. Zudem wurde darauf geachtet, den zeitlichen Abstand zwischen der Temperatur- und der Druckmessung möglichst kurz zu halten, um thermisch bedingte Abweichungen zu reduzieren.

3.1.6 Software zur Datenanalyse

Im Verlauf der Datenanalyse zeigte sich schnell, dass die Möglichkeiten von Microsoft Excel für die komplexeren statistischen Auswertungen, die im Rahmen dieser Arbeit erforderlich waren, nicht ausreichten. Insbesondere für fortgeschrittene statistische Tests und die Erstellung maßgeschneiderter, wissenschaftlicher Grafiken stieß das Programm an seine Grenzen.

Daher wurde eine alternative Softwarelösung für die Auswertung gesucht und die Wahl fiel auf die Programmiersprache R in Verbindung mit der integrierten Entwicklungsumgebung RStudio. R ist eine leistungsstarke und weit verbreitete Sprache für statistische Berechnungen und grafische Darstellungen. Statistische Tests konnten damit effizient durchgeführt und komplexe Visualisierungen erstellt werden.

Die initialen Daten wurden weiterhin in Excel aufbereitet, insbesondere für die übersichtliche Erfassung und die Erstellung von .csv-Dateien. Diese .csv-Dateien dienten anschließend als Basis für die weitere Verarbeitung und statistische Analyse in R.

3.2 Kundenbefragung

3.2.1 Zielsetzung der Umfrage

Die Wirksamkeit eines technischen Systems wie des RDKS hängt maßgeblich von der Interaktion mit seinem Nutzer ab. Selbst wenn die RDKS-Warnfunktion präzise und zeitgerecht auslöst, ist nicht zwingend gewährleistet, dass der Fahrer das Warnsignal erkennt, richtig interpretiert und adäquate Maßnahmen ergreift. Ein falscher Umgang mit dem System oder eine mangelnde Reaktion auf Warnungen kann somit die potenziellen Sicherheitsvorteile des RDKS erheblich reduzieren oder sogar zunichtemachen. Um den Einfluss dieses menschlichen Faktors auf die Effektivität von RDKS zu quantifizieren und zu verstehen, ist eine direkte Befragung der Fahrzeughalter unerlässlich.

Die Umfrage verfolgt das übergeordnete Ziel, die nutzerzentrierte Perspektive auf die Reifendruckkontrolle zu beleuchten und herauszufinden, inwiefern das Wissen und Verhalten der Fahrzeughalter die Wirksamkeit von RDKS-Warnungen beeinflussen. Konkret sollen folgende Fragestellungen anhand der Umfrage beantwortet werden:

- Können Fahrzeugführer das RDKS-Warnsymbol korrekt erkennen und einordnen?
- Reagieren Fahrzeugführer angemessen auf eine RDKS-Warnung, indem sie die notwendigen Schritte zur Überprüfung und Korrektur des Reifendrucks zeitnah einleiten?
- Können Fahrzeugführer das RDKS korrekt bedienen, insbesondere im Hinblick auf die Initialisierung bei passiven Systemen, welche für deren korrekte Funktion entscheidend ist?

Über die direkte Systeminteraktion hinaus ist auch das allgemeine Bewusstsein und die Praktiken der Fahrzeughalter bezüglich der Reifendruckkontrolle von Interesse. Es soll geklärt werden, ob RDKS das individuelle Kontrollverhalten verändert hat und ob möglicherweise ein falsches Sicherheitsgefühl entsteht, das dazu führt, manuelle Prüfungen zu vernachlässigen. Die Umfrage untersucht daher zusätzlich:

- Welche Praktiken und Kenntnisse weisen Fahrzeugführer hinsichtlich der regelmäßigen Reifendruckkontrolle auf?

3.2.2 Untersuchungsdesign und Stichprobe

Für die Kundenumfrage wurde ein Querschnittstudien-Design gewählt. Dieses Design ermöglicht die Erfassung von Daten zu einem spezifischen Zeitpunkt im Untersuchungsgebiet, was für die Analyse des aktuellen Wissens, Verhaltens und der Einstellungen der Fahrzeughalter in Bezug auf Reifendruck und RDKS im Kontext der Hauptuntersuchung geeignet ist. Es handelt sich somit um eine Momentaufnahme des Forschungsgegenstandes.

Die Zielpopulation der Studie umfasst alle Fahrzeughalter von Personenkraftwagen (Fahrzeugklassen M1 und M1G). Die Stichprobe dieser Umfrage bildet eine Untergruppe dieser Population und setzt sich aus den Privatkunden zusammen, die im Zeitraum von 14.05.2025 bis 28.05.2025 zur Haupt- oder Nachuntersuchung bei der GTÜ-Prüfstelle Janentzky & Stehr in Winsen vorstellig wurden. Die Methode der Stichprobenziehung entspricht einer Gelegenheitsstichprobe, da alle in diesem Zeitraum verfügbaren Privatkunden angesprochen wurden.

Die angestrebte Stichprobengröße für die Kundenumfrage beträgt 40 Teilnehmer. Diese Anzahl wurde gewählt, da sie eine ausreichende Basis für deskriptive Analysen und grundlegende Vergleiche bietet und im Rahmen der verfügbaren Zeit und Ressourcen realistisch umsetzbar ist. Sie korreliert zudem mit der für die Feldstudie (Reifendruckmessung) angestrebten Stichprobengröße, wobei die Diskrepanz durch die Tatsache erklärt wird, dass etwa ein Drittel der an der Prüfstelle erscheinenden Fahrzeuge von Werkstätten im Kundenauftrag vorgeführt werden. Da die Umfrage gezielt das Verhalten und Wissen der Fahrzeugführer (der eigentlichen Nutzer) adressiert, fallen die von Werkstätten gebrachten Fahrzeuge nicht in die Zielgruppe dieser Befragung, wodurch sich eine geringere Stichprobengröße für die Umfrage im Vergleich zur reinen Reifendruckmessung ergibt.

Bestimmte Fahrzeugführer und deren Fahrzeuge wurden von der Teilnahme an der Umfrage ausgeschlossen. Dazu zählen Fahrer von Oldtimern und sehr spezifischen hochpreisigen Luxusfahrzeugen. Die Begründung für diesen Ausschluss liegt primär in der Notwendigkeit, eine für die allgemeine PKW-Flotte repräsentativere Stichprobe zu erzielen, da diese Fahrzeugtypen nur einen sehr kleinen und oft nicht-charakteristischen Anteil am Gesamtbestand darstellen und potenziell andere Wartungs- und Nutzungsverhalten aufweisen. Darüber hinaus war für die Teilnahme an der Umfrage das Vorhandensein ausreichender Deutschkenntnisse erforderlich, um ein vollumfängliches Verständnis der Fragebogeninhalte und somit valide Antworten zu gewährleisten.

3.2.3 Der Fragebogen

Als zentrales Erhebungsinstrument zur Gewinnung von Erkenntnissen über das Wissen, Verhalten und die Einstellungen der Fahrzeughalter wurde ein strukturierter Fragebogen entwickelt. Für die Erstellung des digitalen Fragebogens wurde das Online-Tool *tally.so* genutzt. Die Wahl dieses Tools begründet sich primär in seiner umfassenden Funktionalität zur Implementierung konditioneller Logik. Dieses ermöglicht das flexible Ein- und Ausblenden bestimmter Fragen oder Antwortoptionen in Abhängigkeit von vorherigen Antworten der Teilnehmer, was eine individuellere und zielgerichtete Befragungsführung ermöglicht. Zudem vereinfacht die integrierte Google-Sheets-Funktionalität die Datensammlung, was den nachfolgenden Auswertungsprozess effizienter gestaltet.

Der Fragebogen ist modular aufgebaut und gliedert sich in mehrere, aufeinanderfolgende Abschnitte. Der Ablauf ist als Flow-Chart in Abbildung 4 visualisiert. Er beginnt mit einer Einleitung, die die Befragten transparent über den übergeordneten Zweck der Erhebung, die vollständige Anonymität sowie die Freiwilligkeit ihrer Teilnahme informiert. Um die spontanen und unbeeinflussten Antworten der Teilnehmer auf spezifische Fragen zu Beginn des Fragebogens nicht zu beeinflussen, wird der konkrete Bezug zum RDKS in der Einleitung noch nicht explizit genannt. Nach dieser Einführung folgt der erste Modulblock zur Erkennung und Einordnung des RDKS-Warnsymbols. Daran schließt sich das zweite Modul an, welches die Reaktion auf RDKS-Warnungen behandelt, einschließlich der empfundenen Dringlichkeit, der tatsächlichen Reaktion auf die letzte Warnung, potenzieller Gründe für eine verzögerte Reaktion und des allgemeinen Vertrauens in das RDKS. Das dritte Modul widmet sich der korrekten Bedienung von RDKS, wobei der Fokus auf der Initialisierung bei passiven Systemen liegt. Abschließend befasst sich der vierte Modulblock mit den allgemeinen Praktiken und Kenntnissen der Fahrzeughalter hinsichtlich der regelmäßigen Reifendruckkontrolle, unabhängig vom Vorhandensein eines RDKS.

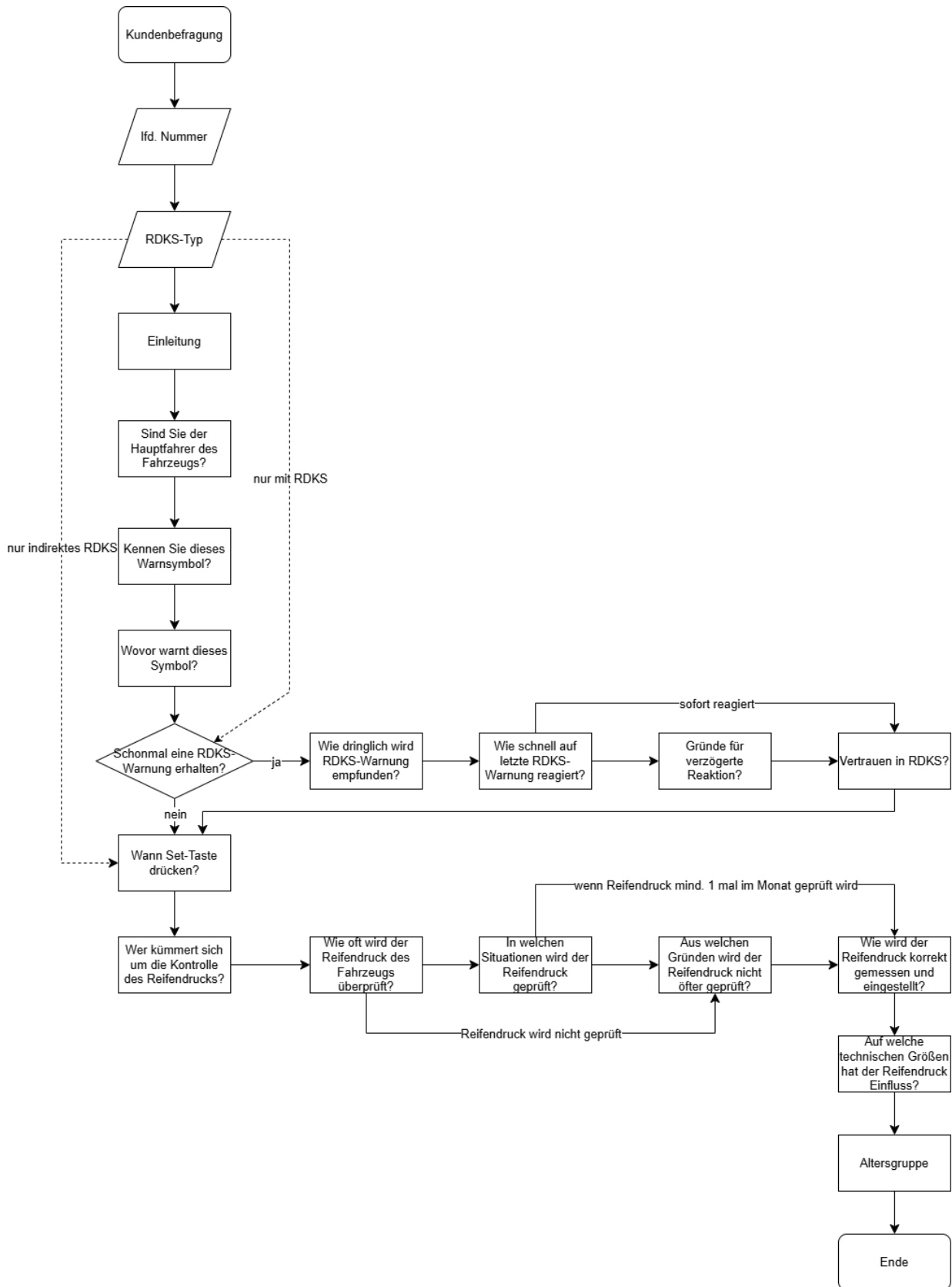


Abbildung 4: Flowchart – modularer Aufbau der Befragung

Im Fragebogen kommen ausschließlich geschlossene Fragetypen zum Einsatz. Geschlossene Fragen bieten den Befragten vorgegebene Antwortoptionen zur Auswahl

und erleichtern somit die quantitative Auswertung der Daten. Verwendet wurden Fragen mit einfacher Auswahl (Multiple-Choice) sowie Fragen, die eine Mehrfachauswahl erlauben. Ursprünglich vorgesehene Matrix-Fragen wurden nach Testläufen entfernt, da deren Bearbeitung als zeitaufwändig wahrgenommen wurde. Diese Anpassung erfolgte mit dem Ziel, die Bearbeitungsdauer sowie die Ermüdung der Teilnehmer zu reduzieren und somit die Abbruchquote zu minimieren. Die Auswahl der Fragetypen berücksichtigt auch die Notwendigkeit, die Unannehmlichkeiten für die Kunden an der Prüfstation so gering wie möglich zu halten.

Bei der Formulierung der Fragen wurde besonderer Wert auf eine klare und verständliche Sprache gelegt, um das Risiko von Missverständnissen zu minimieren. Zudem wurde eine Strategie verfolgt, um die Ehrlichkeit der Antworten zu fördern und Effekte der sozialen Erwünschtheit zu reduzieren. Dies umfasste beispielsweise die bewusste Formulierung von Fragen, die sich auf vergangenes Verhalten bezogen, anstatt hypothetische Szenarien abzufragen. So wurde beispielsweise gefragt: "Wie schnell haben Sie auf die letzte Warnung reagiert?" anstatt "Wie schnell würden Sie auf eine Warnung reagieren?". Ein weiteres wichtiges Instrument zur Reduzierung von Verzerrungen war der Einsatz einer Projektiven Frage, wie in der Frage "Manchmal überprüfen Fahrer den Reifendruck nicht sofort, nachdem die Warnung des Reifendruckkontrollsystems aufleuchtet. Was glauben Sie, sind häufige Gründe dafür?". Diese Vorgehensweise, bei der nach der Wahrnehmung über das Verhalten anderer gefragt wird, soll die Hemmschwelle senken, sozial weniger erwünschte Meinungen oder Verhaltensweisen indirekt zu äußern. Ergänzend wurden Mehrfachauswahl-Optionen genutzt, die den Befragten das Gefühl geben, nicht "die einzig richtige" Antwort wählen zu müssen.

Die Datenerhebung erfolgte digital mit Hilfe eines Tablets. Die Fahrzeughalter bearbeiteten den Fragebogen selbstständig auf einem zur Verfügung gestellten Gerät an der Prüfstation. Diese Methode wurde gegenüber einer papierbasierten Befragung bevorzugt, da sie eine einfachere Datenerfassung, eine schnellere Auswertung und eine höhere Datenqualität durch die Vermeidung manueller Übertragungsfehler ermöglicht, insbesondere im Vergleich zu einem sehr umfangreichen Papierfragebogen. Obwohl zunächst Bedenken hinsichtlich der Technikaffinität älterer Befragter bestanden, zeigte sich in Testläufen, dass eine geringe Betreuung vor Ort die Teilnahme auch für diese Personengruppe gut ermöglicht.

Informationen zum Datenschutz und zur Anonymität der Befragung wurden den Teilnehmern transparent in der Einleitung des Fragebogens bereitgestellt. Es wurden keine direkt identifizierenden persönlichen Daten wie Namen oder Adressen erhoben, mit Ausnahme der Altersgruppe, die für mögliche vergleichende Analysen relevant sein könnte. Zur Verknüpfung der Umfrageantworten mit den Ergebnissen der Reifendruckmessung des jeweiligen Fahrzeugs wurde jede ausgefüllte Umfrage der entsprechenden laufenden Nummer der Reifendruckmessung zugeordnet. Diese Nummer ermöglicht eine Verknüpfung auf Datensatzebene, ohne dabei Rückschlüsse auf die Identität der befragten Person zuzulassen.

3.2.4 Durchführung der Datenerhebung

Die Durchführung der Kundenbefragung erfolgte direkt an der GTÜ-Prüfstelle und war darauf abgestimmt, den Prüfablauf der Reifendruckmessung effizient zu integrieren. Sobald der RDKS-Typ des jeweiligen Fahrzeugs ermittelt und eine eindeutige laufende Nummer für die Messreihe vergeben war, wurden die Fahrzeughalter zur Teilnahme an der Umfrage angesprochen. Die Befragungszeit wurde in der Regel genutzt, um parallel die Reifendruckmessungen am Fahrzeug durchzuführen.

Die Ansprache der Fahrzeughalter erfolgte persönlich durch den Verfasser dieser Arbeit. Dabei wurde sich als studentischer Praktikant vorgestellt und das Anliegen erläutert: das Verfassen einer Abschlussarbeit zum Thema Fahrzeugsicherheit, in deren Rahmen eine Kundenbefragung durchgeführt wird. Die Kunden wurden freundlich zur Teilnahme eingeladen. Es wurde explizit betont, dass sowohl die Kundenbefragung als auch die anschließende Reifendruckmessung nicht Teil der Hauptuntersuchung sind und keinerlei Einfluss auf das Ergebnis der Hauptuntersuchung haben. Diese Transparenz war entscheidend, um mögliche Bedenken der Teilnehmer auszuräumen.

Die Befragung fand während der Wartezeit der Kunden zur Hauptuntersuchung statt. Um die Teilnahmebereitschaft zu fördern, wurde von Beginn an auf eine freundliche und offene Ansprache Wert gelegt. Zudem wurde den potenziellen Teilnehmern klar kommuniziert, dass die Befragung lediglich eine kurze Dauer von etwa drei bis fünf Minuten in Anspruch nehmen würde. Es wurde explizit darauf hingewiesen, dass die Fragen intuitiv beantwortet werden sollten, ohne dass ein langes Nachdenken erforderlich sei. Diese Maßnahmen zur Reduzierung der wahrgenommenen Belastung

waren offenbar sehr wirkungsvoll: Von den insgesamt 38 angesprochenen Kunden lehnte nicht ein einziger die Teilnahme an der Umfrage ab, was auf eine hohe Kooperationsbereitschaft hindeutet.

3.2.5 Qualitätssicherung der Umfrage

Die Erstellung des Fragebogens selbst erfolgte in einem iterativen Prozess. Fragen wurden zunächst entworfen, anschließend in Testläufen erprobt und basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen kontinuierlich verbessert, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wurde. Diese Testläufe waren entscheidend, um potenzielle Schwachstellen aufzudecken, wie beispielsweise fehlende oder fehlerhafte konditionale Logik oder die Erkenntnis, dass bestimmte Fragetypen, wie Matrix-Fragen, zu viel Bearbeitungszeit in Anspruch nehmen und somit die Abbruchrate erhöhen könnten. Dieses Vorgehen stellte sicher, dass die Fragen klar, verständlich und schnell beantwortbar waren.

Trotz aller Bemühungen zur Sicherstellung der Datenqualität müssen potenzielle Einflussfaktoren auf die Umfrageergebnisse kritisch beleuchtet werden. Ein zentraler Aspekt ist der Effekt der sozialen Erwünschtheit. Obwohl versucht wurde, diesen durch spezifische Fragestellungen wie beispielsweise die Verwendung von Projektiven Fragen zu minimieren, kann dieser Effekt nicht vollständig ausgeschlossen werden. Fragen, die das eigene Wartungsverhalten betreffen, könnten von den Befragten als potenziell peinlich empfunden werden, was dazu führen könnte, dass sie sich in einem besseren Licht darstellen, als es der Realität entspricht.

