

Neue Ansätze zur Umsetzung und
Durchführung von Kalibrierumfängen bei
der Pkw-Inbetriebnahme

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Martin Jonas

Saarbrücken
2019

Tag des Kolloquiums:	03.06.2020
Dekan:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick
Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Vorsitz:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Paul Motzki

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Daimler AG im Team Absicherungstechnologien am Forschungsstandort Ulm in Kooperation mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH (ZeMA) in Saarbrücken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller für die großartige Betreuung und Unterstützung während der gesamten Promotionszeit. Durch die Diskussionen mit ihm und den vielen fachlichen sowie wissenschaftlichen Anregungen und Hinweisen konnte die Arbeit erfolgreich umgesetzt werden. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber bedanke mich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferats und den finalen Hinweisen auf der Zielgeraden der Dissertation.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Teamleiter Dr. Klaus Jostschulte bedanken der mir den Freiraum ermöglicht hat diese Arbeit anzufertigen und mir mit Rat und Tat bei fachlichen und betrieblichen Belangen immer zur Seite stand und geholfen hat.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Abteilungsleiter Uwe Seng für seine großzügige Unterstützung und den technischen Diskussionen sowie Anregungen sehr bedanken.

Herrn Dr. Hartmut Presting möchte ich einen ganz besonderen Dank aussprechen. Vor allem für die unermüdliche Geduld bei der Beantwortung meiner Fragen und die vielen fachlichen Diskussionen, die wir über die Fahrwerkgeometrievermessung und den Fahrwerkstand geführt haben.

Zu danken habe ich auch den vielen Kollegen bei der Daimler AG im Werk, in der Produktionsplanung und in der Entwicklung, die mich bei der Arbeit unterstützt haben. Vor allem sind das Harald Dorer, Benjamin Winkler und Stefan Hänsch, die immer ein offenes Ohr hatten und mir viel beigebracht haben.

Ein weiterer Dank gebührt den vielen studentischen Mitarbeitern, die maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben und auch in schwierigen Zeiten immer das Beste gegeben haben.

Zum Abschluss möchte ich den größten Dank meinen Eltern aussprechen. Ohne ihren uneingeschränkten Rückhalt und der Unterstützung während meiner akademischen Laufbahn wäre diese Arbeit nie zu Stande gekommen.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern.

Zusammenfassung

In der Produktion aktueller und zukünftiger Fahrzeuggenerationen gewinnen die Prüf- und Inbetriebnahmeumfänge, aufgrund der steigenden Anzahl automatisiert und autonom fahrender Fahrzeuge, zunehmend an Bedeutung. Dies wirkt sich in hohen Prozesszeiten und einer stetig wachsenden strukturellen sowie auch inhaltlichen Parallelität in der Fahrtechnik aus.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit einem neuartigen Ansatz zur Inline Fahrwerkgeometrievermessung, der die Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen in der Montagelinie ermöglicht. Die Werte der Fahrwerkgeometrie bilden die Grundvoraussetzung zur Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen an der Umfeldsensorik eines Fahrzeuges.

Aktuelle Technologien sind ausschließlich in der Lage die Fahrwerkgeometrie in der Montagelinie taktil durch Adaption mit dem Fahrzeug zu vermessen, sodass ein flexibler Einsatz in bestehenden Produktionshallen erschwert wird. Durch eine umfassende Betrachtung am Produkt, Prozess und Betriebsmittel wird ein neues Verfahren entwickelt, welches eine berührungslose Vermessung der Fahrwerkgeometrie in der Montagelinie erlaubt und somit die Möglichkeit schafft Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge in die Montagelinie zu verlagern. Die daraus resultierende Prozesszeitreduktion führt dazu, dass die Fahrwerktechnik entlastet werden kann. Das neue Verfahren bildet somit einen weiteren Baustein für das langfristige Ziel der Einlinigkeit in der Fahrtechnik.

Abstract

In the production of current and future vehicle generations the testing and commissioning scopes have an increasingly important meaning due to the rising amount of automated and autonomous driving cars. This has an effect on high process times and a steadily growing structural as well as substantive parallelism in the end of line area.

Against this background, the present work deals with a new approach for the inline wheel alignment measurement that allows the implementation of calibration and commissioning scopes in the assembly line. The values of the wheel alignment form the basic requirement for carrying out calibration and commissioning scopes on the sensors of a vehicle.