Ein weiterer wichtiger Faktor, der die Repräsentativität der Stichprobe beeinflussen könnte, ist die Selektion der Befragten durch den Untersuchungskontext. Kunden, die ihr Fahrzeug persönlich zur Hauptuntersuchung bei einer Prüfstelle vorstellen, bringen häufig ein gewisses grundlegendes technisches Verständnis oder zumindest ein erhöhtes Interesse an ihrem Fahrzeug mit. Es ist denkbar, dass Fahrzeughalter mit einem geringeren technischen Wissen oder Interesse ihr Fahrzeug eher einer Werkstatt zur Vorbereitung und Durchführung der Hauptuntersuchung überlassen würden. Dies könnte zu einer Verzerrung der Stichprobe führen, sodass diese nicht exakt die Gesamtpopulation aller Fahrzeughalter widerspiegelt. Die Ergebnisse der Umfrage könnten daher tendenziell eher die Meinungen und Verhaltensweisen von technisch affineren Fahrzeughaltern abbilden.

4 Reifendruckmessung

4.1 Deskriptive Statistik der Reifendruckmessung

Die Datenerhebung für die Reifendruckmessungen erfolgte über einen Zeitraum vom 24. April 2025 bis zum 28. Mai 2025, verteilt auf insgesamt elf Messtage. In diesem Zeitraum konnten die Reifendrücke von 66 Fahrzeugen der Klassen M1 und M1G erhoben werden. Diese tatsächliche Stichprobengröße übertrifft, die in Kapitel 3.1.2 mittels Poweranalyse ermittelte angestrebte Mindestgröße von 60 Fahrzeugen, was die statistische Aussagekraft der nachfolgenden Analysen weiter stärkt. Von den erfassten Fahrzeugen waren 43 mit einem RDKS ausgestattet, wobei sich diese Gruppe weiter in 14 Fahrzeuge mit einem direkt messenden und 29 Fahrzeuge mit einem indirekt messenden RDKS aufteilte. Die verbleibenden 23 Fahrzeuge besaßen kein RDKS. Eine visuelle Darstellung dieser Verteilung ist in Abbildung 5 zu finden.

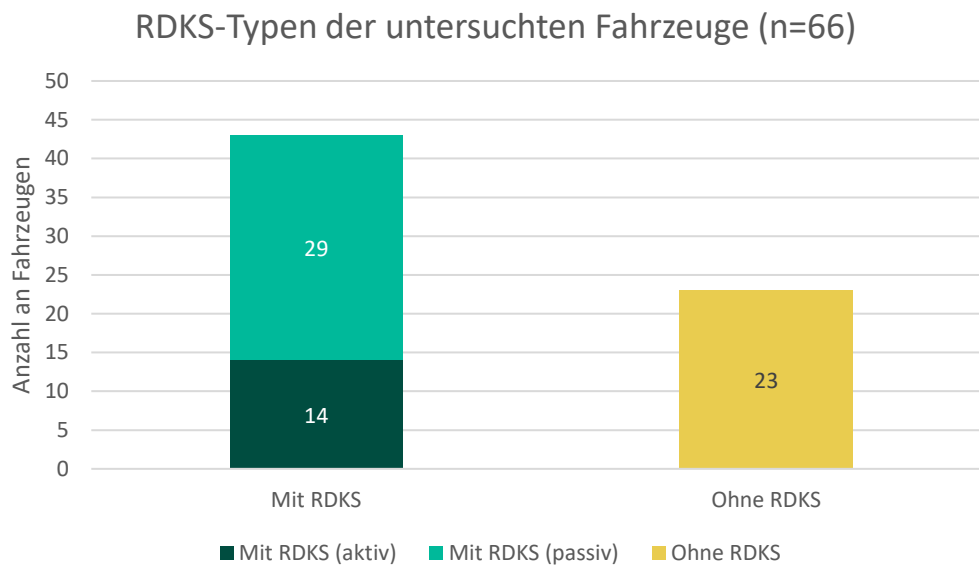


Abbildung 5: RDKS-Typen der untersuchten Fahrzeuge (n=66)

Die Häufigkeitsverteilung der Fahrzeughersteller innerhalb der Stichprobe ist in Abbildung 6 dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht, dass die Liste der vertretenen Marken klar von VW mit 18 Fahrzeugen angeführt wird. Insgesamt wird die Stichprobe von deutschen Herstellern dominiert, wobei neben VW auch Mercedes (8 Fahrzeuge), Opel (6 Fahrzeuge), BMW (5 Fahrzeuge) und Audi (5 Fahrzeuge) signifikante Anteile

aufweisen. Diese Verteilung spiegelt tendenziell die Markenpräsenz im deutschen Straßenverkehr wider.

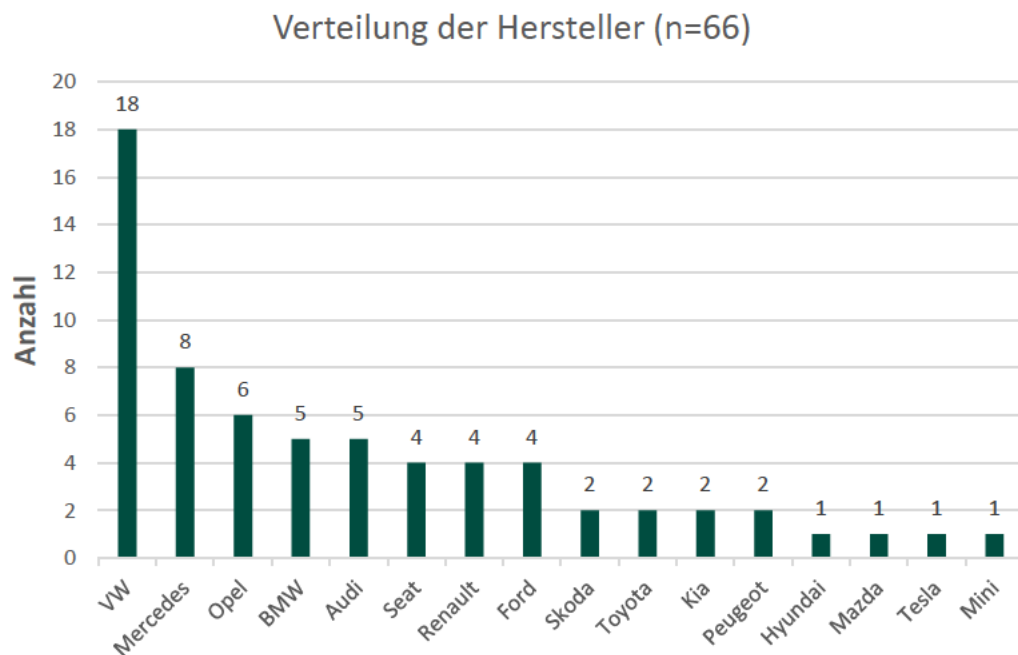


Abbildung 6: Verteilung der Hersteller (n=66)

Zusätzlich zu den allgemeinen Fahrzeugmerkmalen wurden weitere relevante Beobachtungen zur Stichprobe gemacht. Bei allen 43 Fahrzeugen, die mit einem RDKS ausgestattet waren, funktionierte die RDKS-Warnleuchte einwandfrei beim Systemtest nach dem Einschalten der Zündung. Die Stichprobe setzte sich aus 11 Fahrzeugen von Werkstätten oder Autohäusern und 55 Fahrzeugen von Privatkunden zusammen. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass alle 66 Fahrzeuge während der Messung ausschließlich leicht beladen waren. Innerhalb der Gruppe der RDKS-ausgestatteten Fahrzeuge zeigten lediglich 2 der 43 Fahrzeuge eine aktive Fehlermeldung in der Systemeigendiagnose des RDKS zum Zeitpunkt der Messung.

Die Analyse der demografischen Merkmale der Stichprobe umfasst neben der Herstellerverteilung auch das Fahrzeugalter und die Kilometerleistung. Die deskriptiven Statistiken zu diesen Merkmalen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Deskriptive Statistik von Fahrzeugalter und Kilometerleistung

	Median	Minimum	Maximum
Fahrzeugalter [Jahre]	10,9	2,9	29,2
Kilometerleistung [km]	123.000	29.000	304.000

Tabelle 1 zeigt, dass der Median des Fahrzeugalters in der Stichprobe bei 10,9 Jahren liegt. Das Alter der Fahrzeuge reicht von minimal 2,9 Jahren bis zu maximal 29,2 Jahren. Es ist zu beachten, dass keine Fahrzeuge jünger als 2,9 Jahre in der Stichprobe enthalten sind, da Fahrzeuge der Klasse M1 und M1G in Deutschland erst nach drei Jahren zur ersten Hauptuntersuchung vorstellig werden müssen. Die Verteilung des Fahrzeugalters ist detailliert in Abbildung 7: Altersverteilung der Stichprobe (n=66) dargestellt.

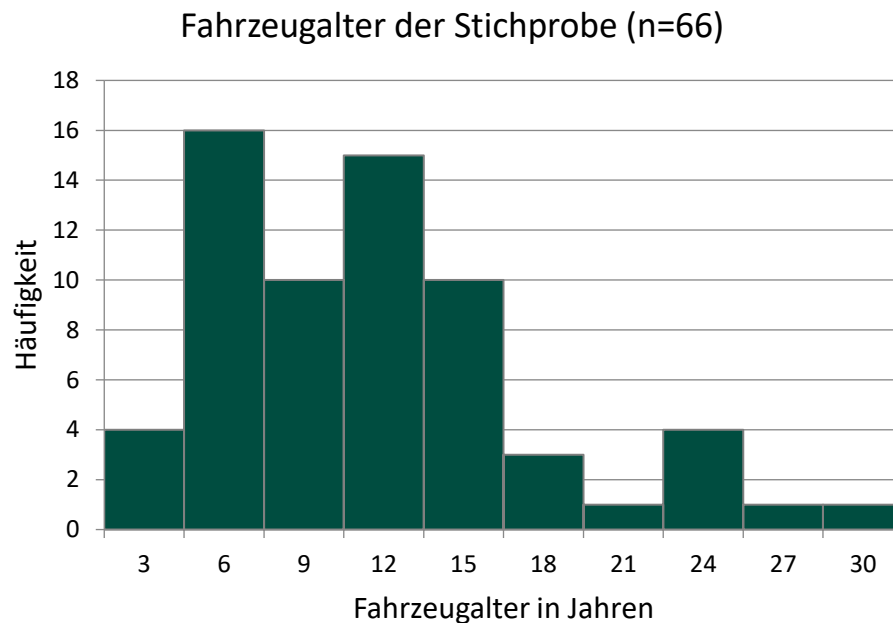


Abbildung 7: Altersverteilung der Stichprobe (n=66)

Für die Kilometerleistung wurde ein Median von 123.000 km ermittelt. Es ist anzumerken, dass die hier angegebenen Werte der Kilometerleistung für eine bessere Lesbarkeit auf Tausender gerundet wurden. Die Spanne reicht von minimal 29.000 km bis zu maximal 304.000 km. Die Verteilung der Kilometerleistung ist in Abbildung 8 visualisiert.

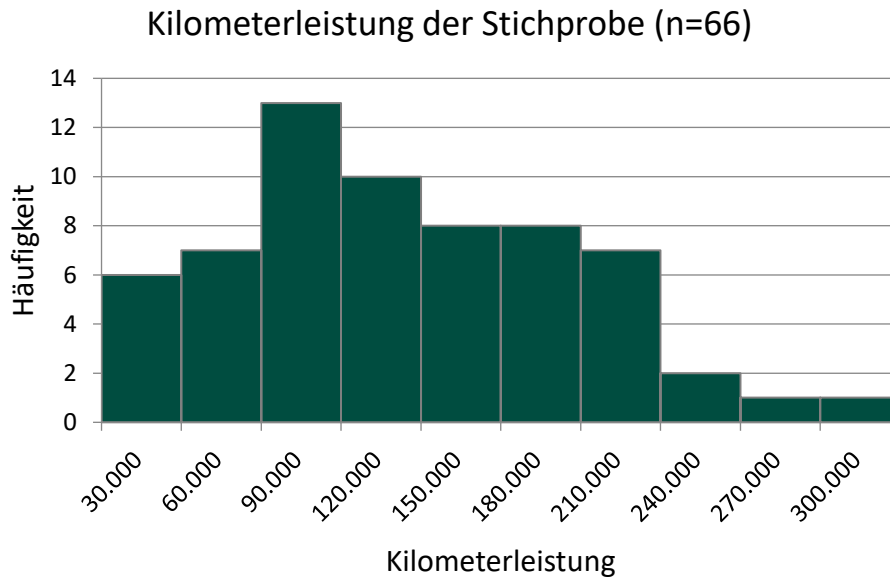


Abbildung 8: Kilometerleistung der Stichprobe (n=66)

4.2 Inferenzstatistische Analyse der Reifendruckmessung

4.2.1 Datenaufbereitung und Definition der Analysevariablen

Als zentrale Zielvariable für die Untersuchung wurde die relative Abweichung vom Reifendruck-Sollwert in Prozent (ΔP_{rel}) definiert. Diese Metrik quantifiziert, wie stark der tatsächlich gemessene Reifendruck von seinem vorgegebenen Sollwert abweicht, relativ zum Sollwert selbst.

Die Berechnung der relativen Reifendruckabweichung erfolgte gemäß (1):

$$\Delta P_{rel} = \frac{P_{ist}}{P_{soll}} - 1 \quad (1)$$

Hierbei repräsentiert P_{ist} den gemessenen Ist-Reifendruck und P_{soll} den vom Hersteller vorgegebenen Soll-Reifendruck.

Die Wahl der relativen Abweichung gegenüber einer absoluten Differenz wurde getroffen, um die Vergleichbarkeit über verschiedene Sollwerte hinweg zu gewährleisten. Ein und derselbe absolute Druckunterschied kann bei einem niedrigen Sollwert eine wesentlich größere prozentuale Abweichung darstellen als bei einem hohen Sollwert. Die relative

Abweichung eliminiert diesen Effekt und ermöglicht eine einheitliche Bewertung der Druckabweichung, unabhängig vom spezifischen Reifen oder Fahrzeug.

Um externe Temperatureinflüsse auf den Reifendruck auszuschließen und die Vergleichbarkeit der gemessenen Ist-Werte untereinander sowie mit den Sollwerten sicherzustellen, wurden alle Reifendruckwerte vor der Berechnung der relativen Abweichung auf eine Standardtemperatur von 20°C normalisiert.

Die Normalisierung der Ist-Werte des Reifendrucks erfolgte mithilfe von Formel (2):

$$P_{norm} = P_{ist} \cdot \frac{20K + 273,15K}{T_{ist}} \quad (2)$$

In Formel (2) stellt P_{norm} den auf 20°C normalisierten Reifendruck dar, P_{ist} ist der gemessene Ist-Reifendruck und T_{ist} ist die zum Zeitpunkt der Messung herrschende Reifentemperatur in Kelvin. Die Angabe von 20°C (bzw. 20K + 273.15K) als Normalisierungstemperatur wurde gewählt, da sich die Solldruckangaben der Reifenhersteller in der Regel auf diese Referenztemperatur beziehen.

Die Formel (2) basiert auf dem 1. Gasgesetz, welches besagt, dass der Druck idealer Gase bei konstantem Volumen proportional zur absoluten Temperatur ist. Da ein Fahrzeugreifen laut Leister als annähernd volumenkonstantes System betrachtet werden kann, ist die Anwendung dieser Normalisierungsformel auf die gemessenen Reifendrucke gerechtfertigt und ermöglicht eine präzise vergleichende Analyse (2015, S. 252).

4.2.2 Hypothese 1: Fahrzeuge mit RDKS haben eine unterschiedliche mediane Abweichung im Reifendruck von der Herstellerangabe als Fahrzeuge ohne RDKS

4.2.2.1 Testverfahren zu Hypothese 1

Die erste Hypothese dieses Kapitels untersucht den Einfluss des RDKS-Status auf die Reifendruckabweichung. Sie lautet:

Nullhypothese (H_0): Die mediane relative Reifendruckabweichung ist bei Fahrzeugen mit RDKS und Fahrzeugen ohne RDKS gleich.

Alternativhypothese (H_1): Die mediane relative Reifendruckabweichung ist bei Fahrzeugen mit RDKS und Fahrzeugen ohne RDKS unterschiedlich.

Für den Vergleich der zentralen Tendenzen der Reifendruckabweichung zwischen Fahrzeugen mit RDKS und Fahrzeugen ohne RDKS wurde ursprünglich ein parametrischer t-Test für unabhängige Stichproben in Betracht gezogen. Die klassischen Voraussetzungen für diesen Test umfassen die Unabhängigkeit der Beobachtungen, sowie die Normalverteilung der Daten in den jeweiligen Gruppen. Zudem wird die Homogenität der Varianzen angenommen.

Die Normalverteilung der Reifendruckabweichungen wurde sowohl visuell als auch statistisch untersucht. Die QQ-Plots (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10) zeigten für beide Gruppen deutliche Abweichungen von der idealen Normalverteilung.

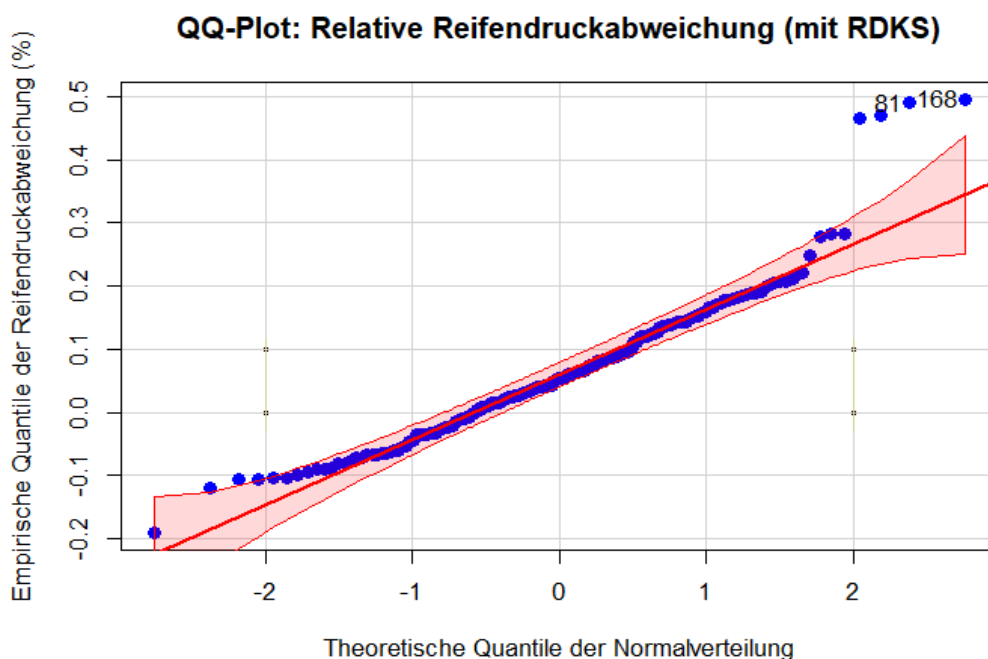


Abbildung 9: QQ-Plot – relative Reifendruckabweichung (mit RDKS)

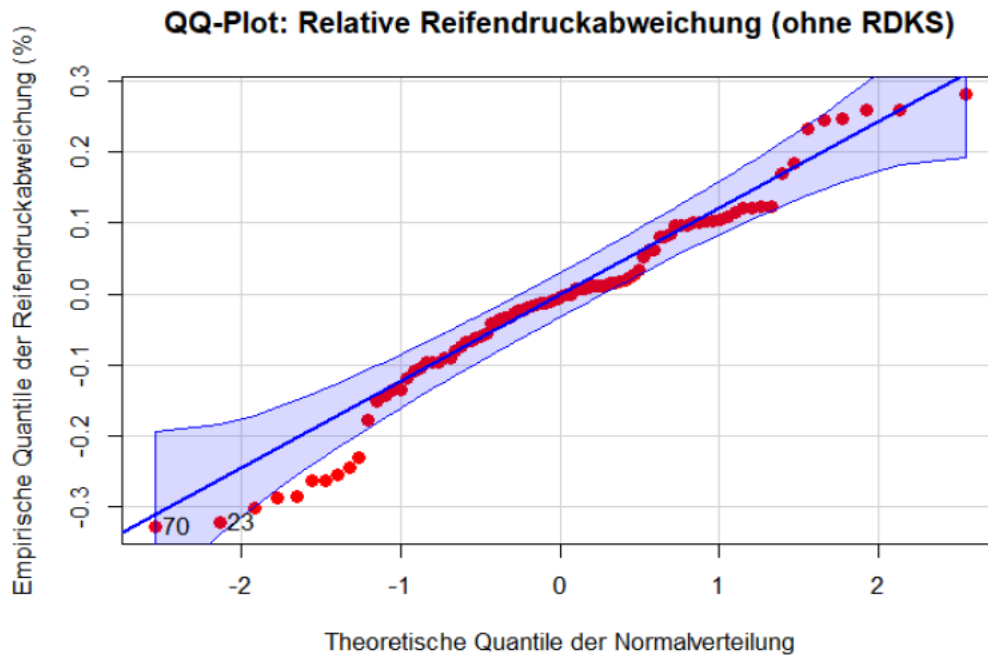


Abbildung 10: QQ-Plot – relative Reifendruckabweichung (ohne RDKS)

Insbesondere waren schwere Schwänze erkennbar, die auf das Vorhandensein von Extremwerten in den Daten hingen. Diese visuellen Eindrücke werden durch die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests bestätigt: Für die Gruppe der Fahrzeuge mit RDKS war der Test mit $p=3,7 \times 10^{-7}$ hochsignifikant, und für die Gruppe der Fahrzeuge ohne RDKS ebenfalls mit $p=0,022$ signifikant. Da beide p -Werte unter dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05 liegen, muss die Annahme der Normalverteilung für beide Gruppen verworfen werden.