Current technologies are only able to measure the wheel alignment in a tactile way by adapting to the vehicle within the assembly line that makes flexible use in existing production plants more difficult. By a comprehensive consideration of the product, process and equipment a new procedure is developed that allows a contactless measurement of the wheel alignment geometry in the assembly line and thus creates the possibility to shift calibration and commissioning scopes into the assembly line. The resulting reduction in process time means that the end of line area can be relieved. The new method thus forms another component for the long-term goal of the unilinearity in the end of line area.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abbildungsverzeichnis	III
III	Tabellenverzeichnis	VI
IV	Abkürzungsverzeichnis	VII
1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Bedarf für neuartige Inbetriebnahmeverfahren	1
1.2	Zielsetzung	20
1.3	Aufbau der Arbeit	21
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	23
2.1	Begriffe und Definitionen	23
2.2	Grundlagen der Fahrzeuginbetriebnahme	31
2.3	Neuer Ansatz zur Durchführung von Kalibrierumfängen durch die Inline Fahrwerkgeometrievermessung	37
3	Planung und Konzeption der Inline Fahrwerkgeometrievermessung	40
3.1	Produkt	40
3.1.1	Messobjekt	40
3.1.2	Experimentelle Voruntersuchungen	44
3.1.3	Definition von produktspezifischen Einflussfaktoren	48
3.2	Betriebsmittel	49
3.2.1	Technologierecherche	49
3.2.2	Konstruktion und Automatisierungstechnik	56
3.2.3	Definition von betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren	67
3.2.4	Kalibrierkonzept	68
3.3	Prozess	69
3.3.1	Niveau- und Gewichtsprädiktionsalgorithmus	70
3.3.2	Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse	74
3.3.3	Prozessbeschreibung für den Montagefließ- und Montagetakttbetrieb ..	79
4	Entwurf und Ausarbeitung der Inline Fahrwerkgeometrievermessung	82
4.1	Betriebsmittelinbetriebnahme und Anlagendigitalisierung	82
4.2	Modellprädiktive Regelung des Betriebsmittels	84

4.3	Modell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrie- vermessung	87
4.4	Messobjektdetektion und Automatisierung des Messverfahrens	103
5	Versuchsaufbau und Messplan	107
5.1	Design of Experiments für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung	107
5.1.1	Vollfaktorieller Versuchsplan Produkt	107
5.1.2	Vollfaktorieller Versuchsplan Betriebsmittel	110
5.2	Umsetzung der produkt- und betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren.	111
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und Validierung	118
6.1	Ergebnisse der Produktuntersuchungen	118
6.2	Ergebnisse der Betriebsmitteluntersuchungen	123
6.3	Validierung im Betriebsversuch Werk Sindelfingen	127
7	Zusammenfassung und Ausblick	135
7.1	Zusammenfassung	135
7.2	Ausblick	138
8	Literaturverzeichnis	141
V	Im Rahmen der Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten	150
VI	Anhang	151

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Weltweite Produktions- und Verkaufszahlen von Fahrzeugen.....	2
Abbildung 2 Produktion von Kraftfahrzeugen auf der Welt.....	3
Abbildung 3 Kostenverursachung und -verantwortung.....	3
Abbildung 4 Produktionsbereiche in der Automobilherstellung.....	5
Abbildung 5 Fahrzeugendmontage.....	6
Abbildung 6 Stationen der Fahrzeuginbetriebnahme in der Fahrtechnik.....	8
Abbildung 7 Ablauf der Fahrzeuginbetriebnahme in der Fahrtechnik.....	10
Abbildung 8 Systemkomplexität in der Kraftfahrzeugelektronik.....	11
Abbildung 9 Gruppenaufteilung verschiedener Fahrerassistenzsysteme.....	12
Abbildung 10 Radarsensor in der Automobilindustrie.....	13
Abbildung 11 Fehlkalibrierung eines Radarsensors.....	13
Abbildung 12 LIDAR Sensor.....	14
Abbildung 13 Stereokamera.....	14
Abbildung 14 Steigende Anzahl an Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen.....	16
Abbildung 15 Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aufgeteilt in Verbunde.....	17
Abbildung 16 Nabengreifer.....	18
Abbildung 17 Dehnungsgreifer.....	19
Abbildung 18 Fahrzeugkoordinatensystem.....	23
Abbildung 19 Sicht auf das Fahrzeugkoordinatensystem von unten.....	24
Abbildung 20 Fahrzeugniveau.....	25
Abbildung 21 Fahrwerksymmetrieachse.....	26
Abbildung 22 Hinterachssymmetrieachse.....	27
Abbildung 23 Sturzwinkel.....	27
Abbildung 24 Sturzwinkel im Ebenenschnitt.....	28
Abbildung 25 Spurwinkel.....	29
Abbildung 26 Spurwinkel im Ebenenschnitt.....	30
Abbildung 27 geometrische Fahrachse.....	31
Abbildung 28 Fahrwerkstand.....	31
Abbildung 29 mechanische Lenkradwaage.....	33
Abbildung 30 Fahrzeug auf dem Fahrwerkstand zentriert und vermessen.....	34
Abbildung 31 Fahrwerkeinstellung an Hinter- und Vorderachse.....	34
Abbildung 32 Scheinwerfereinstellung mit einem Lichtsammelkasten.....	35
Abbildung 33 Radar-, Stereokamera- und Nachtsichtkamerakalibrierung.....	36
Abbildung 34 Kalibriermuster für die Kamerakalibrierung.....	36
Abbildung 35 Voraussetzungen der Fahrwerkvermessung und Lösungsansätze....	39
Abbildung 36 Bauteile zur Umsetzung einer Fahrwerkvermessung.....	41
Abbildung 37 Raddrehebene und Taumelwinkel.....	42
Abbildung 38 Planlauf von Fahrzeugen auf dem Fahrwerkstand.....	42
Abbildung 39 Faro Laser Tracker mit einer Hinterachse auf einem Gestell.....	45
Abbildung 40 Spurmessung hinten rechts mit dem Hilfsmesssystem.....	46