Angesichts der Verletzung der Normalverteilungsannahme in beiden Gruppen, wie durch die visuellen und statistischen Tests belegt, wurde entschieden, für die Überprüfung der Hypothese 1 einen nicht-parametrischen Test zu verwenden. Der Mann-Whitney-U-Test wurde als adäquate Alternative zum t -Test gewählt. Dieser Test eignet sich zum Vergleich der Verteilungen von zwei unabhängigen Stichproben und setzt keine Normalverteilung der Daten voraus.

4.2.2.2 Ergebnisse zu Hypothese 1

Der durchgeführte Mann-Whitney-U-Test ergab einen p-Wert von $1,5 \times 10^{-5}$. Da dieser p-Wert deutlich unter dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05 liegt, wird die Nullhypothese verworfen. Dies bedeutet, dass ein statistisch signifikanter Unterschied in den Verteilungen der relativen Reifendruckabweichungen zwischen Fahrzeugen mit RDKS und Fahrzeugen ohne RDKS besteht.

Um die Natur dieses Unterschieds besser zu verstehen, werden die deskriptiven Statistiken der Reifendruckabweichungen für beide Gruppen in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Deskriptive Statistik der relativen Reifendruckabweichung (mit und ohne RDKS)

Gruppe	Median	Q1	Q3	IQR	Min	Max
Mit RDKS	5,3%	-1,1%	12,9%	14,0%	-19,0%	49,5%
Ohne RDKS	-0,5%	-8,3%	8,1%	16,4%	-32,7%	28,1%

Die Tabelle zeigt, dass der Median der relativen Reifendruckabweichung bei Fahrzeugen mit RDKS bei 5,3% liegt, während er bei Fahrzeugen ohne RDKS bei -0,5% liegt. Dies deutet darauf hin, dass Fahrzeuge mit RDKS im Mittel einen leichten Überdruck aufweisen, wohingegen Fahrzeuge ohne RDKS im Mittel dem Sollwert deutlich näher kommen und nur einen geringfügigen Minderdruck zeigen.

Der IQR, welcher die Streuung der mittleren 50% der Daten beschreibt, ist bei Fahrzeugen ohne RDKS (16,4%) etwas größer als bei Fahrzeugen mit RDKS (14,0%). Dies legt nahe, dass die Reifendruckabweichungen bei Fahrzeugen ohne RDKS eine geringfügig größere Streuung aufweisen. Der Boxplot in Abbildung 11 stellt die Medianwerte, Quartile und die Streuung jeder Gruppe grafisch dar.

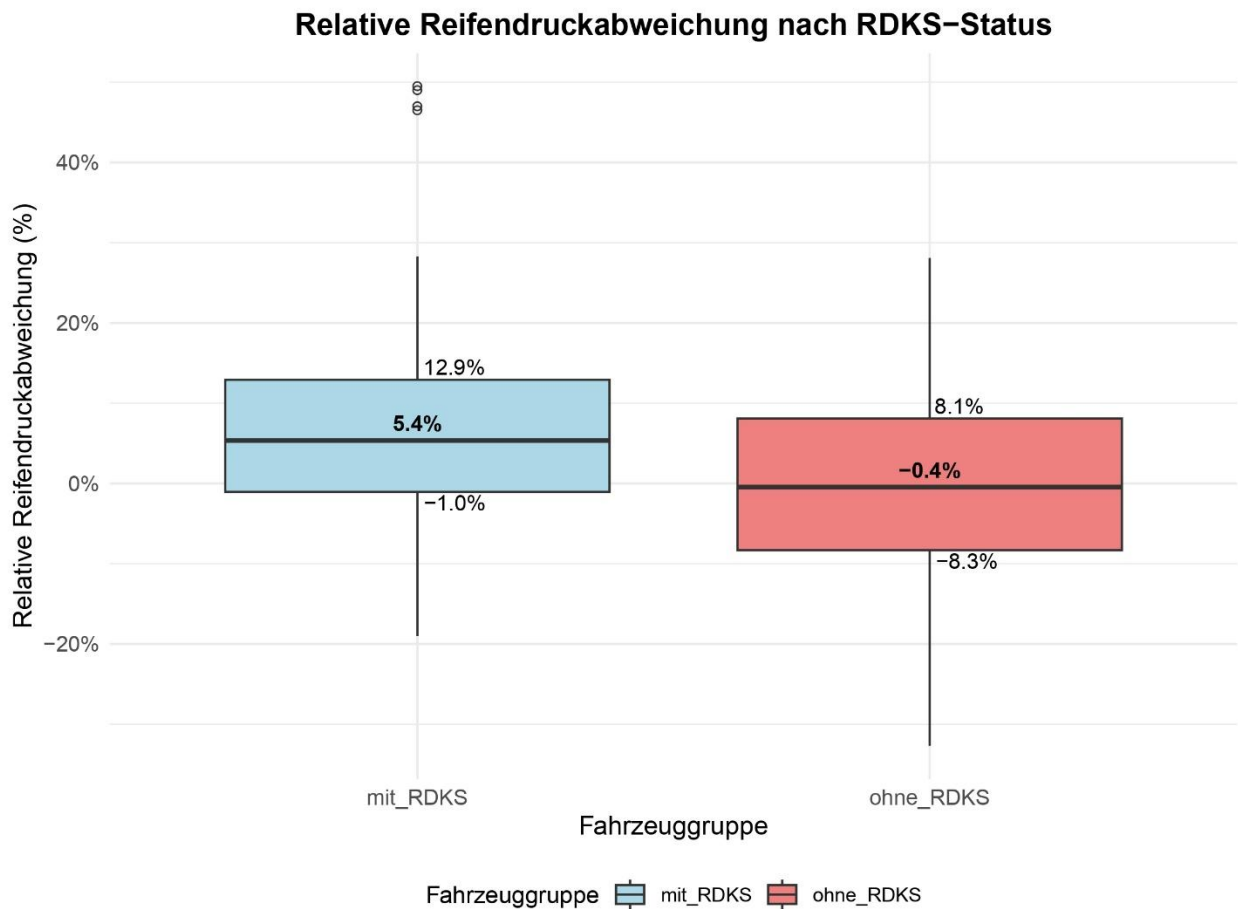


Abbildung 11: Boxplots der relativen Reifendruckabweichung nach RDKS-Status

Es wird sichtbar, dass die Box (welche die mittleren 50% der Daten umfasst) der Gruppe "mit RDKS" in höheren, positiveren Abweichungsbereichen liegt und tendenziell schmaler ist als die Box der Gruppe ohne RDKS. Die Whisker im negativen Bereich sind bei Fahrzeugen ohne RDKS ausgeprägter, was auf stärkere Minderdruckzustände hinweist.

4.2.2.3 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse zu Hypothese 1

Der durchgeführte Mann-Whitney-U-Test für Hypothese 1 ergab einen P-Wert von $1,6 \times 10^{-5}$. Dieser extrem kleine P-Wert liegt deutlich unter dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05, wodurch die Nullhypothese klar verworfen werden kann. Dies bestätigt einen statistisch hochsignifikanten Unterschied in den Verteilungen der relativen Reifendruckabweichungen zwischen Fahrzeugen, die mit einem RDKS ausgestattet sind, und solchen ohne ein solches System.

Die Mediane der Reifendruckabweichungen geben Aufschluss über die Natur dieses Unterschieds. Der Median der relativen Reifendruckabweichung lag bei Fahrzeugen mit RDKS bei 5,3%, während er bei Fahrzeugen ohne RDKS bei -0,5% lag. Diese Beobachtung, dass RDKS-ausgestattete Fahrzeuge median einen leichten Überdruck aufweisen, während Fahrzeuge ohne RDKS dem Sollwert deutlich näherkommen, deckt sich in ihren Tendenzen mit den Ergebnissen der OICA-Studie. In dieser Studie wurden für Fahrzeuge ohne RDKS ein Median von 0,1% und für Fahrzeuge mit RDKS ein Median von 3,5% ermittelt.

Die weitgehende Übereinstimmung der Ergebnisse mit der OICA-Studie ermöglicht es, bestimmte anfängliche Vermutungen und potenzielle Einflussfaktoren als eher unwahrscheinlich zu klassifizieren. Beispielsweise bestand die Annahme, dass die Datenerhebung während oder kurz nach der saisonalen Reifenwechselperiode die Reifendruckabweichungen verringern könnte, da viele Fahrzeuge mit "frisch" gewechselten Reifen geprüft wurden. Angesichts der vergleichbaren Datenlage in der OICA-Studie, für die kein spezifischer Erhebungszeitraum angegeben wurde und deren Daten aus geografisch und klimatisch unterschiedlichen Regionen (Schweden, Deutschland, Spanien) stammen, in denen die saisonalen Reifenwechselperioden variieren, erscheint ein signifikanter Einfluss des Erhebungszeitpunkts als eher unwahrscheinlich. Eine definitive wissenschaftliche Bestätigung oder Widerlegung dieses Effekts würde jedoch die Konzeption einer Längsschnittstudie erfordern, die Fahrzeuge über ein gesamtes Jahr hinweg beobachtet.

Die Beobachtung eines median leicht erhöhten Reifendrucks bei Fahrzeugen mit RDKS könnte im Kontext der Fahrerwahrnehmung interpretiert werden. Eine plausible, wenngleich nicht beweisbare Erklärung wäre, dass Fahrzeughalter bewusst einen leicht erhöhten Reifendruck fahren, um die Aktivierung der RDKS-Warnmeldung zu verzögern, welche potenziell als störend oder nervig empfunden werden könnte. Dies würde bedeuten, dass das RDKS indirekt zu einem durchschnittlich höheren Reifendruck beiträgt, nicht unbedingt zu einem präziseren, am Sollwert liegenden Druck.

4.2.3 Hypothese 2: Fahrzeuge mit RDKS weisen sicherere Reifendruckzustände auf als Fahrzeuge ohne RDKS

4.2.3.1 Testverfahren zu Hypothese 2

Die zweite Hypothese dieses Kapitels geht davon aus, dass Fahrzeuge, die mit einem RDKS ausgestattet sind, insgesamt sicherere Reifendruckzustände aufweisen als Fahrzeuge ohne RDKS. Zur statistischen Überprüfung dieser Annahme wurde die folgende Hypothese formuliert:

Nullhypothese (H_0): Der Anteil der sicheren Reifendruckzustände ist bei Fahrzeugen mit RDKS und Fahrzeugen ohne RDKS gleich.

Alternativhypothese (H_1): Der Anteil der sicheren Reifendruckzustände ist bei Fahrzeugen mit RDKS höher als bei Fahrzeugen ohne RDKS.

Eine klare Definition des sicheren Reifendruckzustands ist für die Überprüfung dieser Hypothese notwendig. Basierend auf den geltenden Vorschriften und anerkannten Studien von Organisationen wie der OICA und der NHTSA, die sich an den Auslöseschwellen für RDKS orientieren, wurde ein Reifendruckzustand als unsicher eingestuft, wenn die relative Abweichung vom Sollwert unter -20% lag. Alle Reifendruckzustände, deren relative Abweichung kleiner als -20% war, wurden als sicher klassifiziert. Diese Definition berücksichtigt den primären sicherheitskritischen Aspekt des Minderdrucks und richtet sich nach den etablierten Auslöseschwellen der ECE Regelung Nr. 64 (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE), 2010).

Zur statistischen Überprüfung des Zusammenhangs zwischen dem Vorhandensein eines RDKS und dem Reifendruckzustand (sicher/unsicher) wurde ein exakter Fisher-Test durchgeführt. Diese Wahl war notwendig, da in der 2x2-Kontingenztabelle, welche die Häufigkeiten der Gruppen (mit RDKS/ohne RDKS) und der Reifendruckzustände (sicher/unsicher) darstellt, bereits im Vorfeld bekannt war, dass mindestens eine Zelle eine beobachtete Häufigkeit von Null aufweist (die Zelle "mit RDKS" und "nicht sicher"). Der exakte Fisher-Test liefert auch unter diesen Bedingungen einen exakten p-Wert.

Ergänzend zum exakten Fisher-Test wurden 95%-Konfidenzintervalle für die Proportion der unsicheren Reifendruckzustände (d.h. Abweichungen größer als $-|20\%|$) für jede der

beiden Fahrzeuggruppen berechnet. Diese Konfidenzintervalle liefern ein Maß für die Präzision der geschätzten Anteile der unsicheren Zustände in den jeweiligen Populationen und sind unerlässlich, um die praktische Relevanz der beobachteten Unterschiede zu beurteilen.

Da die Daten keine Normalverteilung aufweisen, wurde zur visuellen Darstellung und zum Vergleich der Reifendruckverteilungen beider Gruppen die Empirische Kumulative Verteilungsfunktion (ECDF) herangezogen. Der ECDF-Plot visualisiert für jeden Wert der relativen Reifendruckabweichung den kumulierten Anteil der Beobachtungen, die diesen Wert unterschreiten oder ihm entsprechen.

In dem erstellten ECDF-Plot werden die Verteilungsfunktionen für Fahrzeuge mit und ohne RDKS in einem Diagramm dargestellt, was einen direkten visuellen Vergleich ermöglicht. Zusätzlich sind an der kritischen Schwelle von -20% die 95%-Konfidenzintervalle für den Anteil der Werte unterhalb dieser Schwelle visualisiert. Dies verdeutlicht, wie viele Fahrzeuge in jeder Gruppe einen Reifendruckzustand unterhalb dieser kritischen Schwelle aufweisen und mit welcher Unsicherheit diese Anteile behaftet sind. Durch diese Darstellung lässt sich leicht erkennen, ob und in welchem Ausmaß Fahrzeuge ohne RDKS einen höheren Anteil an Reifendruckzuständen im kritischen Bereich aufweisen als Fahrzeuge mit RDKS.

4.2.3.2 Ergebnisse zu Hypothese 2

Der exakte Fisher-Test ergab einen hochsignifikanten P-Wert von $1,9 \times 10^{-5}$. Da dieser P-Wert weit unter dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05 liegt, kann die Nullhypothese, die besagt, dass der Anteil der sicheren Reifendruckzustände in beiden Gruppen gleich ist, verworfen werden. Dies bedeutet, dass ein statistisch signifikanter Unterschied im Anteil der unsicheren Reifendruckzustände zwischen Fahrzeugen mit und ohne RDKS besteht.

Die Analyse der Daten zeigt, dass bei den Fahrzeugen mit RDKS kein einziger Datenpunkt in die Kategorie der unsicheren Reifendruckzustände fällt. Das zugehörige 95%-Konfidenzintervall für diesen Anteil liegt zwischen 0% und 2,7%. Im Gegensatz dazu befinden sich 10 von 92 Datenpunkte von Fahrzeugen ohne RDKS (10,9%) in einem

unsicheren Reifendruckzustand. Das 95%-Konfidenzintervall für diesen Anteil erstreckt sich von 5,6% bis 19,5%.

Diese Ergebnisse belegen eine klare Diskrepanz zwischen den beiden Fahrzeuggruppen: Während in der RDKS-ausgestatteten Gruppe keine unsicheren Zustände beobachtet wurden (mit einer oberen Konfidenzgrenze, die nur einen sehr geringen Anteil zulassen würde), zeigte die Gruppe ohne RDKS einen messbaren und statistisch relevanten Anteil an Fahrzeugen mit kritischem Minderdruck.

Die Unterschiede in den Reifendruckzuständen werden in Abbildung 12 durch die ECDF beider Fahrzeuggruppen visuell dargestellt.

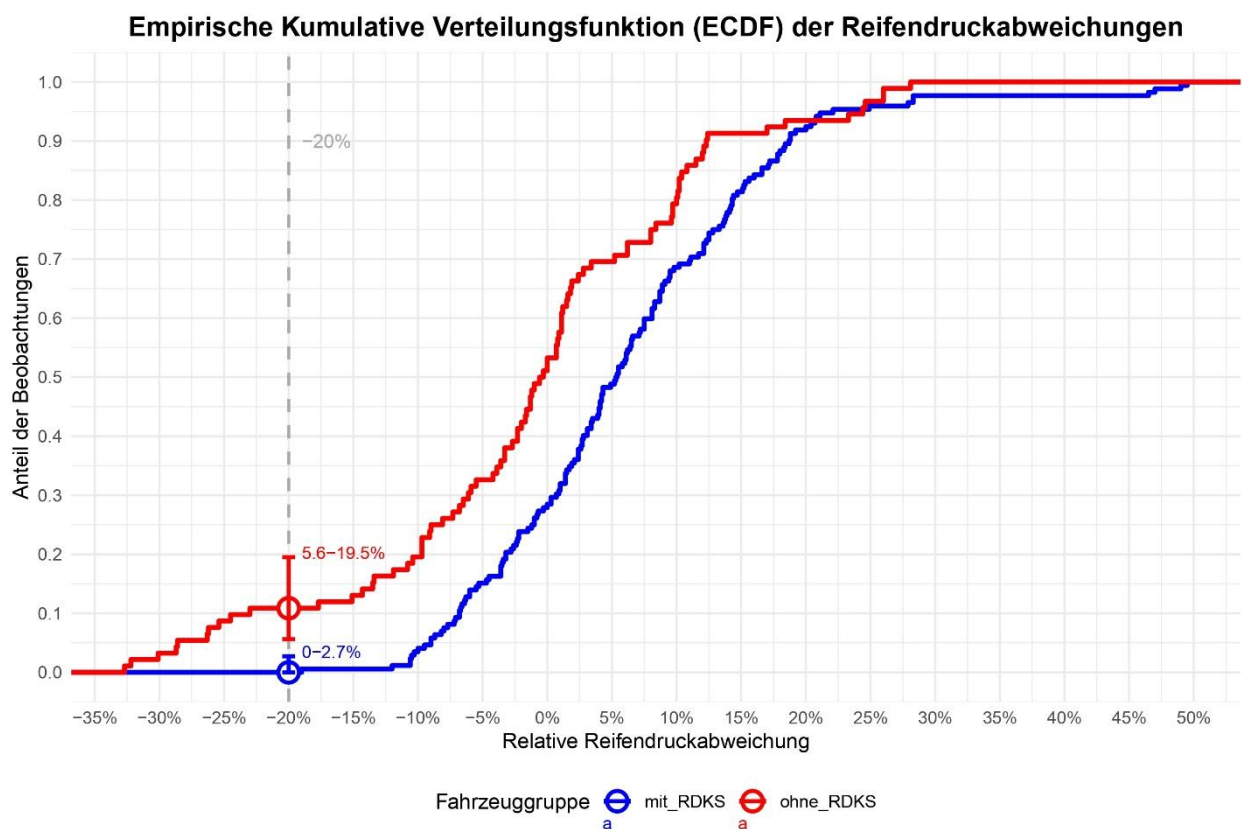


Abbildung 12: ECDF-Plots der relativen Reifendruckabweichungen

Der ECDF-Plot veranschaulicht den kumulativen Anteil der Beobachtungen entlang der Skala der relativen Reifendruckabweichung. Die vertikale gestrichelte Linie bei -20% markiert die definierte Schwelle für unsichere Reifendruckzustände. Die ECDF für Fahrzeuge mit RDKS verläuft deutlich rechts der Kurve für Fahrzeuge ohne RDKS. Dies bedeutet, dass bei jeder gegebenen negativen Abweichung ein viel geringerer Anteil der Fahrzeuge mit RDKS diesen Wert unterschreitet.

An der -20%-Schwelle wird der Unterschied besonders deutlich: Die Kurve für Fahrzeuge ohne RDKS zeigt an diesem Punkt einen signifikanten Anteil von Beobachtungen (etwa 10,9%) im unsicheren Bereich. Demgegenüber liegt die ECDF für Fahrzeuge mit RDKS an dieser Schwelle bei null. Die Rechtsverschiebung der RDKS-Kurve im Vergleich zur Ohne-RDKS-Kurve indiziert somit, dass RDKS-ausgestattete Fahrzeuge im Allgemeinen geringere und weniger kritische negative Reifendruckabweichungen aufweisen.

4.2.3.3 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse zu Hypothese 2

Der durchgeführte exakte Fisher-Test zur Überprüfung von Hypothese 2, welche einen höheren Anteil sicherer Reifendruckzustände bei Fahrzeugen mit RDKS annimmt, ergab einen hochsignifikanten p-Wert von $1,9 \times 10^{-5}$. Da dieser Wert weit unter dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05 liegt, kann die Nullhypothese klar verworfen werden. Dies belegt einen statistisch signifikanten Unterschied im Anteil der unsicheren Reifendruckzustände (definiert als relative Abweichung unter -20% vom Sollwert) zwischen Fahrzeugen, die mit einem RDKS ausgestattet sind, und solchen ohne RDKS.

In der Stichprobe konnte bei keinem einzigen Fahrzeug mit RDKS ein unsicherer Reifendruckzustand festgestellt werden. Das zugehörige 95%-Konfidenzintervall für den Anteil unsicherer Zustände in dieser Gruppe liegt zwischen 0% und 2,7%. Im Gegensatz dazu befanden sich 10 von 92 Fahrzeugen ohne RDKS (10,9%) in einem unsicheren Reifendruckzustand, mit einem 95%-Konfidenzintervall von 5,6% bis 19,5%. Selbst im ungünstigsten Szenario, unter Berücksichtigung der Obergrenze des Konfidenzintervalls für Fahrzeuge mit RDKS (2,7%) und der Untergrenze für Fahrzeuge ohne RDKS (5,6%), würde das RDKS sicherheitsrelevante Minderdruckzustände um mindestens etwa 50% reduzieren. Dieses Ergebnis deckt sich in seiner Tendenz mit der OICA-Studie, die eine Reduktion unsicherer Reifendruckzustände um 90% durch RDKS feststellte. Die größere Reduktion in der OICA-Studie ist hierbei vermutlich auf die deutlich größere Stichprobengröße und somit kleinere Konfidenzintervalle zurückzuführen. Die Beobachtung, dass in der vorliegenden Studie kein einziges RDKS-ausgestattetes Fahrzeug in einem unsicheren Zustand gefunden wurde, korrespondiert zudem mit den Erkenntnissen der OICA-Studie, welche kein RDKS-Fahrzeug identifizieren konnte, das sich in einem unsicheren Minderdruckzustand befand und bei dem noch keine RDKS-Warnung ausgelöst worden war (OICA, 2017).

Hinsichtlich überhöhter Reifendrücke, die ebenfalls negative Auswirkungen auf die Reifeneigenschaften haben können (wie in Kapitel 2.1 beschrieben), ist festzuhalten, dass in dieser Arbeit keine klare Schwelle für sicherheitskritische Überdruckzustände definiert werden konnte. Die vorliegenden Daten zeigen jedoch, dass sich die Gruppen mit und ohne RDKS bei Abweichungen von über 20% Überdruck kaum voneinander unterscheiden. Rund 8% aller gemessenen Reifen in beiden Gruppen weisen einen solchen erhöhten Druck auf. Diese Beobachtung deckt sich ebenfalls mit den Ergebnissen der OICA-Studie. Dies impliziert, dass, sofern die Schwelle für sicherheitskritischen Überdruck über 20% liegt, das Vorhandensein eines RDKS keinen Einfluss auf das Auftreten dieses Zustandes hat, da er in beiden Gruppen gleichermaßen häufig auftritt. Das RDKS trägt somit maßgeblich zur Vermeidung sicherheitskritischen Minderdrucks bei, jedoch nicht zur Vermeidung von Überdruckzuständen, die ebenfalls Reifenleistung und -sicherheit beeinträchtigen können.

4.2.4 Hypothese 3: Es gibt keine Korrelation zwischen Kilometerleistung/Fahrzeugalter und Reifendruckabweichung von Herstellervorgabe

4.2.4.1 Testverfahren zu Hypothese 3

Die dritte Hypothese dieses Kapitels widmet sich der Analyse eines potenziellen Zusammenhangs zwischen dem Fahrzeugalter/Kilometerleistung und der relativen Reifendruckabweichung von der Herstellervorgabe. Es wird angenommen, dass die Kilometerleistung und das Alter eines Fahrzeugs keinen Einfluss auf die relative Reifendruckabweichung haben.

Die Hypothese wird wie folgt formuliert:

Nullhypothese (H_0): Es besteht keine lineare Korrelation zwischen der Kilometerleistung/dem Fahrzeugalter und der relativen Reifendruckabweichung von der Herstellervorgabe.

Alternativhypothese (H_1): Es besteht eine lineare Korrelation zwischen der Kilometerleistung/dem Fahrzeugalter und der relativen Reifendruckabweichung von der Herstellervorgabe.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wird der Spearman-Korrelationskoeffizient als statistisches Testverfahren berechnet. Die Wahl des nicht-parametrischen Spearman-Koeffizienten begründet sich in der Annahme, dass die Daten der relativen Reifendruckabweichung nicht normalverteilt sind. Der Spearman-Koeffizient ist hiergegen robust und misst die Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs, unabhängig von der Verteilungsform der Daten.

Zur visuellen Unterstützung der statistischen Analyse und zur besseren Interpretation der Ergebnisse werden Streudiagramme erstellt. Diese Diagramme ermöglichen eine visuelle Einschätzung des Zusammenhangs und können Hinweise auf die Art der Beziehung geben, welche die Berechnung der Korrelationskoeffizienten ergänzt.

4.2.4.2 Ergebnisse zu Hypothese 3

Für den Zusammenhang zwischen der Kilometerleistung und der relativen Reifendruckabweichung wurde ein Spearman-Korrelationskoeffizient von $r_s=0,139$ ermittelt. Dieser positive Wert deutet auf eine tendenzielle leichte Zunahme der Reifendruckabweichung mit steigender Kilometerleistung hin. Der zugehörige p-Wert von 0,2722 liegt jedoch deutlich über dem konventionellen Signifikanzniveau von 0,05. Demnach ist der in der Stichprobe beobachtete schwache positive Zusammenhang statistisch nicht signifikant, und es kann aus den vorliegenden Daten nicht geschlussfolgert werden, dass dieser Zusammenhang in der Gesamtpopulation existiert. Die visuelle Analyse des Streudiagramms (Abbildung 13) bestätigte zudem, dass keine klare lineare oder nicht-lineare Korrelation erkennbar war.

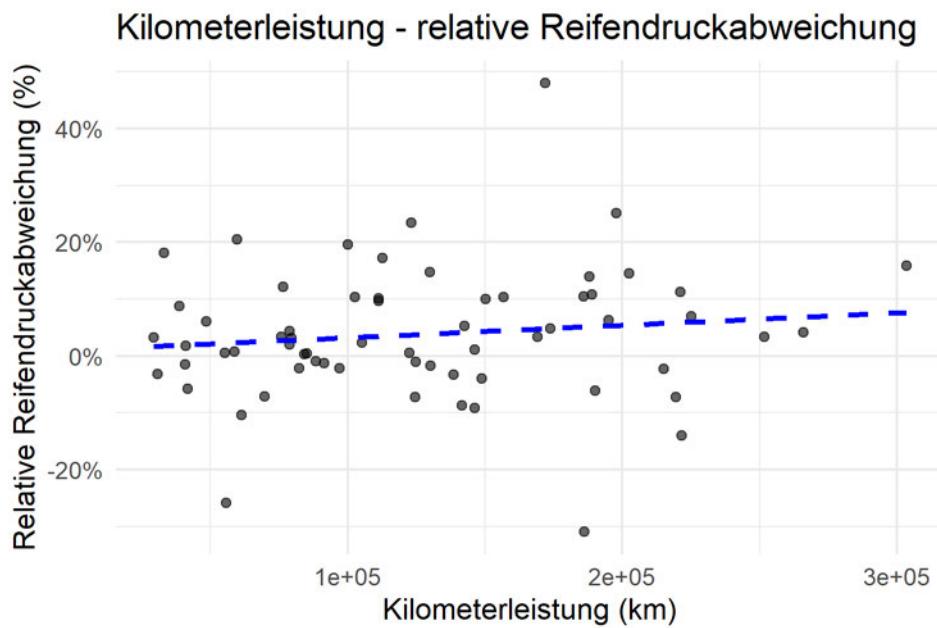


Abbildung 13: Korrelation zwischen Kilometerleistung und relativer Reifendruckabweichung

Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem Fahrzeugalter und der relativen Reifendruckabweichung ergab sich ein Spearman-Korrelationskoeffizient von $r_s = -0,235$. Dieser negative Wert deutet auf einen schwachen linearen Zusammenhang hin, bei dem mit zunehmendem Fahrzeugalter die relative Reifendruckabweichung tendenziell abnimmt. Der hierfür berechnete P-Wert von $p = 0,05762$ liegt knapp über dem Signifikanzniveau von 0,05. Folglich ist auch dieser Zusammenhang auf dem 5%-Niveau nicht statistisch signifikant. Wenngleich ein Trend zur Signifikanz erkennbar ist, reicht die Evidenz nicht aus, um eine gesicherte Aussage über einen Zusammenhang in der Population zu treffen. Das entsprechende Streudiagramm (Abbildung 14) zeigte ebenfalls keine ausgeprägte nicht-lineare Beziehung.

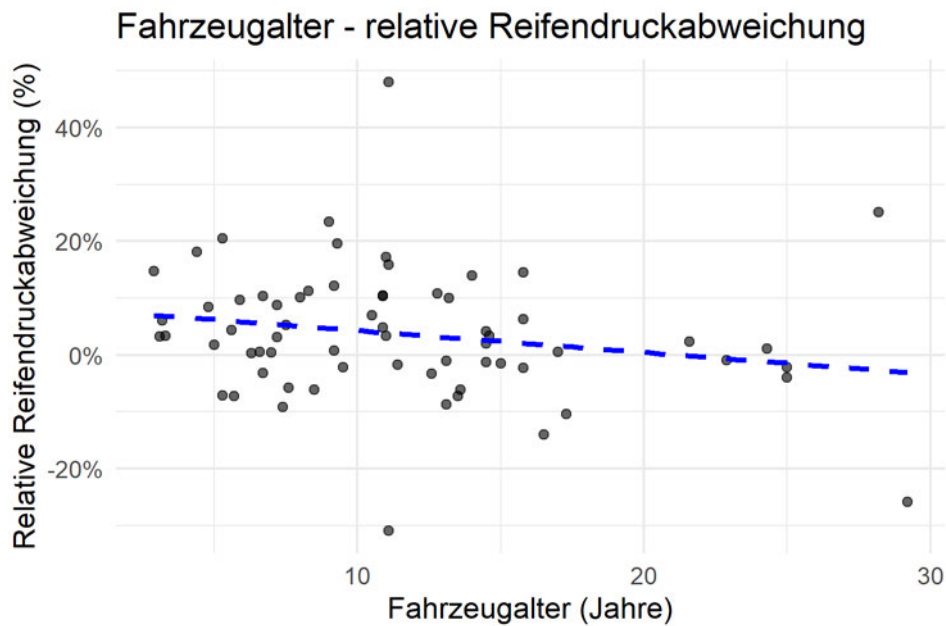


Abbildung 14: Korrelation zwischen Fahrzeugalter und relativer Reifendruckabweichung

4.2.4.3 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse zu Hypothese 3

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Hypothese 3 für keines der untersuchten Variablenpaare auf dem gewählten Signifikanzniveau von 0,05 bestätigt werden konnte. Obwohl für das Fahrzeugalter ein P-Wert im Grenzbereich zur Signifikanz vorliegt, ist der Korrelationskoeffizient in beiden Fällen relativ schwach. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die rein lineare Beziehung zwischen Kilometerleistung/Fahrzeugalter und der relativen Reifendruckabweichung, basierend auf dieser Stichprobe, nicht als statistisch gesichert gelten kann.

Die beobachteten schwachen und nicht-signifikanten Korrelationen legen nahe, dass die Reifendruckwartung im Allgemeinen unabhängig vom Fahrzeugalter und der Kilometerleistung erfolgt. Der leicht negative Trend des Reifendrucks mit zunehmendem Alter der Fahrzeuge, der sich in der Korrelation ($r_s = -0,235$) widerspiegelt, kann primär durch die Zusammensetzung der Stichprobe erklärt werden. Fahrzeuge, die jünger als 11 Jahre sind, sind in der Regel mit RDKS ausgestattet und weisen in dieser Stichprobe median leicht erhöhte Reifendrucke auf. Die andere Hälfte der Daten wird hingegen von Fahrzeugen ohne RDKS dominiert, welche median kaum eine Abweichung vom Solldruck zeigen. Diese unterschiedliche Verteilung des Reifendruckverhaltens in

Abhängigkeit von der RDKS-Ausstattung trägt maßgeblich dazu bei, dass die Trendlinie über das Alter hinweg leicht sinkend verläuft.

4.3 Extremwertanalyse und sicherheitskritische Abweichungen

Innerhalb der untersuchten Stichprobe von 66 Fahrzeugen zeigten sich bei zwei der 43 mit RDKS ausgestatteten Fahrzeuge aktive Fehlermeldungen des Systems. Der erste Fall betraf einen Hyundai i20 mit Erstzulassung 2018, der über ein passives RDKS verfügte. Obwohl ein passives System keine Reifensensoren hat, gab der Kunde an, dass eine Sensorbatterie leer sei, was im Kontext eines passiven RDKS systembedingt nicht zutreffend sein kann. Die genaue Ursache der Fehlermeldung konnte im Rahmen der Untersuchung nicht abschließend geklärt werden. Die durchgeführte Reifendruckmessung an diesem Fahrzeug ergab lediglich einen moderaten Überdruck in allen Reifen, was keine sicherheitskritische Abweichung darstellte. Der zweite Fall betraf eine Mercedes E-Klasse mit Erstzulassung 2018, die mit einem aktivem RDKS ausgestattet war und im Kundenauftrag von einer Werkstatt vorgestellt wurde. Das RDKS gab eine aktive Fehlermeldung aus, und im Bordcomputer war der Hinweis „Reifendruckkontrolle ohne Funktion – Radsensoren fehlen“ zu sehen. Nach Auskunft der Werkstatt war kurz zuvor ein neuer Satz Reifen mit neuen Sensoren montiert worden, die jedoch offenbar fehlerhaft waren. Eine detaillierte Prüfung der elektronischen Fahrzeugkomponenten mittels HU-Adapters bestätigte Kommunikationsfehler mit den Reifensensoren an der Vorderachse links sowie an der Hinterachse links und rechts. Die Messung des Reifendrucks ergab keine Auffälligkeiten. Die Reifendrucke entsprachen in etwa den vom Hersteller vorgegebenen Sollwerten.

Besondere Aufmerksamkeit galt den Fahrzeugen, die eine signifikante Unterschreitung des empfohlenen Reifendrucks aufwiesen, da dies gravierende Auswirkungen auf die Fahrsicherheit, den Reifenverschleiß und den Kraftstoffverbrauch hat. Insgesamt wurden vier Fahrzeuge in der Stichprobe identifiziert, die an mindestens einem Reifen eine Abweichung von mehr als -20% vom Hersteller-Sollwert oder einen Reifendruck von $\leq 1,5$ bar aufwiesen. Es ist hierbei bemerkenswert, dass alle diese vier Fahrzeuge kein RDKS verbaut hatten. Zwei dieser Fahrzeuge zeigten an allen Reifen eine Unterschreitung von über 20% des empfohlenen Reifendrucks. Bei den anderen beiden Fahrzeugen (laufende Nummer 9 und 26) war lediglich ein Reifen betroffen. Für Fahrzeug Nummer 9 konnte kein offensichtlicher Grund für den Druckverlust festgestellt werden. Weder

Beschädigungen an Reifen oder Felge noch das Eindringen von Fremdkörpern waren erkennbar, was auf ein potenziell defektes Ventil hindeutet. Fahrzeug Nummer 26 wies hingegen eine deutlich beschädigte Felge auf, die vermutlich durch einen Bordstein- oder Schlaglochkontakt entstanden ist und den Druckverlust verursachte. Diese Beschädigung ist in Abbildung 15 veranschaulicht. Im Gegensatz dazu konnte bei keinem einzigen Fahrzeug, das mit einem RDKS ausgestattet war, ein signifikanter Minderdruck von $\geq -|20\%|$ oder ein Druck von $\leq 1,5$ bar festgestellt werden. Dies unterstreicht die Effektivität von RDKS bei der Prävention solch kritischer Unterdrücke.



Abbildung 15: Beschädigte Felge

Neben dem Unterdruck wurde auch der Überdruck analysiert, da dieser ebenfalls negative Auswirkungen auf den Fahrkomfort, die Reifenhaftung und den Verschleiß haben kann. In der Stichprobe wurden acht Fahrzeuge identifiziert, die an mindestens einem Reifen einen Überdruck von $\geq 20\%$ im Vergleich zum Hersteller-Sollwert aufwiesen. Bemerkenswerterweise waren sechs dieser acht Fahrzeuge mit einem RDKS ausgestattet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass RDKS gemäß den gesetzlichen Vorgaben primär dazu konzipiert sind, vor zu niedrigem Reifendruck zu warnen. Für einen zu hohen Reifendruck gibt es keine vorgegebenen Warnschwellen, weshalb RDKS bei

Überdruck keine Warnung ausgeben. Fahrer werden somit nicht aktiv auf diesen Zustand hingewiesen und greifen folglich auch nicht ein. Bei sieben der acht betroffenen Fahrzeuge lag der Überdruck im Bereich von 20% bis 28%. Ein besonders extremer Fall war jedoch ein Fahrzeug, bei dem an allen vier Reifen ein Überdruck von etwa 48% über dem empfohlenen Sollwert gemessen wurde. Solche signifikanten Überdrücke beeinflussen vermutlich, ebenso wie starker Minderdruck, die Fahreigenschaften und die Sicherheit, auch wenn sie vom RDKS systembedingt nicht als kritisch gemeldet werden. Eine vertiefende Untersuchung der Auswirkungen von kritischem Überdruck auf die Fahrsicherheit konnte im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden und stellt somit einen Bereich für zukünftige Forschung dar.

5 Kundenumfrage

5.1 Einleitung in die Umfrage: Ziele und Stichprobe

Dieses Kapitel widmet sich der Untersuchung der Kundenakzeptanz von RDKS und den allgemeinen Praktiken der Reifendruckkontrolle durch Fahrzeughalter. Die hierfür durchgeführte Umfrage zielte darauf ab, Einblicke in die Perspektive der Nutzer zu gewinnen und die Ergebnisse der vorausgegangenen technischen Messungen zu ergänzen.

Die spezifischen Ziele der Umfrage waren die Beantwortung folgender Fragen:

- Können Fahrzeugführer das RDKS-Warnsymbol korrekt erkennen und einordnen?
- Reagieren Fahrzeugführer angemessen auf eine RDKS-Warnung, indem sie die notwendigen Schritte zur Überprüfung und Korrektur des Reifendrucks zeitnah einleiten?
- Können Fahrzeugführer das RDKS korrekt bedienen, insbesondere im Hinblick auf die Initialisierung bei passiven Systemen, welche für deren korrekte Funktion entscheidend ist?
- Welche Praktiken und Kenntnisse weisen Fahrzeugführer hinsichtlich der regelmäßigen Reifendruckkontrolle auf?