Abbildung 41 Planlauf am Radflansch gemessen auf der Achseinstellanlage.....	47
Abbildung 42 Messprinzip eines Lasertriangulationssensor	50
Abbildung 43 Messprinzip eines Laserlinienscanners	51
Abbildung 44 Messprinzip eines Autokollimators.....	52
Abbildung 45 Aufbau eines Kamerasystems	53
Abbildung 46 Messprinzip eines chromatisch-konfokalen Sensors	54
Abbildung 47 Messprinzip eines kapazitiven Wegsensors	55
Abbildung 48 Messprinzip eines Magneto-induktiven Wegsensors	55
Abbildung 49 Betriebsmittelkonstruktion.....	57
Abbildung 50 Aufhängung des Lasertriangulationssensors	58
Abbildung 51 Z-Achse des Betriebsmittels	59
Abbildung 52 Linearführung.....	60
Abbildung 53 Querschnitt der Z-Achse.....	61
Abbildung 54 X-Achse des Betriebsmittels	62
Abbildung 55 Anschlusskonstruktion	63
Abbildung 56 Unterbau	64
Abbildung 57 Betriebsmittel in unterschiedlichen Ansichten.....	64
Abbildung 58 Topologie der Automatisierungstechnik	65
Abbildung 59 Schaltschrank	66
Abbildung 60 Kalibrierung der Betriebsmittel.....	68
Abbildung 61 Kalibrierung des Laseraustrittswinkels.....	69
Abbildung 62 Verfahren für den Gewichtsprädiktionsalgorithmus	71
Abbildung 63 Differenzen zwischen simuliertem und realem Gewicht.....	71
Abbildung 64 Verfahren zur Berechnung der elastokinematischen Korrekturwerte..	72
Abbildung 65 Ermittlung elastokinematischer Spur- und Sturzänderungskurven	72
Abbildung 66 elastokinematisches Spuränderungsverhalten	73
Abbildung 67 elastokinematisches Sturzänderungsverhalten.....	74
Abbildung 68 Radflansch.....	75
Abbildung 69 Elastokinematik durch Gummilagerung in der Radaufhängung	76
Abbildung 70 Lasertriangulationssensor.....	77
Abbildung 71 Querschnitt einer Linearführung	78
Abbildung 72 Prozessdarstellung	80
Abbildung 73 neues Taktzeitdiagramm für den Fahrwerkstand.....	81
Abbildung 74 Handbetrieb	82
Abbildung 75 Automatikbetrieb.....	83
Abbildung 76 Darstellung der Messergebnisse auf einem Webserver	84
Abbildung 77 Funktionsweise des modellprädiktiven Reglers	85
Abbildung 78 Zeitverlauf einer Bewegung auf der X-Achse.....	86
Abbildung 79 Zeitverlauf einer Bewegung auf der Z-Achse nach unten	86
Abbildung 80 Zeitverlauf einer Bewegung auf der Z-Achse nach oben	87
Abbildung 81 Fahrzeugneigung ergibt unterschiedliche Fahrwerkswinkel	88
Abbildung 82 Ebenendarstellung der Winkelfehlstellung.....	89

Abbildung 83 Vektordarstellung der Fahrwerkgeometrie	90
Abbildung 84 Ebenendarstellung der Rad- und Achsmittelpunkte	91
Abbildung 85 Orthonormalbasis für die Fahrwerkgeometrievermessung	93
Abbildung 86 Orthonormalbasis des Laserverfahrweges	93
Abbildung 87 Seitenansicht mit dem Ebenenschnitt des Laserverfahrweges	94
Abbildung 88 Ebenenschnitt für die Koordinatenberechnung	95
Abbildung 89 Koordinatenberechnung der Messpunkte am Zentrierabsatz	96
Abbildung 90 Ebenen für die Berechnung des Spurwinkels	100
Abbildung 91 Ebenen für die Berechnung des Sturzwinkels	102
Abbildung 92 Messaufgaben bei der Inline Fahrwerkgeometrievermessung	103
Abbildung 93 Abmessungen und Messzone des Zentrierabsatzes	103
Abbildung 94 Konstruktion des vorläufigen Radmittelpunktes	104
Abbildung 95 Messung und Konstruktion des exakten Radmittelpunktes.....	105
Abbildung 96 Messlinien auf dem Zentrierabsatz	105
Abbildung 97 Versuchsachse auf einem Gestell	112
Abbildung 98 Fahrwerkvermessung mit Federkraft	112
Abbildung 99 Eingestellte Einfederung der Versuchsachse	113
Abbildung 100 Hebebühne zur Einstellung der Ausfederung unter Federkraft.....	114
Abbildung 101 Winkelscheibe zur Positionsbestimmung des Messobjekts	115
Abbildung 102 Metallscheibe zur Umsetzung der glatten Messoberfläche	116
Abbildung 103 Versuchsaufbau für den Versuchsplan des Betriebsmittels	117
Abbildung 104 Versuchsdurchführung DOE ohne Federkraft.....	118
Abbildung 105 Versuchsdurchführung DOE mit Federkraft	120
Abbildung 106 Ergebnisse des DOE Betriebsmittel für den Messbereichsanfang..	124
Abbildung 107 Ergebnisse des DOE Betriebsmittel für das Messbereichsende.....	124
Abbildung 108 Versuchsdurchführung bei einer Fahrzeugschiefelage	125
Abbildung 109 Ebenbetrachtung bei einer Fahrzeugschiefelage.....	126
Abbildung 110 Messergebnisse unterschiedlicher Fahrwerkanlagen	128
Abbildung 111 Standort und Fördertechnik für den Betriebsversuch.....	129
Abbildung 112 Aufbau der Betriebsmittel für den Betriebsversuch.....	130
Abbildung 113 Messvergleich zwischen Fahrwerkstand und Betriebsmittel	131
Abbildung 114 Messvergleich mit Korrekturwert hinten rechts	132
Abbildung 115 Histogramm der Spurwinkeldifferenz hinten links	133
Abbildung 116 Histogramm der korrigierten Spurwinkeldifferenz hinten rechts.....	134