Insgesamt wurden 38 Personen befragt. Die Stichprobe umfasste Fahrzeughalter von Fahrzeugen mit unterschiedlicher RDKS-Ausstattung: 16 Fahrzeuge waren ohne RDKS, 10 mit aktivem RDKS und 12 mit passivem RDKS ausgestattet.

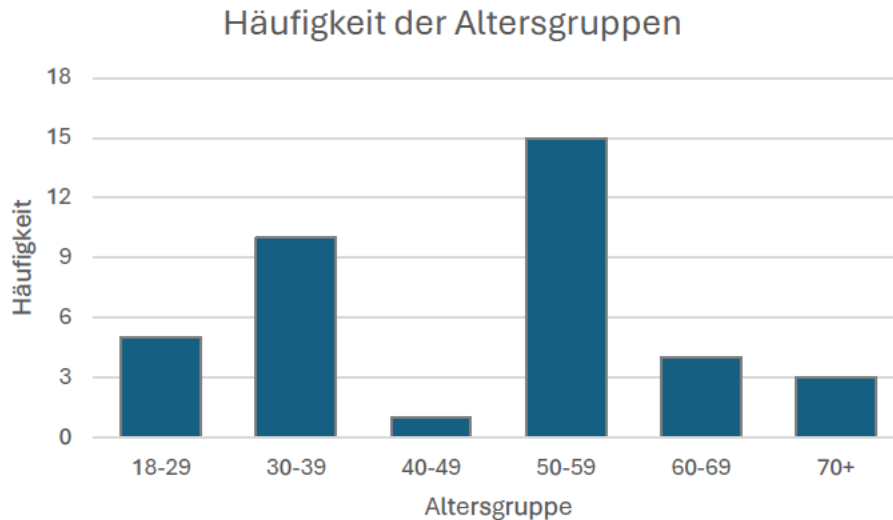


Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung nach Altersgruppen

Die Altersstruktur der befragten Personen, wie in Abbildung 16 dargestellt, zeigt eine breite Verteilung, die unterschiedliche Altersgruppen und damit potenziell auch unterschiedliche Erfahrungen mit Fahrzeugtechnologien und Wartungspraktiken abbildet.

5.2 Ergebnisse zur Erkennung und Einordnung des RDKS-Warnsymbols

Die Untersuchung der Erkennung und Einordnung des RDKS-Warnsymbols durch die Fahrzeugführer bildete den ersten inhaltlichen Schwerpunkt der Befragung. Um eine unvoreingenommene Einschätzung zu gewährleisten, erfolgte die Einführung in die Umfrage für die Befragten unter dem allgemeinen Thema Fahrzeugsicherheit. Im Rahmen dieses Moduls wurde den Teilnehmern ein Bild der RDKS-Warnleuchte vorgelegt, um deren Bekanntheit und die intuitive Assoziation mit ihrer Bedeutung zu ermitteln.

Die erste relevante Frage, die den Teilnehmern gestellt wurde, lautete: "Haben Sie dieses Warnsymbol schon mal in Ihrem Fahrzeug-Cockpit gesehen?".

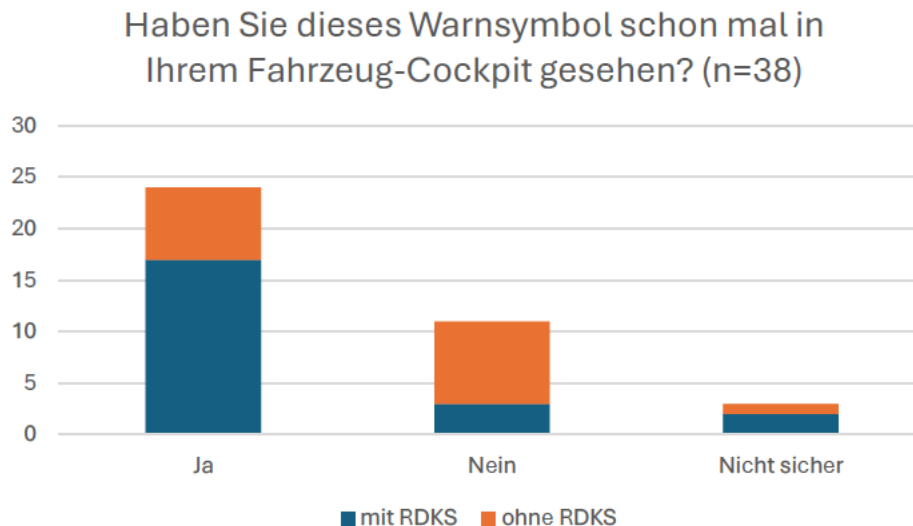


Abbildung 17: Erkennung des RDKS-Warnsymbols durch die Befragten (n=38)

Abbildung 17 veranschaulicht die Antworten der 38 Befragten. Von diesen gaben 24 Personen an, das RDKS-Warnsymbol bereits in einem Fahrzeug-Cockpit gesehen zu haben. Eine detaillierte Aufschlüsselung nach RDKS-Ausstattung des vor Ort vorgestellten Fahrzeugs ergab interessante Nuancen: Unter diesen 24 Personen befanden sich auch 7 Befragte, deren Fahrzeug nach den vorliegenden Messdaten nicht mit einem RDKS ausgestattet war. Bei der Interpretation dieser 7 Fälle muss berücksichtigt werden, dass die Frage die Möglichkeit einschließt, das Symbol in einem anderen als dem vorstellig gewordenen Fahrzeug gesehen zu haben.

Als bedenklicher erwies sich hingegen, dass von den 22 Befragten, die mit einem RDKS-ausgestatteten Fahrzeug vorstellig waren, immerhin 5 Personen angaben, die RDKS-Warnleuchte in ihrem eigenen Fahrzeug entweder noch nie gesehen zu haben oder sich diesbezüglich unsicher zu sein. Dies ist bemerkenswert, da das RDKS-Warnsymbol bei jedem Einschalten der Zündung im Rahmen des Lampentests kurz aufleuchtet.

Anschließend wurde die Frage gestellt: "Wovor warnt dieses Symbol Ihrer Meinung nach?". Die Antworten auf diese Frage, visualisiert in Abbildung 18, geben Aufschluss darüber, ob die Gestaltung des RDKS-Warnsymbols eine intuitive Zuordnung zu einem

Problem mit dem Reifendruck ermöglicht und ob die Befragten, die das Symbol bereits kannten, dessen Bedeutung korrekt interpretieren können.

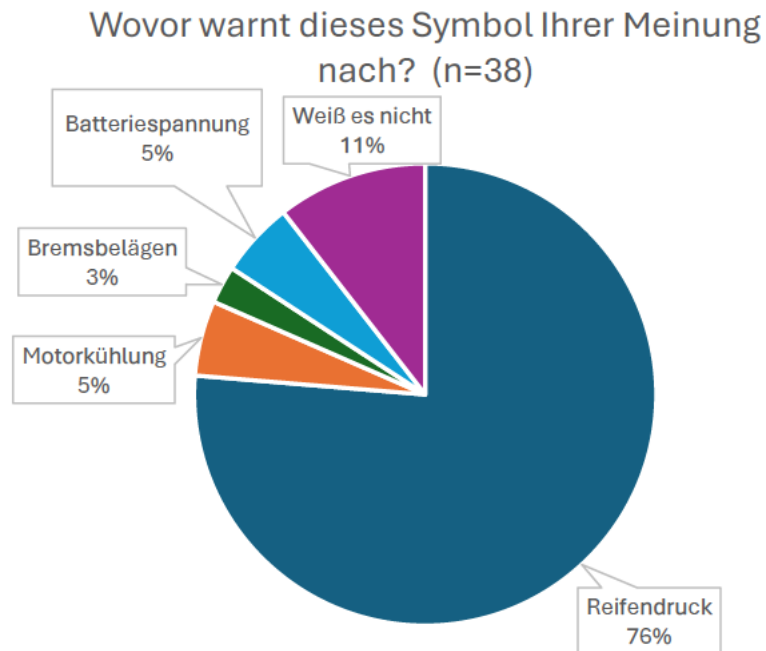


Abbildung 18: Interpretation der Bedeutung des RDKS-Warnsymbols (N=38)

Die Umfrageergebnisse zeigen eine hohe Trefferquote bei der korrekten Interpretation des Symbols: 76% aller Befragten konnten das RDKS-Warnsymbol korrekt einem Problem mit dem Reifendruck zuordnen. Diese hohe Rate unterstreicht ein grundlegendes Bewusstsein für die Bedeutung des Symbols in der Gesamtstichprobe.

Eine differenzierte Betrachtung nach RDKS-Ausstattung des Fahrzeugs verstärkt dieses positive Bild: Von den Befragten, die ein Fahrzeug mit RDKS nutzten, konnten sogar 91% (20 von 22 Befragten) die RDKS-Warnleuchte korrekt als Problem mit dem Reifendruck identifizieren. Dies ist ein starker Indikator dafür, dass die Nutzer von RDKS-Fahrzeugen im Allgemeinen gut über die Warnfunktion des RDKS informiert sind.

Auch unter den Befragten, die mit einem Fahrzeug ohne RDKS vorstellig waren, war das Verständnis beachtlich: Immerhin mehr als die Hälfte der Befragten (9 von 16, also 56%) konnten das Warnsymbol korrekt einem Problem mit dem Reifendruck zuordnen. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Gestaltung des Symbols eine intuitive Assoziation mit dem Thema Reifen ermöglicht. Interessanterweise konnten selbst 4 der 5 Personen, deren

RDKS-ausgestattetes Fahrzeug an der Prüfstelle war, und die Angaben, das RDKS-Warnsymbol noch nie in ihrem eigenen Fahrzeug gesehen zu haben, die Warnleuchte dennoch korrekt als Problem mit dem Reifendruck identifizieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Großteil der Fahrzeugführer in der Lage ist, die RDKS-Warnleuchte korrekt als Indikator für ein Problem mit dem Reifendruck zu erkennen und einzuordnen. Diese hohe Erkennungs- und Interpretationsrate ist ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit des RDKS, da sie gewährleistet, dass im Falle eines Aufleuchtens der Warnleuchte die meisten Nutzer wissen, welche Art von Problem vorliegt, und dementsprechend handeln können. Die Gestaltung des Warnsymbols scheint für den Großteil der Fahrer ausreichend eindeutig zu sein, was die Annahme unterstützt, dass das Symbol an sich nicht verbesserungsbedürftig ist und seine visuelle Klarheit die Wirksamkeit des RDKS nicht einschränkt.

5.3 Ergebnisse zur Reaktion auf RDKS-Warnungen

Die hier präsentierten Fragen wurden ausschließlich an Befragte gerichtet, deren Fahrzeug mit einem RDKS ausgestattet ist.

Zunächst wurde erhoben, ob die Befragten bereits eine Warnung vom Reifendruckkontrollsystem ihres Fahrzeugs erhalten hatten. Von den 22 Befragten, die ein Fahrzeug mit RDKS nutzten, gaben 17 Personen (77%) an, bereits eine Warnung vom System erhalten zu haben. Fünf Befragte (23%) antworteten entweder mit "Nein" oder waren sich "nicht sicher".

Um die subjektive Einschätzung der Warnung zu erfassen, wurde ein hypothetisches Szenario gestellt: "Stellen Sie sich vor, die Reifendruckkontrollsystem-Warnleuchte leuchtet während der Fahrt im Tacho Ihres Fahrzeugs auf. Wie dringlich schätzen Sie die Notwendigkeit ein, den Reifendruck zu überprüfen?". Die Antworten auf diese Frage sind in Abbildung 19 dargestellt.

Stellen Sie sich vor, die Reifendruckkontrollsystem-Warnleuchte leuchtet während der Fahrt im Tacho Ihres Fahrzeugs auf. Wie dringlich schätzen Sie die Notwendigkeit ein, den Reifendruck zu überprüfen? (n=17)

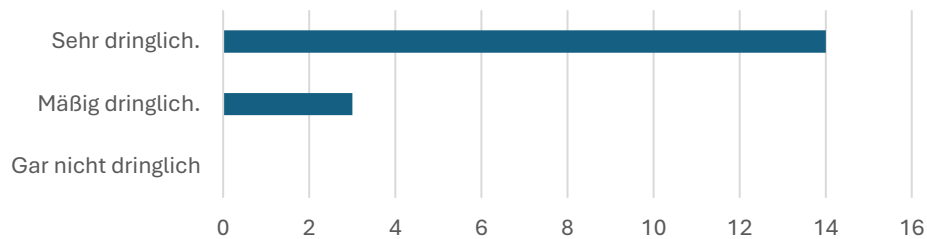


Abbildung 19: Empfundene Dringlichkeit der RDKS-Warnung (n=17)

Die Ergebnisse unterstreichen ein hohes Problembewusstsein: Eine überwältigende Mehrheit von 82% der Befragten gibt an, die Notwendigkeit einer Überprüfung in diesem Szenario als "sehr dringlich" zu empfinden. Die verbleibenden 18% schätzten die Dringlichkeit als "mäßig dringlich" ein. Erfreulicherweise gab keiner der Befragten an, eine RDKS-Warnung als "nicht dringlich" zu empfinden. Dies deutet darauf hin, dass die Bedeutung der Warnung grundsätzlich von den Fahrern verstanden wird.

Im Anschluss an die Frage zur wahrgenommenen Dringlichkeit wurde nach der tatsächlichen Reaktion auf die letzte erhaltene RDKS-Warnung gefragt: "Wie schnell haben Sie auf die letzte Warnung des Reifendruckkontrollsystems Ihres Fahrzeugs reagiert?". Die Antworten sind in Abbildung 20 dargestellt.

Wie schnell haben Sie auf die letzte Warnung des Reifendruckkontrollsystems Ihres Fahrzeugs reagiert? (n=17)

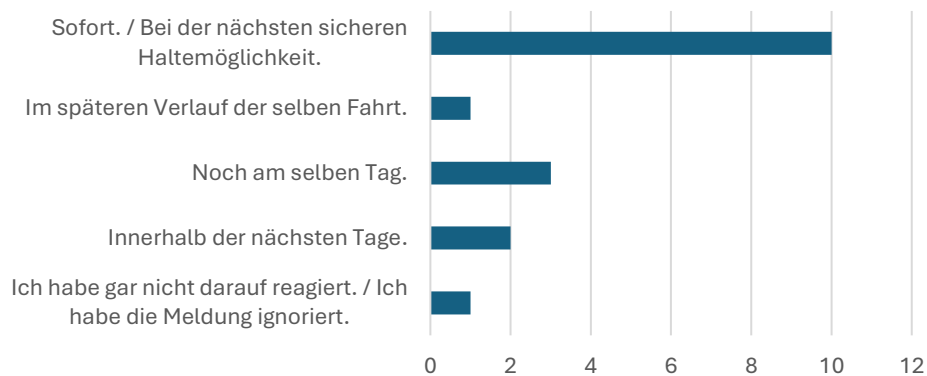


Abbildung 20: Tatsächliche Reaktionsgeschwindigkeit auf die letzte RDKS-Warnung (n=17)

Obwohl 82% der Befragten die RDKS-Warnung als "sehr dringlich" empfinden, spiegelt sich diese hohe Dringlichkeit nicht vollständig in der tatsächlichen Reaktionsgeschwindigkeit wider. Lediglich 59% der Befragten gaben an, sofort oder bei der nächsten sicheren Haltemöglichkeit auf die Warnung reagiert zu haben. Ein signifikanter Anteil reagierte erst später. 6% im Verlauf derselben Fahrt, 18% noch am selben Tag und 12% sogar erst innerhalb der nächsten Tage. 6% der Befragten gaben an, gar nicht auf die Meldung reagiert oder diese ignoriert zu haben.

Diese Diskrepanz zwischen der wahrgenommenen Dringlichkeit und der tatsächlichen Reaktionsgeschwindigkeit birgt erhebliche Sicherheitsrisiken. Während ein Druckverlust durch Diffusion langsam fortschreitet und eine sofortige Reaktion weniger kritisch ist, warnt das RDKS auch vor plötzlichem Druckverlust, auf den umgehend reagiert werden muss. Die Verzögerung der Reaktion bei einem substantziellen Anteil der Fahrer könnte somit dazu führen, dass die Fahrt fortgesetzt wird, obwohl bereits ein massiver Druckverlust stattgefunden hat.

Um mögliche Gründe für die beobachtete Verzögerung in der Reaktion auf RDKS-Warnungen zu ermitteln, wurde den Befragten folgende Frage gestellt: "Manchmal überprüfen Fahrer den Reifendruck nicht sofort, nachdem die Warnung des Reifendruckkontrollsystems aufleuchtet. Was glauben Sie, sind häufige Gründe dafür?". Diese Frage wurde mittels der Third-Person-Technik gestellt, um Effekte der sozialen

Erwünschtheit zu reduzieren, indem die Befragten ihr eigenes Verhalten auf Dritte projizierten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt.

Manchmal überprüfen Fahrer den Reifendruck nicht sofort, nachdem die Warnung des Reifendruckkontrollsystems aufleuchtet. Was glauben Sie, sind häufige Gründe dafür?
(n=7)

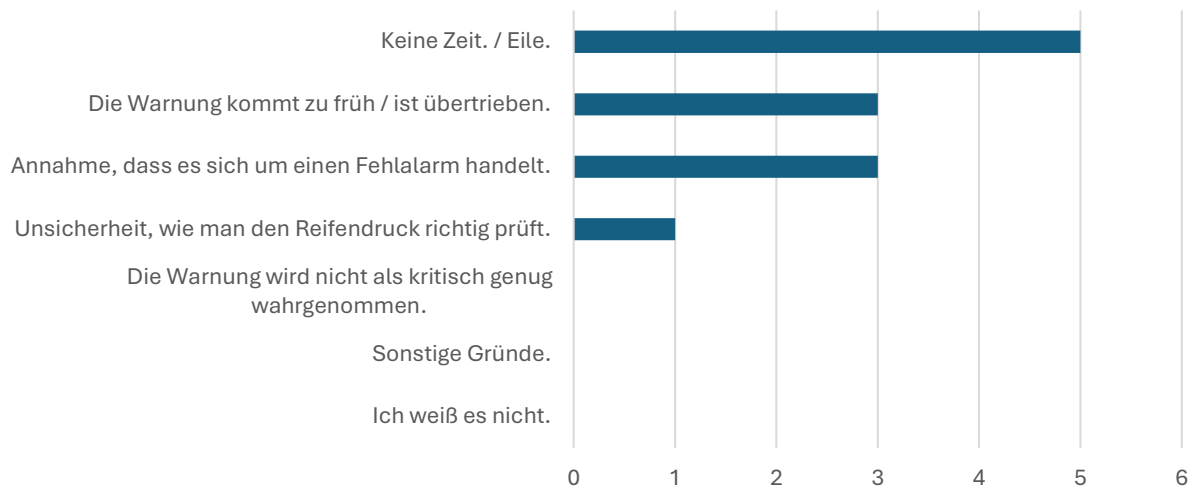


Abbildung 21: Wahrgenommene Gründe für eine verzögerte Reaktion auf RDKS-Warnungen (n=7)

Aufgrund der konditionellen Logik der Umfrage (nur an RDKS-Nutzer, die eine Warnung erhielten und nicht sofort reagierten), basieren die Ergebnisse auf einer kleinen Stichprobe von n=7. Dennoch zeigen sich Tendenzen: Der häufigste Grund, der von 5 von 7 Befragten genannt wurde, war "Keine Zeit. / Eile.". Mit jeweils 3 von 7 Nennungen folgten die Annahme eines Fehlalarms und die Aussage, dass die Warnung zu früh kommt. Dies deutet darauf hin, dass Zeitmangel und ein gewisses Misstrauen gegenüber der Systemgenauigkeit zu den Hauptgründen für eine verzögerte Reaktion beitragen können.

Abschließend wurde gefragt, ob die Befragten grundsätzlich Vertrauen in das Reifendruckkontrollsystem ihres Fahrzeugs haben. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 22 dargestellt.