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Toleranzen am Bremsring.....	43
Tabelle 2 Toleranzen am Bremsstopf.....	43
Tabelle 3 Toleranzen am Radflansch	44
Tabelle 4 Taumelwinkel an verschiedenen Bauteilen.....	44
Tabelle 5 produktspezifische Einflussfaktoren.....	48
Tabelle 6 betriebsmittelspezifische Einflussfaktoren	67
Tabelle 7 Zusammenfassung und Summe der Einzeltoleranzen.....	79
Tabelle 8 vollfaktorieller Versuchsplan für das Produkt	108
Tabelle 9 vollfaktorieller Versuchsplan für das Betriebsmittel.....	110
Tabelle 10 Ergebnisse für das DOE Produkt ohne Federkraft.....	119
Tabelle 11 Ergebnisse für das DOE Produkt mit Federkraft.....	121
Tabelle 12 Ergebnisse bei Einfluss der Elastokinematik auf das Fahrwerk.....	122
Tabelle 13 Messergebnisse der Fahrwerkswinkel bei einer Fahrzeugschiefelage	126
Tabelle 14 Parameter des vollfaktoriellen Versuchsplans für das Produkt	151
Tabelle 15 Parameter des vollfaktoriellen Versuchsplans für das Betriebsmittel....	152

IV Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
ABS	Antiblockiersystem
AM	Amplitudenmodulation
AMG	Aufrecht Melcher Großaspach
ASR	Antriebsschlupfregelung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CW	Strömungswiderstandskoeffizient
DAB	Digital Audio Broadcasting
DOE	Design of Experiments
DP	Dezentrale Peripherie
DTV	Disc Thickness Variation
ECE	Economic Comission for Europe
EG	Europäische Gemeinschaft
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FM	Frequenzmodulation
GSM	Global System for Mobile Communications
HA	Hinterachse
HL	Hinten Links
HM	Hinterachse Mitte
HMI	Human Machine Interface
HR	Hinten Rechts
HTML	Hypertext Markup Language
IRT	Isochronous Real Time
K0	Konstruktionsnulllage
Konv.	Konventionell
KSYS	Koordinatensystem

LAP	Laser Applikationen
LED	Light Emitting Diode
Lidar	Light detection and ranging
OICA	Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles
P	Messpunkt
PKW	Personenkraftwagen
Radar	Radio detection and ranging
RF	Radflanschpunkt
RM	Radmittelpunkt
R_p	Mittlere Glättungstiefe
SA	Sonderausstattung
SMPC	Stereo Multi Purpose Camera
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SVS	Surroundviewsystem
USA	United States of America
VA	Vorderachse
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VL	Vorne Links
VM	Vorderachse Mitte
VR	Vorne Rechts
W-Lan	Wireless Local Area Network
WSA	Werkschlussabnahme

1 Einleitung

Die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen bei der Fahrzeuginbetriebnahme in der Automobilindustrie werden in diesem Kapitel adressiert. Durch die Zunahme von Fahrerassistenzsystemen steigen die Anforderungen an die Betriebsmittel und Prozesse. Daraus ergibt sich ein Bedarf an neuartigen Inbetriebnahmeverfahren. Durch eine Vorverlagerung von Inbetriebnahmeumfängen in die Montagelinie besteht die Möglichkeit diesen Bedarf abzudecken. Hierzu ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Produkts, des Prozesses sowie des Betriebsmittels notwendig. Aus diesem Grund kann die zentrale Forschungsfrage abgeleitet und gestellt werden. Auf Basis der Herausforderungen und der Forschungsfrage werden Lösungsansätze und Ziele für diese Arbeit formuliert.