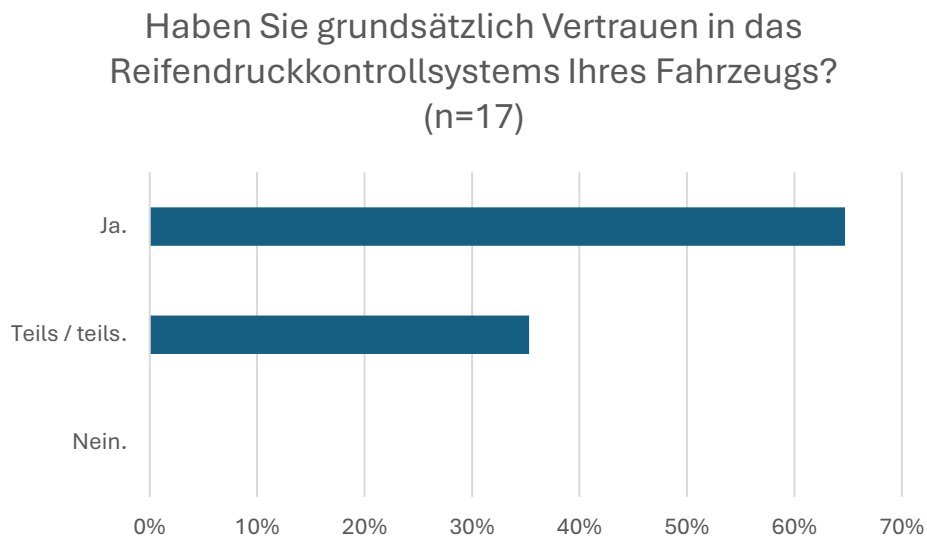


Abbildung 22: Grundsätzliches Vertrauen in RDKS (n=17)

Die Mehrheit der RDKS-Nutzer zeigt ein hohes Vertrauen in das System: 65% der Befragten gaben an, dem RDKS zu vertrauen. 35% äußerten lediglich ein teilweises Vertrauen, während erfreulicherweise keiner der Befragten angab, dem RDKS nicht zu vertrauen. Das vorhandene Vertrauen ist eine gute Basis für die Akzeptanz des Systems, das teilweise Vertrauen könnte jedoch mit den zuvor genannten Annahmen von Fehlalarmen korrelieren.

Die Analyse der Reaktionen auf RDKS-Warnungen zeigt ein komplexes Bild: Obwohl die meisten RDKS-Nutzer prinzipiell eine hohe Dringlichkeit der Warnung wahrnehmen, manifestiert sich diese nicht immer in einer unmittelbaren Reaktion. Ein signifikanter Anteil der Fahrer verzögert die Überprüfung des Reifendrucks nach RDKS-Warnung, wobei Zeitmangel und das Misstrauen gegenüber Fehlalarmen als Hauptgründe genannt werden. Dies birgt potenzielle Sicherheitsrisiken, insbesondere bei schnellem Druckverlust. Trotzdem besteht ein überwiegend hohes Grundvertrauen in das RDKS.

5.4 Ergebnisse zur Bedienung von RDKS

Dieser Abschnitt untersucht die Kenntnisse der Fahrzeugführer über die korrekte Bedienung von RDKS, insbesondere den kritischen Aspekt der Initialisierung bei passiven Systemen. Die folgende Frage richtete sich ausschließlich an die Befragten,

deren Fahrzeuge mit einem passiven RDKS ausgestattet sind, um zu prüfen, ob sie das System korrekt bedienen können.

Es ist wichtig zu betonen, dass bei Fahrzeugen mit passivem RDKS die "Set"-Taste (oder eine vergleichbare Funktion) nach jeder Reifendruckanpassung und jedem Reifenwechsel betätigt werden muss. Unterbleibt dies, arbeitet das RDKS mit falschen Referenzwerten, was seine Wirksamkeit erheblich einschränkt.

Die den Befragten gestellte Frage lautete: "Stellen Sie sich vor, Sie haben an Ihrem Fahrzeug den Reifendruck korrekt eingestellt oder die Reifen gewechselt. Welche der folgenden Handlungen ist bei vielen Fahrzeugen mit Reifendruckkontrollsystem danach erforderlich, damit das System wieder korrekt funktioniert?". Die Verteilung der Antworten lässt sich in Abbildung 23 nachvollziehen.

Stellen Sie sich vor, Sie haben an Ihrem Fahrzeug den Reifendruck korrekt eingestellt oder die Reifen gewechselt. Welche der folgenden Handlungen ist bei vielen Fahrzeugen mit Reifendruckkontrollsystem danach erforderlich, damit das System wieder korrekt

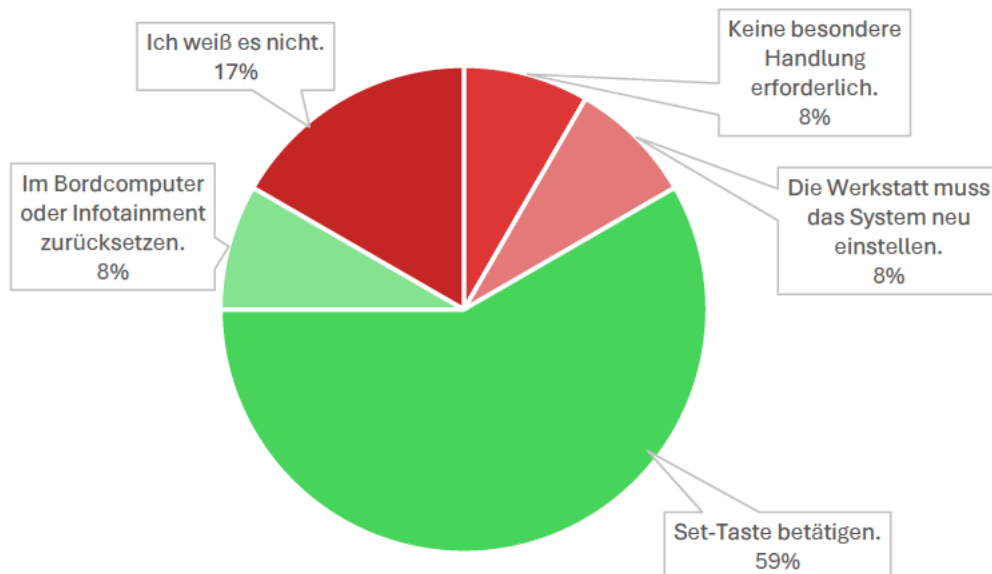


Abbildung 23: Kenntnisse zur Initialisierung passiver RDKS nach Reifendruckanpassung oder Reifenwechsel (n=12)

Von den 12 Befragten, deren Fahrzeuge über ein passives RDKS verfügen, konnten 8 Personen (67%) diese Frage korrekt beantworten. Dies bedeutet, dass ein signifikanter Anteil der Fahrer passiver RDKS die Notwendigkeit der Initialisierung nach Reifendruckänderungen oder Reifenwechseln grundsätzlich verstanden hat.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße (nur 12 Befragte mit passivem RDKS) sind die Ergebnisse dieses Abschnitts nicht statistisch generalisierbar. Sie sind vielmehr als erster Hinweis auf ein potenzielles Problem zu verstehen. Denn die Tatsache, dass ein Drittel der Befragten nicht weiß, wann die "Set"-Taste zu betätigen ist, schränkt die Wirksamkeit des RDKS bei Fahrzeugen mit passivem RDKS erheblich ein. Wenn Fahrer die Initialisierung versäumen, kann das System fehlerhafte Warnungen ausgeben oder im schlimmsten Fall einen tatsächlichen Druckverlust nicht rechtzeitig erkennen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, das Verständnis und die korrekte Bedienung passiver RDKS durch gezielte Aufklärung zu verbessern.

5.5 Praktiken und Kenntnisse zur Reifendruckkontrolle

Die allgemeinen Praktiken und das Kenntnisniveau der Fahrzeughalter zur manuellen Reifendruckkontrolle werden in diesem Abschnitt analysiert. Es wird beleuchtet, wie häufig der Reifendruck kontrolliert wird, welche Situationsfaktoren eine Rolle spielen und welche Kenntnisse über die korrekten Prüfbedingungen bestehen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Frage, ob Fahrzeughalter mit RDKS sich zu sehr auf eben jenes System verlassen und infolgedessen die manuelle Reifendruckkontrolle vernachlässigen.

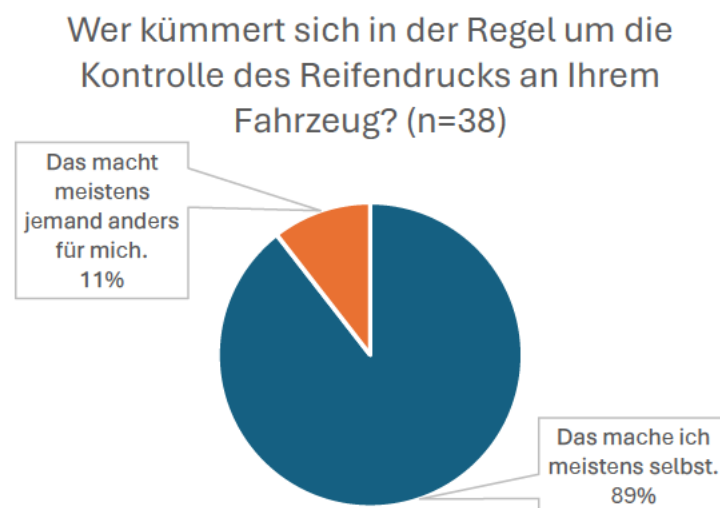


Abbildung 24: Verantwortlichkeit für die Reifendruckkontrolle (n=38)

Um die Verantwortlichkeit für die Reifendruckkontrolle zu klären, wurde zunächst erhoben, wer sich in der Regel um diese Aufgabe am Fahrzeug kümmert. Die in

Abbildung 24 dargestellten Ergebnisse zeigen eine klare Präferenz für die Eigenverantwortung der Fahrzeughalter.

Demnach geben 89% der Befragten an, sich selbst um die Kontrolle des Reifendrucks an ihrem Fahrzeug zu kümmern. Lediglich 11% delegieren diese Aufgabe an andere Personen. Dies unterstreicht die Relevanz des Verständnisses und der Fähigkeiten der Fahrzeughalter selbst für eine korrekte Reifendruckwartung.

Die Frage nach der Häufigkeit der Reifendruckkontrolle liefert einen entscheidenden Einblick in die Proaktivität der Fahrzeughalter. Während Hersteller eine monatliche bis zweiwöchentliche Überprüfung empfehlen, zeigen die in Abbildung 25 dargestellten Ergebnisse der Umfrage ein anderes Bild, insbesondere im Vergleich zwischen Fahrzeugen mit und ohne RDKS.

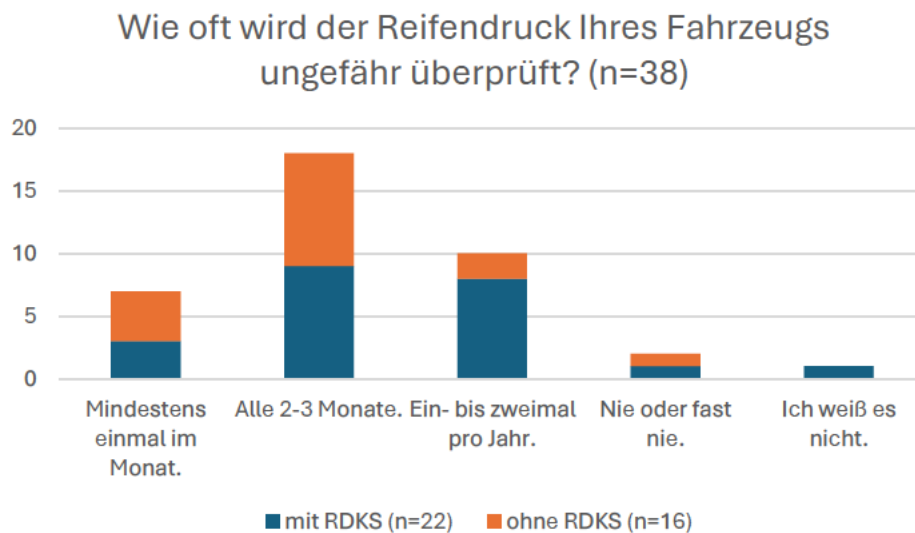


Abbildung 25: Häufigkeit der manuellen Reifendruckprüfung (n=38)

Die Empfehlung der Fahrzeughersteller, den Reifendruck alle 2 bis 4 Wochen zu prüfen, wird nur von einem kleinen Teil der Befragten befolgt. Lediglich 18% aller Befragten gaben an, den Reifendruck in diesem Intervall zu überprüfen. Eine genauere Betrachtung der Gruppen zeigt hierbei einen Unterschied: 14% der RDKS-Nutzer im Vergleich zu 25% der Fahrer ohne RDKS halten sich an diese Empfehlung.

Die größte Gruppe (41% mit RDKS, 56% ohne RDKS) überprüft den Reifendruck etwa alle 2 bis 3 Monate. Ein signifikanter Anteil (36% mit RDKS, 13% ohne RDKS) gab an, dies sogar nur ein- bis zweimal im Jahr zu tun. Hier zeigt sich die größte Differenz zwischen den Gruppen, wobei RDKS-Nutzer seltener als halbjährlich prüfen.

Tendenziell prüfen Fahrzeughalter, deren Fahrzeug kein RDKS hat, den Reifendruck häufiger im Sinne von "monatlich" oder "alle 2-3 Monate" als Halter von Fahrzeugen mit RDKS. Dennoch tun beide Gruppen dies definitiv nicht häufig genug im Vergleich zu den Herstellerempfehlungen, was ein grundsätzliches Defizit in der proaktiven Reifendruckpflege aufzeigt.

Neben der Häufigkeit wurde auch gefragt, in welchen Situationen der Reifendruck typischerweise überprüft wird, um situationsbedingte Kontrollmuster zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 dargestellt.

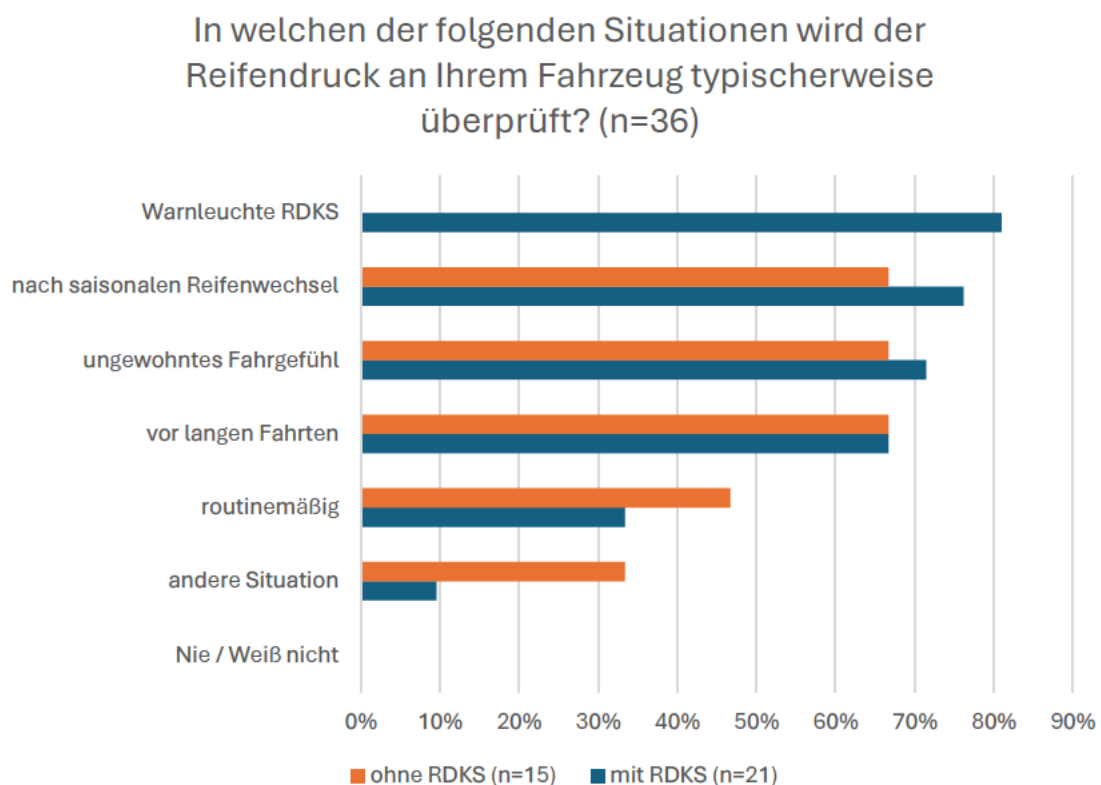


Abbildung 26: Gründe für Reifendruckprüfung (n=36)

Die Auswertung der Antworten nach RDKS-Ausstattung zeigt unterschiedliche Prioritäten: Bei Fahrzeugen mit RDKS steht die Reaktion auf eine RDKS-Warnleuchte (81%, 17/21) an erster Stelle. Dies bestätigt die Funktion des Systems als Auslöser für eine Prüfung. Knapp dahinter folgen der saisonale Reifenwechsel (76%, 16/21) und ein

ungewohntes Fahrgefühl (71%, 15/21). Auch vor langen Fahrten (67%, 14/21) wird der Druck noch häufig geprüft.

Bei Fahrzeugen ohne RDKS teilen sich der saisonale Reifenwechsel, ein ungewohntes Fahrgefühl und die Prüfung vor langen Fahrten mit jeweils 67% (10/15) den ersten Platz. Das Fehlen einer RDKS-Warnung als Auslöser führt hier zu einer gleichmäßigeren Verteilung auf andere anlassbezogene Prüfgelegenheiten.

Die größten Differenzen zwischen den Gruppen zeigten sich bei der routinemäßigen Kontrolle (47% ohne RDKS vs. 33% mit RDKS) und bei "anderen Situationen" (33% ohne RDKS vs. 10% mit RDKS). Dies könnte ein erster Hinweis darauf sein, dass sich Fahrer mit RDKS stärker auf das System verlassen und somit die Notwendigkeit einer proaktiven, routinemäßigen Kontrolle als geringer einschätzen.

Auffällig ist die hohe Platzierung des saisonalen Reifenwechsels unter den Situationen, in denen der Reifendruck typischerweise überprüft wird. Eine mögliche Erklärung hierfür ist ein Recency-Effekt: Da die Umfrage in zeitlicher Nähe zur saisonalen Reifenwechselperiode durchgeführt wurde, war dieses Ereignis bei den Befragten möglicherweise präsenter in Erinnerung und wurde daher häufiger genannt.

Um die Barrieren für eine häufigere Reifendruckkontrolle zu identifizieren, wurde nach den Hauptgründen gefragt, den Reifendruck nicht häufiger zu prüfen. Die Analyse dieser Gründe, dargestellt in Abbildung 27, zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Gruppen.

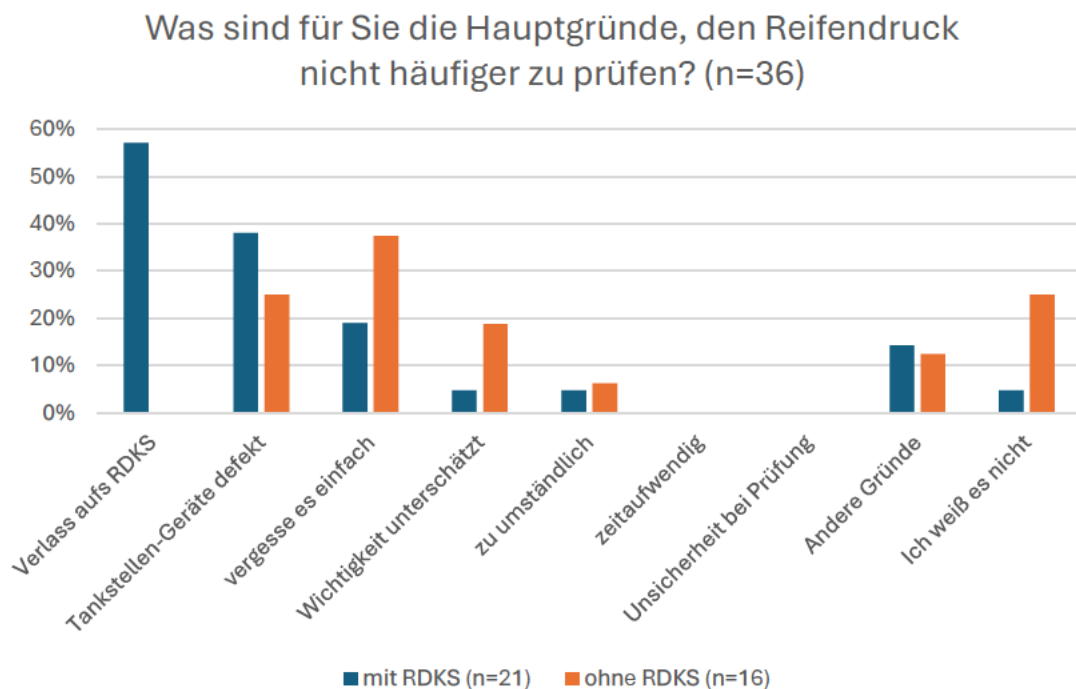


Abbildung 27: Gründe den Reifendruck nicht häufiger zu prüfen (n=36)

Bei Fahrzeugen mit RDKS war der am häufigsten genannte Grund, den Reifendruck nicht häufiger zu prüfen, das "Verlassen auf das RDKS" (57% der RDKS-Nutzer, 12/21). Dies bestätigt die Vermutung, dass das System als Ersatz für die manuelle Kontrolle wahrgenommen wird. An zweiter Stelle folgen "defekte Tankstellengeräte" (38%, 8/21), was ein bekanntes Problem darstellt, das auch vom Deutschen Verkehrssicherheitsrat (2025) bemängelt wird.