1.1 Ausgangssituation und Bedarf für neuartige Inbetriebnahmeverfahren

Das Automobil steht seit jeher für wirtschaftliches Wachstum. Es bietet den Menschen auf der ganzen Welt eine Technologie, die ihr Tun und Handeln in vielen Situationen beeinflusst. Ein erheblicher Anteil der getätigten Autofahrten erfüllt dabei einen wirtschaftlichen Nutzen oder steigert die persönliche Lebensqualität. [Oic18] An der Anzahl der produzierten und verkauften Kraftfahrzeuge ist deutlich zu erkennen, dass die Automobilindustrie eine bedeutende Rolle in der Weltwirtschaft einnimmt. Die Anzahl der verkauften Fahrzeuge stieg bis zum Jahr 2007 stetig an. Mit dem Beginn der Weltwirtschaftskrise war ein deutlicher Rückgang im Automobilsektor zu verzeichnen, der jedoch ab 2009 wieder in einen Aufschwung überging, sodass die Anzahl an verkauften Kraftfahrzeugen erneut gesteigert werden konnte. Die Automobilbranche ist seitdem von einem starken Wachstum geprägt, wobei jedes Jahr das vorangegangene Jahr mit einem neuen Rekord in der Anzahl an produzierten und verkauften Fahrzeugen übertraf. Für das Jahr 2018 ist ebenfalls ein Wachstum der Verkaufszahlen prognostiziert [Mül15-2]. Eine hohe Nachfrage nach Kraftfahrzeugen führt daher auch zwangsläufig zu steigenden Produktionskapazitäten. Abbildung 1 zeigt die weltweiten Produktions- und Verkaufszahlen von Kraftfahrzeugen unter Ausschluss von Militär- und Behördenfahrzeugen.

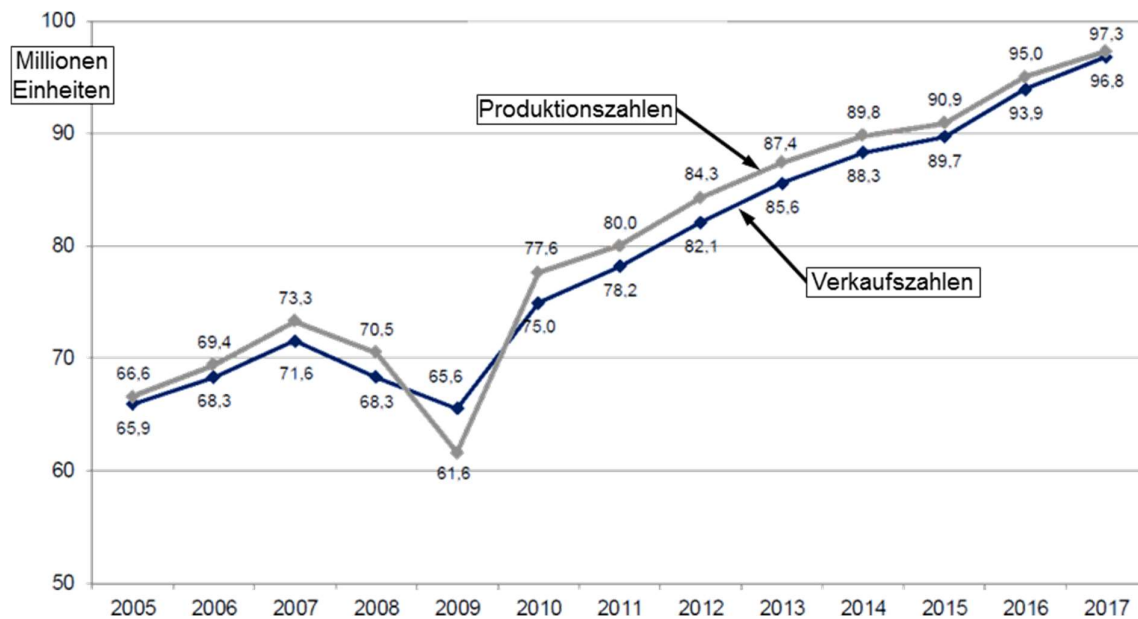


Abbildung 1 Weltweite Produktions- und Verkaufszahlen von Fahrzeugen [vgl. Wis18]

Die dargestellte Bedeutung der Automobilindustrie in der Weltwirtschaft zeigt sich auch in der Anzahl der Beschäftigten. Für die Herstellung von 60 Millionen Fahrzeugen werden rund 9 Millionen Menschen benötigt. Dies entspricht mehr als 5% der weltweiten Beschäftigung im Industriesektor. Durch jeden direkt in der Automobilindustrie beschäftigten Arbeitnehmer entstehen wiederum mindestens fünf weitere Arbeitsplätze in den indirekten Bereichen. [Oic18] Um die stetig wachsenden Verkaufszahlen und die damit geforderten Produktionskapazitäten bedienen zu können, betreiben die Automobilhersteller eine Vielzahl von Produktionswerken auf der ganzen Welt. Ein Großteil der Produktionsstandorte ist in Europa, Nordamerika und Asien angesiedelt. Abbildung 2 zeigt die weltweite Produktion von Kraftfahrzeugen nach Standorten im Zeitraum von 2000 bis 2017.



Abbildung 2 Produktion von Kraftfahrzeugen auf der Welt [vgl. Mü15-2]

In der Automobilindustrie sind die meisten Beschäftigten in den Montagebereichen vorzufinden. Die Montage eines Produkts beschreibt den Zusammenbau von Bauteilen sowie Baugruppen unter Einbeziehung aller erforderlichen Hilfsarbeiten nach der abgeschlossenen Teilefertigung [Sto95]. Der verbleibende Anteil ist in der Entwicklung und der Planung sowie in der Fertigung beschäftigt. Innerhalb eines Unternehmens im Industriesektor verursachen und verantworten die einzelnen Unternehmensbereiche unterschiedliche Kosten bei der Herstellung eines Produkts. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Kostenverursachung und -verantwortung beispielhaft an Produkten aus dem Automobilsektor und dem allgemeinen Maschinenbau innerhalb der einzelnen Unternehmensbereiche. Die angegebenen Werte beziehen sich dabei auf ein gesamtes Geschäftsjahr eines Herstellers in der Automobilbranche und sind in Milliarden € ausgewiesen.

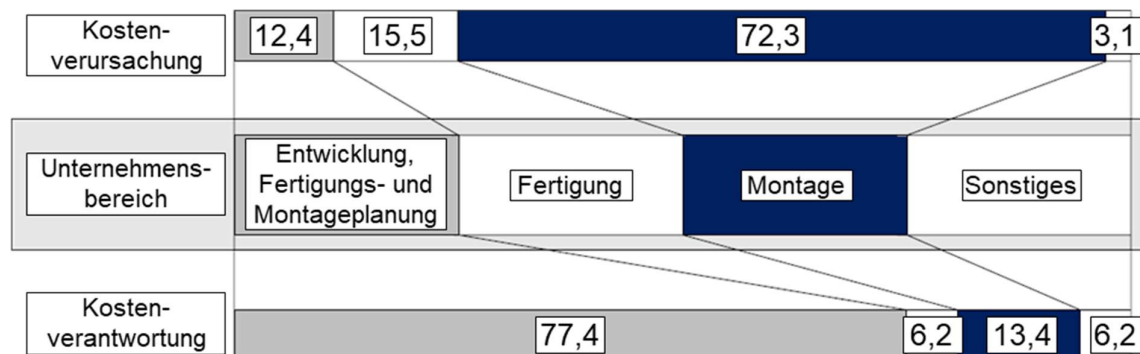


Abbildung 3 Kostenverursachung und -verantwortung [vgl. Pon08, Dai19]

Der höchste Anteil an der Kostenverantwortung liegt bei der Entwicklung sowie der Fertigungs- und Montageplanung. Innerhalb der Montage werden nur 13% der Gesamtkosten eines Produkts verantwortet [Pon08]. Durch eine produktions- und montagegerechte Produktgestaltung kann der Montagebereich seinen Einfluss an der Kostenverantwortung steigern und gleichzeitig den Anteil an der Kostenverursachung senken. Dem gegenüber steht der Anteil der Montage an den verursachten Kosten des Produkts von 70% [Pon08]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Montage, im Vergleich zu den anderen Unternehmensbereichen, die meisten Menschen beschäftigt und einen Großteil der Gesamtfertigungszeit beansprucht. Viele Produktionsstandorte der Automobilhersteller liegen in den Industrieländern und sind, im Vergleich zum Rest der Welt, durch hohe Lohnkosten gekennzeichnet. Die hohen Lohnkosten wirken sich jedoch verhältnismäßig unterschiedlich innerhalb der Unternehmensbereiche aus. Primär entstehen die hohen Lohnkosten in den Montagebereichen, aufgrund der vielen beschäftigten Mitarbeiter. Zur Senkung der verursachten Kosten verlagern Hersteller ihre Entwicklungs- und Fertigungsaktivitäten auf die Zuliefererindustrie. Die Verlagerung der Montage hat bislang nur im geringen Maße stattgefunden, sodass der Anteil der Montage im Produktionswerk weiterhin bei fast 100%, trotz einem prognostizierten Rückgang des Montageanteils, liegt [Mül15-2]. Diese Entwicklung zeigt auf, dass in den Montagebereichen im Industriesektor auch in Zukunft weiterhin mit einem hohen Kostendruck zu rechnen ist.

Die Anzahl der erwerbstätigen Menschen in der Automobilindustrie in den Industrieländern, vor allem in den Montagebereichen, ist enorm. Jedoch sind die Lohnkosten in diesen Ländern ebenfalls hoch. Um die Attraktivität und die Wettbewerbsfähigkeit der Hochlohnländer im weltweiten Vergleich zu gewährleisten, sind eine kontinuierliche Optimierung sowie die Umsetzung von Innovationen innerhalb des Industriesektors notwendig. Potentiale zur Senkung von Produktions- und Montagekosten müssen daher identifiziert und realisiert werden. Nicht zuletzt sichern die Innovationen und Optimierungen in den Montagebereichen das hohe Lohnniveau sowie die Arbeitsplätze der Beschäftigten in den Industrieländern.

Die Produktion von Fahrzeugen in einem Automobilherstellerwerk wird in vier Abschnitte gegliedert. Diese sind das Presswerk, der Fahrzeugrohbau, die Lackiererei und die Endmontage. Alle produzierten Fahrzeuge durchlaufen die einzelnen Abschnitte, angefangen beim Presswerk bis hin zur Endmontage, in Reihe. Abbildung 4 zeigt die einzelnen Produktionsbereiche als Prozessschritte.