Bei Fahrzeugen ohne RDKS stand das "Vergessen" (38%, 6/16) an erster Stelle, gefolgt ebenfalls von "defekten Tankstellengeräten" (25%, 4/16). Die Tendenz, es einfach zu vergessen, ist bei Fahrzeughaltern ohne RDKS doppelt so hoch. Dies deutet darauf hin, dass das Vorhandensein eines RDKS zumindest dazu beiträgt, dass die Fahrer nicht komplett vergessen, auf ihren Reifendruck zu achten, da das System eine kontinuierliche Überwachung vornimmt und ggf. erinnert.

Interessanterweise wurden Gründe wie "zu umständlich", "zu zeitaufwendig" oder "Unsicherheit bei Prüfungen" von weniger als 10% der Befragten genannt, was darauf

hindeutet, dass die grundsätzliche Bereitschaft zur Durchführung der Kontrolle vorhanden ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Reifendruckpflege ist das Wissen um die korrekten Prüfbedingungen, insbesondere die Temperatur des Reifens. Die Ergebnisse der diesbezüglichen Frage sind in Abbildung 28 visualisiert.

Um den Reifendruck korrekt zu prüfen und einzustellen, sollte dies idealerweise... (n=38)

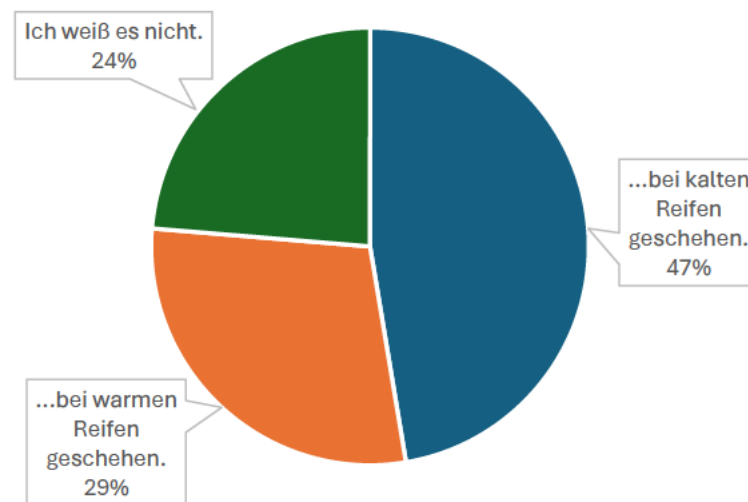


Abbildung 28: Kenntnis, ob der Reifendruck warm oder kalt geprüft wird (n=38)

Die Umfrageergebnisse zeigen hier eine deutliche Wissenslücke: Nicht einmal die Hälfte der Befragten wusste, dass der Reifendruck idealerweise bei kalten Reifen geprüft und eingestellt werden sollte. Erschwerend kommt hinzu, dass 29% der Befragten sogar davon ausgingen, dass die Prüfung bei warmen Reifen zu geschehen hat. Dies ist ein erhebliches Problem, da der Sollwert für den Reifendruck üblicherweise auf eine Reifentemperatur von 20°C (kalte Reifen) bezogen ist. Eine Prüfung und Anpassung bei warmen Reifen führt dazu, dass zu wenig Luft aufgepumpt wird, da der Druck im warmen Zustand bereits höher ist. Dies kann zu einem Minderdruck im kalten Zustand führen, mit allen damit verbundenen negativen Auswirkungen.

Abschließend wurde gefragt, worauf ein nicht korrekter Reifendruck wesentliche negative Auswirkungen haben kann, um das allgemeine Problembewusstsein der Fahrzeughalter zu erfassen. Die Antworten sind in Abbildung 29 dargestellt.

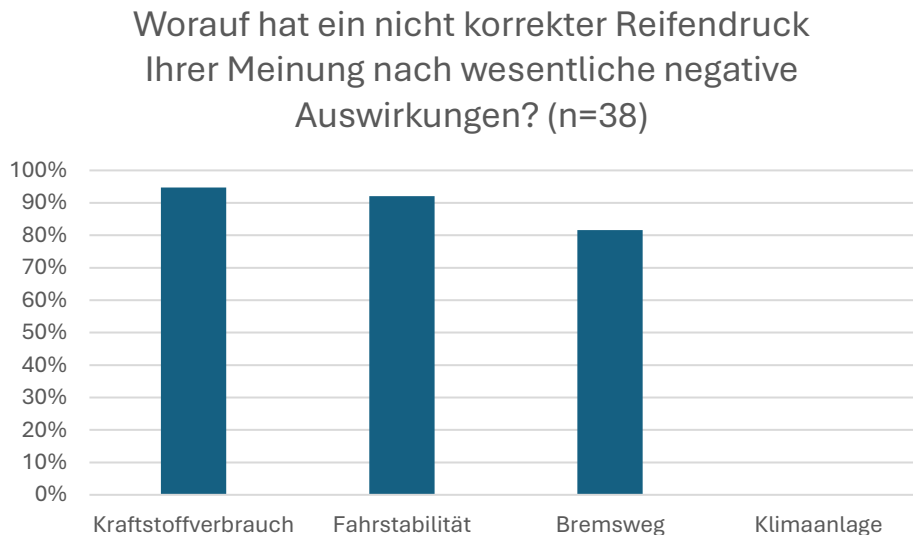


Abbildung 29: Auswirkungen von falschem Reifendruck (n=38)

Die Ergebnisse zeigen, dass Fahrzeughalter sich der negativen Folgen von inkorrektem Reifendruck durchaus bewusst sind. Der Kraftstoffverbrauch (95%) und die Fahrstabilität (92%) wurden von einer überwiegenden Mehrheit der Befragten als wesentlich negativ beeinflusst eingeschätzt. Auch der Bremsweg (82% Zustimmung) wurde von einem Großteil korrekt als betroffen identifiziert.

Die hohe Qualität der Umfragedaten wird hier erneut bestätigt: Die Ablenkungsoption "Funktion der Klimaanlage" wurde von keinem der Befragten ausgewählt, was darauf hindeutet, dass die Teilnehmer die Fragen aufmerksam und zielgerichtet beantwortet haben.

Dieses Kapitel hat aufgedeckt, dass Fahrzeughalter überwiegend bereit sind, die Verantwortung für die Reifendruckkontrolle selbst zu übernehmen. Allerdings besteht eine signifikante Lücke zwischen der empfohlenen und der tatsächlichen Häufigkeit der Reifendruckprüfung. Die Ergebnisse legen nahe, dass Fahrzeughalter mit RDKS dazu neigen, sich stärker auf das System zu verlassen und die manuelle Kontrolle zu vernachlässigen, was sich in einer geringeren Prüfhäufigkeit und dem explizit genannten "Verlass auf RDKS" als Hauptgrund für die selteneren Prüfungen zeigt. Unabhängig vom RDKS-Besitz stellt die Funktionalität der Prüfgeräte an Tankstellen eine

wahrgenommene Barriere dar. Ein kritisches Ergebnis ist das mangelnde Wissen über die korrekten Prüfbedingungen (kalte Reifen), was zu einer systematischen Unterschreitung des Solldrucks führen kann. Trotz dieser Defizite sind sich die meisten Fahrzeughalter der negativen Auswirkungen von falschem Reifendruck auf Kraftstoffverbrauch, Fahrstabilität und Bremsweg bewusst.

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Messungen und Befragungen

6.1.1 Selbsteinschätzung vs. Realität bei der Prüffrequenz

Um den Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen und der tatsächlichen Reifendruckwartung zu untersuchen, wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Nullhypothese (H_0): Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der medianen relativen Reifendruckabweichung zwischen den Gruppen von Fahrzeughaltern, die unterschiedliche Prüffrequenzen angeben.

Alternativhypothese (H_1): Es gibt einen signifikanten Unterschied in der medianen relativen Reifendruckabweichung zwischen mindestens zwei Gruppen von Fahrzeughaltern, die unterschiedliche Prüffrequenzen angeben.

Für die Analyse wurde die Frage "Wie oft wird der Reifendruck Ihres Fahrzeugs ungefähr geprüft?" aus der Befragung mit den gemessenen relativen Reifendruckabweichungen der jeweiligen Fahrzeuge verknüpft. Die Daten wurden anschließend nach den angegebenen Prüffrequenzen gruppiert und mittels des Kruskal-Wallis-H-Tests auf Unterschiede in den medianen relativen Reifendruckabweichungen untersucht. Der Kruskal-Wallis-Test wurde hier gewählt, um zu prüfen, ob es einen statistisch signifikanten Unterschied in der zentralen Tendenz der Reifendruckabweichung zwischen den verschiedenen Gruppen der Prüffrequenz gibt.

Die Ergebnisse, in Tabelle 3 dargestellt zeigten folgende mediane relative Reifendruckabweichungen für die jeweiligen Prüffrequenzgruppen:

Tabelle 3: Mediane relative Reifendruckabweichung nach Prüffrequenz

	Einmal im Monat	Alle 2-3 Monate	1-2 mal im Jahr	Nie oder fast nie
Mediane rel. Abweichung	10,1%	4,0%	-5,3%	-15,5%
Anzahl	28	72	40	8

Es ist zu beachten, dass die Gruppe "Nie oder fast nie" eine sehr geringe Stichprobengröße (n=8) aufweist und somit die Konfidenzintervalle für dieses Variablenpaar groß ausfallen.

Der durchgeführte Kruskal-Wallis-H-Test ergab einen P-Wert von 0,006. Dieser Wert liegt unter dem üblichen Signifikanzniveau von 0,05, was darauf hindeutet, dass statistisch signifikante Unterschiede in der medianen relativen Reifendruckabweichung zwischen mindestens zwei der Prüffrequenzgruppen bestehen.

Die Analyse der Daten zeigt eine direkte Beziehung zwischen der Prüffrequenz und der relativen Reifendruckabweichung: Mit steigender Prüffrequenz steigt auch die relative Reifendruckabweichung. Dies bedeutet, dass eine häufigere Prüfung des Reifendrucks zu einer Tendenz zu Überdruck führt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass ein bewusster Überdruck als Puffer gegen natürlichen Druckverlust eingestellt wird. Umgekehrt führt eine seltene Prüfung zu einem deutlichen Minderdruck, was sich durch die Vernachlässigung der Reifendruckwartung erklären lässt.

6.1.2 Kenntnis der korrekten Messbedingungen vs. Messergebnis

Die korrekte Kenntnis der Messbedingungen ist entscheidend für eine präzise Reifendruckwartung. In diesem Zusammenhang wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Nullhypothese (H_0): Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der medianen relativen Reifendruckabweichung zwischen Fahrzeughaltern, die die korrekten Messbedingungen kennen, und jenen, die sie nicht kennen.

Alternativhypothese (H_1): Es gibt einen signifikanten Unterschied in der medianen relativen Reifendruckabweichung zwischen Fahrzeughaltern, die die korrekten Messbedingungen kennen, und jenen, die sie nicht kennen.

Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden die Daten aus der Reifendruckmessung mit den Antworten auf die Umfragefrage "Um den Reifendruck korrekt zu prüfen und einzustellen, sollte dies idealerweise..." verknüpft. Die Antwortmöglichkeiten hierfür waren "...bei warmen Reifen geschehen", "...bei kalten Reifen geschehen" und "Ich weiß es nicht".

Die Analyse der medianen relativen Reifendruckabweichungen ergab:

- Mediane relative Reifendruckabweichung bei korrekter Kenntnis: 8,0%
- Mediane relative Reifendruckabweichung ohne korrekte Kenntnis: -1,0%

Der anschließende Mann-Whitney-U-Test zur Überprüfung der Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen lieferte einen P-Wert von 0,0021. Dieser P-Wert liegt deutlich unter dem gängigen Signifikanzniveau von 0,05. Somit wird die Nullhypothese verworfen.

Das Ergebnis zeigt, dass die Gruppe mit der korrekten Kenntnis der Messbedingungen eine moderate mediane relative Reifendruckabweichung aufweist, die im positiven Bereich liegt. Die Gruppe ohne korrekte Kenntnis hingegen zeigt einen geringen Minderdruck. Dies deutet darauf hin, dass die bloße Kenntnis der idealen Messbedingungen nicht zwingend zu einem präziseren Reifendruck führt, sondern in dieser Stichprobe mit einer Tendenz zum Überdruck assoziiert ist.

6.1.3 Fallstudien zu extremen Minderdrücken

Zur Vertiefung der Erkenntnisse aus der Gesamtbetrachtung wurden zwei spezifische Fahrzeuge, bei denen alle vier Reifen eine relative Reifendruckabweichung von mehr als -20% aufwiesen, einer genaueren Betrachtung unterzogen. Die Erwartung war, dass die Halter dieser Fahrzeuge ein geringeres Wissen über Reifendruckwartung besitzen und diesen seltener prüfen.

Fallstudie 1: Fahrzeug mit laufender Nummer 28

Dieses Fahrzeug zeigte an der Vorder- und Hinterachse jeweils eine relative Abweichung von etwa -31% vom Sollwert. Der Fahrzeughalter gehört zur Altersgruppe der 60- bis 69-Jährigen. Auf die Frage nach der Häufigkeit der Reifendruckprüfung gab der Halter an, diese "Ein- bis zweimal pro Jahr" zu überprüfen.

Fallstudie 2: Fahrzeug mit laufender Nummer 34

Bei diesem Fahrzeug betrug die relative Abweichung an der Vorderachse -27% und an der Hinterachse -24% vom Sollwert. Der Fahrzeughalter dieses Fahrzeugs ist der Altersgruppe der 18- bis 29-Jährigen zuzuordnen. Die Antwort auf die Frage nach der Prüffrequenz lautete hier "Nie oder fast nie".

Besonders aufschlussreich waren die Antworten beider Halter auf die Frage "Was sind für Sie die Hauptgründe, den Reifendruck nicht häufiger zu prüfen?". Beide gaben als einzigen Grund an: "Ich halte die regelmäßige Prüfung nicht für so wichtig, wenn die Reifen äußerlich in Ordnung aussehen." Diese Antwort wurde in der gesamten Gruppe der Fahrzeuge ohne RDKS nur dreimal gewählt, wobei zwei dieser Nennungen den hier untersuchten Fallstudien entsprechen.

Es ist bemerkenswert, dass diese beiden Fälle die jeweiligen Enden des untersuchten Altersspektrums repräsentieren (18-29 Jahre und 60-69 Jahre). Obwohl es sich lediglich um zwei Einzelfälle handelt, liefert dies einen ersten Hinweis darauf, dass das Alter des Fahrzeughalters möglicherweise keine direkte Rolle für das Auftreten solch extremer Minderdrücke spielt, sondern eher die zugrunde liegende Fehleinschätzung.

Die Annahme, den korrekten Reifendruck optisch anhand des Reifenzustands beurteilen zu können, erweist sich, wie die Messergebnisse dieser Fallstudien drastisch vor Augen führen, als schwerwiegender Irrglaube. Eine solche Fehleinschätzung kann erhebliche negative Folgen für die Fahrsicherheit, den Kraftstoffverbrauch und den Reifenverschleiß nach sich ziehen.

6.1.4 Überdruck als systematische Wartungsstrategie

Die ursprünglich erwartete Annahme war, dass Fahrzeuge mit einem RDKS tendenziell eine relative Abweichung um 0% aufweisen würden, während Fahrzeuge ohne RDKS voraussichtlich einen leichten Minderdruck zeigen würden.

Die gemessenen Daten widersprechen dieser Erwartung jedoch: Fahrzeuge mit RDKS zeigen einen leichten Überdruck, wohingegen Fahrzeuge ohne RDKS eine mediane relative Abweichung um 0% aufweisen. Dieses Muster eines leichten Überdrucks zeigt sich konsistent auch bei Fahrern mit guten theoretischen Kenntnissen bezüglich der korrekten Messbedingungen (siehe Kapitel 6.1.2) und bei jenen, die ihren Reifendruck häufig prüfen (siehe Kapitel 6.1.1). Dies deutet auf ein systematisches Verhalten hin.

Es wird vermutet, dass dieser leichte Überdruck bei RDKS-ausgestatteten Fahrzeugen dazu dient, eine als potenziell störend empfundene RDKS-Warnung hinauszuzögern, wie bereits in Kapitel 4.2.2.3 theoretisch erörtert. Ein ähnliches Verhalten wurde nun auch bei den Gruppen von Fahrern mit besseren Kenntnissen und hoher Prüffrequenz festgestellt.

Der leicht erhöhte Reifendruck könnte als Sicherheitspuffer dienen. Da Druckverlust durch Diffusion über die Zeit unvermeidlich ist, sorgt ein leichter Überdruck dafür, dass es länger dauert, bis der Reifendruck in den kritischen Minderdruckbereich fällt. Dies reduziert die Notwendigkeit häufigen Nachfüllens und minimiert das Risiko, schnell unter den vom Hersteller empfohlenen Solldruck zu rutschen. All dies lässt darauf schließen, dass viele Fahrer den vom Hersteller angegebenen Solldruck eher als Minimum denn als Optimum interpretieren und bewusst einen leicht höheren Druck wählen.

6.2 Limitationen der Arbeit und kritische Reflexion

6.2.1 Repräsentativität der Stichprobe

Die Aussagekraft der Studienergebnisse hängt maßgeblich von der Repräsentativität der Stichprobe ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Reifendruckmessungen und Befragungen ausschließlich an Fahrzeugen durchgeführt, die zur HU vorgeführt wurden. Dies führt zu mehreren potenziellen Einschränkungen:

- Es ist denkbar, dass Fahrzeughalter ihre Fahrzeuge vor der HU, eventuell im Rahmen einer Wartung, speziell vorbereiten und dabei auch den Reifendruck frisch einstellen. Dies könnte dazu führen, dass der gemessene Reifendruck im Durchschnitt präziser ist, als er es im alltäglichen Fahrbetrieb wäre.
- Personen, die ihr Fahrzeug zur HU bringen, sind mutmaßlich stärker an der Fahrzeugwartung interessiert und möglicherweise besser informiert als der

Durchschnitt der Fahrzeughalter. Dies könnte die Stichprobe im Hinblick auf das Wartungsverhalten und das Wissen über Reifendruck positiv verzerren.

- Da Fahrzeuge der Klasse M1 in Deutschland erst nach drei Jahren zur ersten Hauptuntersuchung vorstellig werden müssen, spiegelt die Stichprobe einen Fahrzeugbestand wider, der mindestens drei Jahre alt ist. Dies bedeutet, dass die Erhebung die Reifendrucksituation in einem Markt abbildet, der nicht die neuesten Fahrzeugmodelle und deren spezifische Reifendruck-Charakteristika der letzten drei Jahre umfasst und somit nicht unbedingt repräsentativ für den gesamten aktuellen Fahrzeugbestand sein muss.
- Die Datenerhebung erfolgte ausschließlich an einem spezifischen Standort. Eine uneingeschränkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das gesamte Bundesgebiet oder gar andere europäische Regionen ist daher nur bedingt gegeben.
- Die vorliegende Studie ist als Querschnittsdesign angelegt, bei dem Daten lediglich zu einem einzigen Zeitpunkt erhoben wurden. Obwohl die Ähnlichkeit der Ergebnisse mit denen der OICA-Studie saisonale Effekte tendenziell ausschließt, können diese nicht vollständig ausgeschlossen werden. Eine Längsschnittstudie wäre erforderlich, um saisonale oder zeitabhängige Einflüsse auf den Reifendruck gänzlich zu eliminieren.