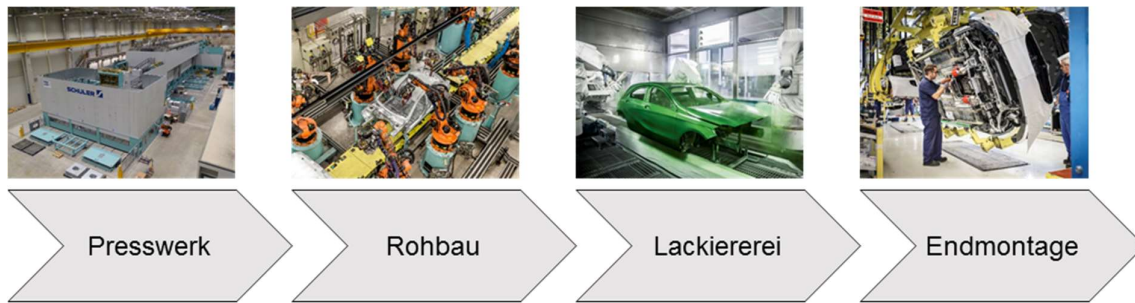


Abbildung 4 Produktionsbereiche in der Automobilherstellung [vgl. Mül15-2, Dai14, Dai16, Dai18-2, Dai18-3]

Im Presswerk werden aus Metallblechen die Karosserieteile hergestellt. Dies geschieht in Pressen, die die Teile unter Druck in Form bringen. Die Metallbleche werden in aufgerollter Form (Coil) angeliefert und in Schneidanlagen zugeschnitten sowie anschließend in eine oder mehrere Pressen gefördert. Der Transport und das Umsetzen der Blechteile erfolgt zumeist über Roboter. Die Karosserieteile werden anschließend in den Fahrzeugrohbau überführt und dort zu einer Rohkarosserie gefügt. Der Fahrzeugrohbau ist ein hochautomatisierter Bereich mit Robotern, die mit Schweiß-, Klebe-, Niet- und Schraubwerkzeugen die Karosserieteile zusammenfügen. In der Lackiererei werden die Rohkarossen mit Korrosionsschutz- und Lackschichten behandelt. Dabei erfolgt zunächst eine Vorbehandlung bei der die Rohkarosserie innen und außen gereinigt wird. Die Vorbehandlung ist notwendig, um die nachfolgenden Prozesse vor Verunreinigungen wie Schmutz, Öl und Fett zu schützen. Nach der Reinigung wird die Rohkarosserie mit der kathodischen Tauchlackierung in mehreren Tauchbädern behandelt. In den Tauchbädern ist die Rohkarosserie negativ gepolt, sodass die Lackschichten an der Karosserie haften. Im Anschluss erfolgen eine Trocknung des Tauchlackes sowie die Nahtabdichtung und der Unterbodenschutz. Zum Ausgleich von Oberflächenfehlern nach der kathodischen Tauchlackierung wird eine Füllerlackierung aufgetragen, getrocknet und wieder abgeschliffen. Nach diesem Prozessschritt erfolgt das Aufbringen der Basislackschicht, welche zugleich die Farbe der Rohkarosserie bestimmt. Auf die Basislackschicht wird zusätzlich eine Klarlackschicht aufgetragen, um den Schutz vor äußeren Umwelteinwirkungen zu gewährleisten. Die Rohkarosserien werden abschließend über eine Fördertechnik in ein Karosserielager gefördert, welches als Puffer zum Ausgleich von Produktionsstörungen dient. [Mül15-2]

Bis zu diesem Zeitpunkt findet die Herstellung von Fahrzeugen in der Variantenfertigung statt. Dies bedeutet, dass die Sonderausstattungen der Fahrzeuge noch jederzeit geändert werden können. Dies gilt allerdings nur für Sonderausstattungen, die nicht die Rohkarosserie oder die Farbe des Fahrzeugs betreffen. Der Entfall eines vorgesehenen Schiebedaches ist beispielsweise nicht mehr möglich. Sobald das Fahrzeug in die Endmontage eintrifft wird von einer

Variantenfertigung zu einer Auftragsfertigung gewechselt. Ab diesem Zeitpunkt sind keine Änderungen am Fahrzeug mehr möglich.

Der Endmontagebereich in der Automobilproduktion wird durch einen Vormontagebereich ergänzt. Damit die Endmontage durch eine zu hohe Anzahl an zu montierenden Bauteilen nicht überlastet wird, werden einzelne Bauteile zu Modulen in der Vormontage vormontiert. Einige Vormontageumfänge, wie beispielsweise die Sitzmontage, sind auch außerhalb des Produktionswerkes angesiedelt und werden teilweise auch von Zulieferern vormontiert und anschließend an das Endmontageband geliefert. Zu den Vormontagemodulen gehören beispielsweise das Cockpit, die Mittelkonsole oder die Vorderachshälften. Durch den Vormontagebereich ergeben sich Vorteile, wie beispielsweise ein geringerer Logistik- und Planungsaufwand sowie ein stabilerer Endmontageprozess. Die Endmontage dient dazu, die Fahrzeuge final zu montieren und in Betrieb zu nehmen. Im Vergleich zu den Produktionsbereichen zuvor, ist der Grad der Automatisierung in der Endmontage geringer und der Einsatz von Werkern größer. Die Endmontage gliedert sich in die drei Montageabschnitte Inneneinbau (Trim), Fahrwerkband (Chassis) und Inbetriebnahmeband (Final). Abbildung 5 zeigt den beispielhaften Aufbau einer Fahrzeugendmontage mit den drei Bereichen.