6.2.2 Auswirkungen der Umfragekonzeption

Die Gestaltung der Befragung mit einer konditionellen Logik führte dazu, dass die Stichprobengröße für einzelne Fragen variierte und in einigen Fällen sehr klein ausfiel. Dies hatte zur Konsequenz, dass ein Teil der Umfrageergebnisse keine statistische Signifikanz hat. Die aus diesen Abschnitten gewonnenen Erkenntnisse sind daher eher als erste qualitative Hinweise zu verstehen und erfordern für eine fundierte Aussagekraft weitere Untersuchungen mit größeren Stichprobenumfängen.

6.2.3 Messtechnische Aspekte

Die Genauigkeit der erhobenen Reifendruckdaten ist von der Qualität des verwendeten Messwerkzeugs abhängig. Obwohl ein qualitativ hochwertiges Messwerkzeug verwendet wurde, erfolgte keine formelle Kalibrierung vor der Datenerhebung. Während der gesamten Messperiode gab es keine Anzeichen oder Gründe, die an der Genauigkeit der

Messungen zweifeln ließen, dennoch ist dieser Aspekt als methodische Einschränkung zu erwähnen.

6.2.4 Aussagen zum Überdruck

Die Diskussion von Überdruck im Kontext der Reifendruckwartung stellt eine eigene Herausforderung dar. Im Gegensatz zu sicherheitskritischem Minderdruck, der sich aus den regulatorischen Vorgaben wie der ECE-Regelung Nr. 64 ableiten lässt, existiert keine vergleichbare Regulierung für sicherheitskritischen Überdruck. Eine umfassende Untersuchung und Definition des sicherheitskritischen Überdrucks würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

6.2.5 Methodische Überlegungen zur Datenunabhängigkeit

Eine der fundamentalen Annahmen vieler statistischer Tests ist die Unabhängigkeit der Beobachtungen. In dieser Studie wurden die relativen Reifendruckabweichungen jedes einzelnen Reifens als unabhängige Werte angenommen, obwohl zu einem gewissen Grad eine Abhängigkeit zwischen den Reifen desselben Fahrzeugs besteht.

Hersteller geben den Solldruck typischerweise achsweise vor, was impliziert, dass Fahrzeughalter idealerweise den gleichen Reifendruck innerhalb beider Reifen derselben Achse haben sollten. Der Boxplot (Abbildung 30) der relativen Reifendruckabweichungen innerhalb einer Achse zeigt, dass dies zum großen Teil funktioniert. Der Median liegt bei 0,0%, und der IQR bewegt sich in etwa zwischen -2% und 2%, mit einer Spannweite von ungefähr -5% bis 5%.

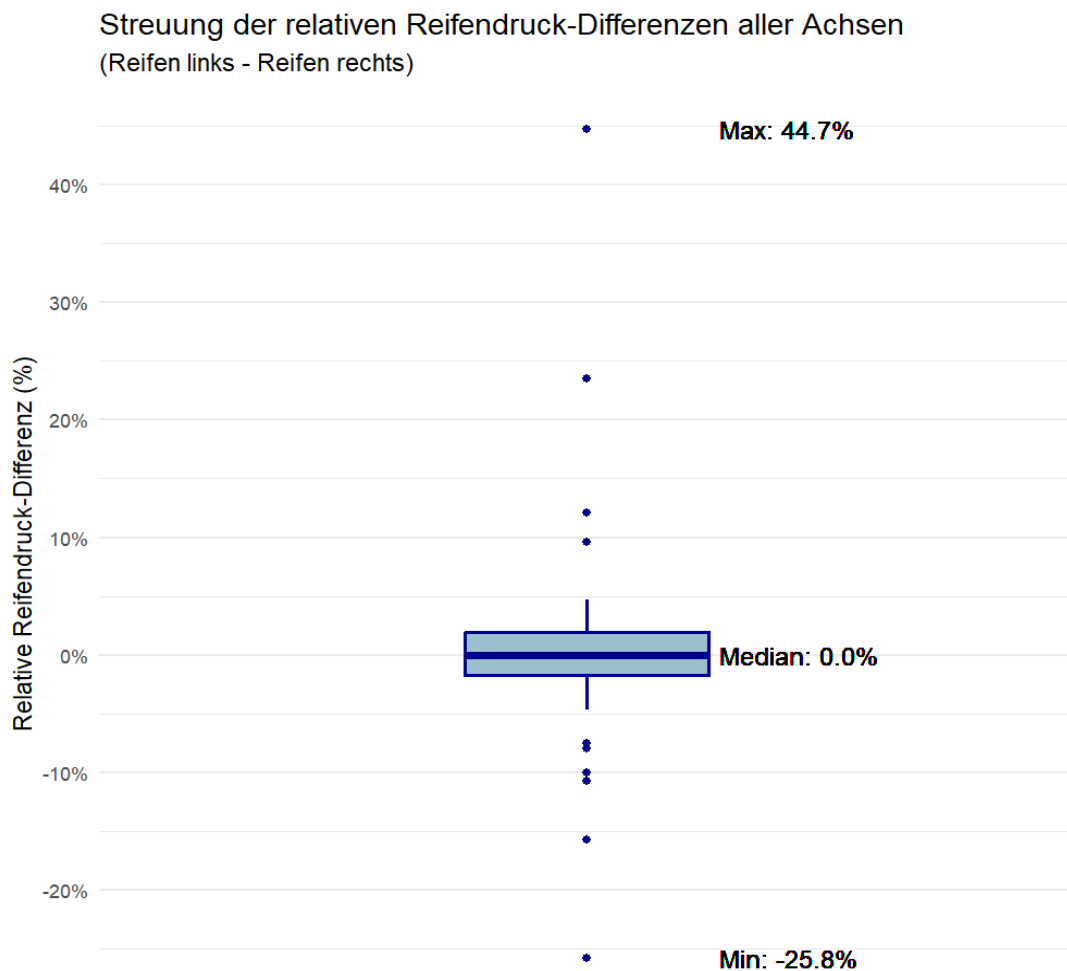


Abbildung 30: Box-Plot der relativen Reifendruckdifferenz aller Achsen

Dennoch treten signifikante Ausreißer auf, die relative Abweichungen von bis zu -25,8% (Minimum) und 44,7% (Maximum) erreichen. Würde man die Abhängigkeit der Reifendruckabweichung einer Achse berücksichtigen und beispielsweise mit dem Mittelwert pro Achse arbeiten, würden diese extremen Ausreißer marginalisiert, das heißt, ihre Information würde im Mittelwert geglättet und ihr Einfluss stark reduziert. Die Diskrepanzen innerhalb einer Achse können verschiedene Ursachen haben, die hier nur gemutmaßt werden können. Ein Teil stammt sicherlich von Reifen-, Felgen- und Ventilschäden oder dem Eindringen von Fremdkörpern. Ein weiterer Teil könnte auf Bedienungsfehler beim Befüllen der Reifen an Tankstellen oder schlecht gewartete Füllgeräte zurückzuführen sein.

Die zentrale Frage war daher, ob man die mittlere Reifendruckabweichung pro Achse nimmt und somit die Abhängigkeit der Daten berücksichtigt, aber die Ausreißer

marginalisiert oder ob man jeden Reifen einzeln als unabhängig betrachtet, die Abhängigkeit missachtet, aber die Ausreißer beachtet.

Diese Arbeit hat sich dafür entschieden, die Reifendruckabweichungen jedes einzelnen Reifens als Beobachtung zu betrachten, obwohl eine gewisse Abhängigkeit zwischen den Reifen desselben Fahrzeugs besteht. Diese Entscheidung basiert auf der Erkenntnis, dass:

- Die im Boxplot der Achsendifferenzen dargestellten extremen Abweichungen repräsentieren potenziell sicherheitsrelevante Zustände einzelner Reifen, die bei einer Aggregation auf Achs- oder Fahrzeugebene (z.B. durch Mittelwertbildung) stark marginalisiert oder maskiert würden. Da die Analyse darauf abzielt, auch solche kritischen Einzelzustände zu erfassen, ist der Informationserhalt auf Reifenebene von höherer Bedeutung.
- Obwohl der Idealfall eines ausgeglichenen Reifendrucks pro Achse angestrebt wird, können in der Praxis Faktoren wie individuelle Reifenschäden, langsame Leckagen oder unpräzise Befüllvorgänge zu signifikanten Unterschieden zwischen Reifen auf derselben Achse führen. Die Einzelbetrachtung spiegelt diese reale Variabilität besser wider.

Die Konsequenz dieser Entscheidung ist, dass sie potenziell die größte Limitation dieser Arbeit darstellt und eine Quelle für eine Überinterpretation der statistischen Signifikanz sein kann. Da die Stichprobe durch die Annahme der Unabhängigkeit jedes Reifens effektiv doppelt so groß ausfällt, können P-Werte in den statistischen Auswertungen unter Umständen kleiner ausfallen und somit zu optimistischen Schlussfolgerungen führen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 1. Art, also der Feststellung eines signifikanten Effekts, wo in Wirklichkeit keiner existiert.

7 Fazit

Die zentrale Fragestellung dieser Bachelorarbeit war, inwieweit RDKS unter realen Bedingungen zur Einhaltung der vorgegebenen Reifendruck-Sollwerte beitragen. Ziel war es, basierend auf empirischen Messungen und einer ergänzenden Kundenbefragung, die Abweichung von den korrekten Reifendruckwerten bei Fahrzeugen mit und ohne RDKS zu untersuchen und die Kundenakzeptanz sowie die Wirksamkeit dieser Systeme zu bewerten.

Die Reifendruckmessungen an 66 Fahrzeugen haben die Effektivität von RDKS eindrucksvoll bestätigt. Es konnte ein statistisch hochsignifikanter Unterschied im Reifendruckverhalten zwischen Fahrzeugen mit und ohne RDKS nachgewiesen werden. Die Systeme erweisen sich als äußerst wirksam bei der Verhinderung von sicherheitskritischem Minderdruck. In der gesamten Stichprobe wurde kein einziges mit RDKS ausgestattetes Fahrzeug mit einem gefährlichen Unterdruck (definiert als Abweichung von unter -20% vom Sollwert) festgestellt. Im deutlichen Gegensatz dazu wiesen 10,9% der Reifen an Fahrzeugen ohne RDKS einen solchen kritischen Minderdruck auf. Alle in der Studie identifizierten Fahrzeuge mit signifikantem Unterdruck besaßen kein RDKS.

Interessanterweise führt das Vorhandensein eines RDKS jedoch nicht zu einer präziseren Einhaltung des exakten Sollwerts. Stattdessen neigen Fahrzeuge mit RDKS zu einem leichten Überdruck, mit einer medianen Abweichung von +5,3%. Fahrzeuge ohne RDKS lagen mit einer medianen Abweichung von -0,5% deutlich näher am Idealwert. Das RDKS schützt zudem systembedingt nicht vor zu hohem Reifendruck. Weder das Fahrzeugalter noch die Kilometerleistung zeigten eine statistisch signifikante Korrelation zur Reifendruckabweichung, was darauf hindeutet, dass die Wartung des Reifendrucks unabhängig von diesen Faktoren zu erfolgen scheint.

Die Kundenumfrage unter 38 Teilnehmern zeichnete ein facettenreiches Bild der Nutzerperspektive. Das RDKS-Warnsymbol wird von einer großen Mehrheit (76%) und insbesondere von Fahrern von RDKS-ausgestatteten Fahrzeugen (91%) korrekt erkannt und einem Problem mit dem Reifendruck zugeordnet. Obwohl 82% der RDKS-Nutzer eine entsprechende Warnung als "sehr dringlich" einstufen, reagiert nur eine knappe

Mehrheit (59%) sofort. Als Hauptgründe für eine verzögerte Reaktion wurden Zeitmangel und die Annahme eines Fehlalarms genannt.

Ein zentrales Ergebnis der Befragung ist das entstehende "falsche Sicherheitsgefühl" durch das RDKS. Besitzer solcher Fahrzeuge neigen dazu, sich auf das System zu verlassen und die manuelle Kontrolle zu vernachlässigen. Sie prüfen seltener als Fahrer ohne RDKS, und 57% der RDKS-Nutzer nannten das "Verlassen auf das RDKS" als Hauptgrund, den Druck nicht häufiger zu prüfen. Herstellerempfehlungen zur Prüffrequenz werden generell nur von einer Minderheit befolgt.

Besonders kritisch sind die festgestellten Wissenslücken: Ein Drittel der Fahrer mit passivem RDKS wusste nicht, dass das System nach einer Druckanpassung manuell initialisiert werden muss, was dessen Wirksamkeit massiv einschränkt. Darüber hinaus wusste weniger als die Hälfte der Befragten (47%), dass der Reifendruck bei kalten Reifen gemessen werden sollte, was zu systematisch falschem Befüllen führen kann. Demgegenüber steht ein hohes Bewusstsein für die negativen Folgen von falschem Reifendruck auf Kraftstoffverbrauch, Fahrstabilität und Bremsweg.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass RDKS einen fundamentalen Beitrag zur Fahrzeugsicherheit leisten, indem sie kritische Minderdruckzustände effektiv verhindern. Ihre Wirksamkeit wird jedoch durch das Verhalten und die Kenntnisse der Fahrzeughalter beeinflusst. Die Tendenz zum Überdruck bei RDKS-Fahrzeugen sowie bei Fahrern mit hoher Prüffrequenz und gutem theoretischem Wissen deutet auf eine bewusste Strategie hin: Der Solldruck wird als Minimum interpretiert und ein leichter Überdruck als Sicherheitspuffer gegen den natürlichen Druckverlust und zur Vermeidung von Warnmeldungen eingestellt.

Die Limitationen dieser Arbeit, insbesondere hinsichtlich der Repräsentativität der an einer Prüfstelle gewonnenen Stichprobe und der statistischen Annahme der Unabhängigkeit der Einzelreifenmessungen, müssen bei der Verallgemeinerung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Zukünftige Forschung könnte hier ansetzen, beispielsweise durch Längsschnittstudien im realen Fahrbetrieb. Weiterführende Untersuchungen wären zudem wertvoll, um die sicherheitsrelevanten Auswirkungen von systematischem Überdruck zu quantifizieren und die Gründe für das Verhalten der Fahrer noch tiefer zu analysieren.

8 Literaturverzeichnis

- Deutscher Verkehrsicherheitsrat (2025). *Unterstützende Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des optimalen Reifen-Fülldrucks bei Fahrzeugen*. https://www.dvr.de/fileadmin/user_upload/2025-04-28_Vorstandsbeschluss_FT_Reifendruck.pdf
- Dümmer, K. (2022, 16. Februar). Reifendruck-Studie: Autofahrer kontrollieren nur selten. *adac.de*. Abgerufen am 26. Mai 2025, von <https://www.adac.de/news/studie-reifendruck-kontrolle/>
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A. & Lang, A. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160. <https://doi.org/10.3758/brm.41.4.1149>
- Fischer, R., Schlögl, B., Heider, U., Wimmer, A., Wormer, G., Keil, W. & Mann, J. (2013). *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik* (30. Aufl.). Verlag Europa-Lehrmittel.
- Kroher, T. (2024, 8. Februar). Dem Mikroplastik auf der Spur: Weniger Reifenabrieb ist möglich. Abgerufen am 1. Juni 2025, von <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/reifen/reifenkauf/reifenabrieb-mikroplastik/>
- Leister, G. (2015). *Fahrzeigräder - Fahrzeugreifen*. In Springer eBooks (2. Aufl.). <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07464-7>
- Sivinski, R. (2012). *Evaluation of the Effectiveness of TPMS in Proper Tire Pressure Maintenance*. <https://trid.trb.org/view/1226251>
- Stokłosa, J. & Bartnik, M. (2022). Influence of tire pressure on the vehicle braking distance. *The Archives Of Automotive Engineering/ Archiwum Motoryzacji*, 97(3), 60–73. <https://doi.org/10.14669/am/155136>
- Synák, F. & Kalašová, A. (2020). Assessing the Impact of the Change in the Tire Pressure on the Rolling Resistance and Fuel Consumption. *Advances in Science And Technology – Research Journal*, 14(3), 100–106. <https://doi.org/10.12913/22998624/120801>

U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration & Office of Defects Investigation. (2001). Engineering Analysis Report and Initial Decision Regarding EA00-023: Firestone Wilderness AT Tires. Abgerufen am 25. April 2025, von <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/firestonereport.pdf>

U.S. Department Of Transportation & NHTSA. (2001). TIRE PRESSURE MONITORING SYSTEM FMVSS No. 138. <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/tirepressure-fmvss-138.pdf>

What can cause excessive or uneven tyre wear? | MICHELIN. (o. D.). Abgerufen am 1. Juni 2025, von <https://www.michelin.co.uk/auto/advice/change-tyres/tyre-wear>

Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE). (2010). Regelung Nr. 64 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Ausstattung mit einem Komplettnotrad, Notlaufreifen und/oder einem Notlaufsystem und/oder einem Reifendrucküberwachungssystem. In Regelung Nr. 64 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) (S. 19) [Report]. Abgerufen am 25. April 2025, von [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42010X1126\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42010X1126(01))

Zühlke, A. (2015). *Reifendruckkontrollsysteme* (1. Aufl.) [Vogel Business Media].

Erklärung zur Nutzung generativer KI

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wurde generative KI gezielt als unterstützendes Werkzeug in verschiedenen Phasen des Forschungsprozesses eingesetzt. Die Nutzung erfolgte stets unter kritischer Prüfung der generierten Inhalte und diente der Effizienzsteigerung sowie der Vertiefung des Verständnisses komplexer Sachverhalte.

Der generelle Workflow bei der Texterstellung umfasste typischerweise folgende Schritte: Zunächst lieferte die KI erste Hinweise und Ideen für die Rechercheausrichtung. Nach einer eigenständigen Literatursichtung und der Erstellung von Stichsätzen sowie Notizen erfolgte die Nutzung der KI zur Formulierung kohärenter Texte aus diesen Fragmenten. Eine manuelle Korrektur und Anpassung der generierten Texte war dabei stets der abschließende Schritt.

Darüber hinaus wurde generative KI für die strategische Beratung zur Gesamtgliederung der Arbeit herangezogen. Dies umfasste die Entwicklung einer logischen Struktur, die Gliederung in Unterkapitel und die Sicherstellung einer vollständigen inhaltlichen Abdeckung. Die KI diente auch als Diskussionspartner zur Prüfung der Logik von Argumentationsketten.

Im Speziellen unterstützte die KI bei Kapitel 2.5 "Statistische Auswertungsmethoden", einem fachfremden Gebiet. Hier ermöglichte die KI eine einfachere Einarbeitung, indem sie komplexe und unbekannte Themen in verständliche, kleinere Abschnitte herunterbrach.

Für die Reifendruckmessungen in Kapitel 4 lieferte die KI Empfehlungen für statistische Auswertungsmethoden. Besonders hervorzuheben ist die Nutzung von KI für das sogenannte "Vibecoding" der R-Skripte. Obwohl bereits Programmiererfahrung vorhanden war und die Syntax von R verstanden wurde, waren die Kenntnisse nicht ausreichend, um komplexe Skripte selbstständig zu verfassen. Das Vibecoding ermöglichte eine massive Zeitersparnis bei der Skripterstellung und ein schnelles Debugging. Vibecoding beschreibt in diesem Kontext die Nutzung von KI zur Generierung von Code-Strukturen auf Basis vager Ideen oder Anforderungen, die anschließend manuell verfeinert und angepasst werden.

Im Rahmen von Kapitel 5 "Kundenumfrage" unterstützte die KI bei der Erstellung eines Pools von Fragen, aus dem die passendsten für die Umfrage ausgewählt wurden.

Es ist transparent festzuhalten, dass das Abstract und das Kapitel 1.3 "Aufbau der Arbeit" zu 100% KI-generiert wurden. Alle anderen Inhalte wurden wie beschrieben in Zusammenarbeit mit der KI und umfangreicher manueller Bearbeitung erstellt.



Armin Jaganjac

Hamburg, 30.06.2025