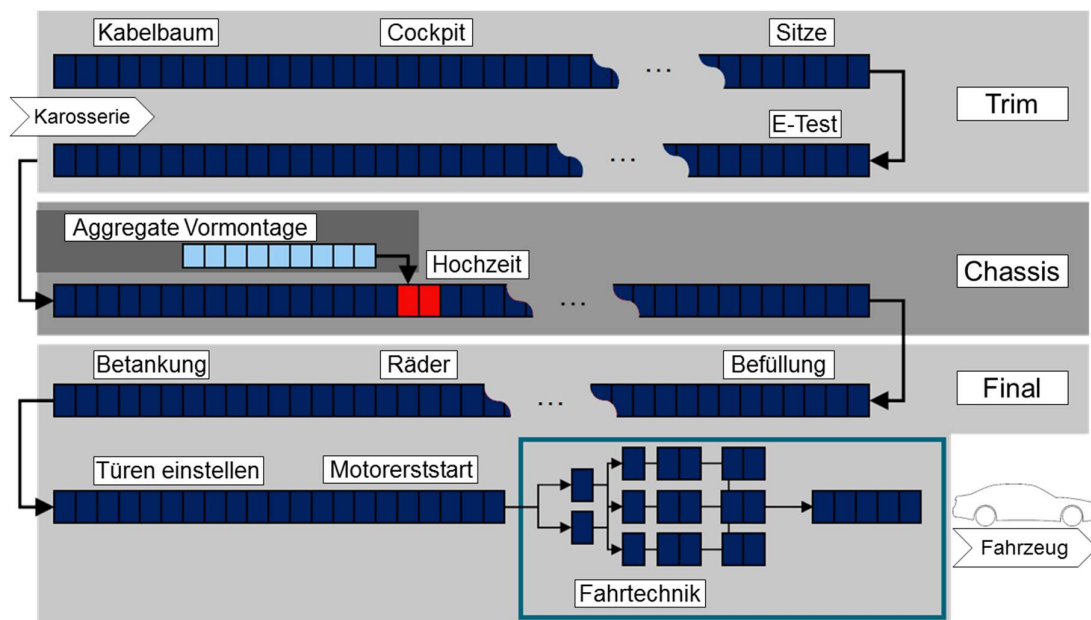


Abbildung 5 Fahrzeugendmontage [vgl. Mül15-2]

Im Bereich der Endmontage werden die vormontierten Bauteile und weitere Komponenten in die Karosserie eingebaut. Dabei zieht sich das Montageband oftmals mäanderförmig durch die Produktionshalle. Die einzubauenden Komponenten werden über Fahrstraßen zwischen den Montagebändern angeliefert. Im Bereich Inneneinbau

(Trim) werden zunächst die Türen abgebaut. Dies erleichtert die Montage von großen Bauteilen und verbessert die Ergonomie des Werkers. Es erfolgt der Einbau des Kabelbaums sowie des Cockpits. Die dazugehörige elektrische Kontaktierung von Steckverbindungen wird ebenfalls durchgeführt und an ausgewählten Bereichen auf Korrektheit überprüft. Eine falsch kontaktierte Verbindung kann so frühzeitig erkannt und behoben werden. Je später eine fehlerhafte Kontaktierung gefunden wird, desto höher ist der Nacharbeitsaufwand, da möglicherweise viele Bauteile aus dem Fahrzeug wieder entfernt werden müssen, um an die Steckverbindung zu gelangen. Im Fahrwerkbereich (Chassis) erfolgt der Einbau der Aggregate. In der Aggregatevormontage werden der Motor, das Getriebe und das vormontierte Fahrwerk auf einem Mechanisierungsrahmen aufgelegt. Der aufgerüstete Mechanisierungsrahmen wird mit der Karosserie verbunden. Dieser Prozess wird Hochzeit genannt. Bei Hybridfahrzeugen wird außerdem in der Hochzeit die Hybridbatterie eingebaut. Im Anschluss an die Hochzeit werden im Fahrwerkband weitere Komponenten, wie beispielsweise das Lenkrad und die Türen, montiert. Die Taktzeiten in der Endmontage liegen üblicherweise zwischen 60 und 120 Sekunden. Das Inbetriebnahmeband ist dadurch gekennzeichnet, dass das Fahrzeug in Betrieb genommen wird und keine weiteren signifikanten Montageumfänge mehr stattfinden. Hierzu wird das Fahrzeug zunächst mit Betriebsmedien, wie beispielsweise der Bremsflüssigkeit, befüllt und mit Kraftstoff betankt. Außerdem werden die Räder montiert und mit Hilfe einer Spaltmessanlage die Türen eingestellt. Nachdem der Motorerstart erfolgt ist, wird das Fahrzeug durch die einzelnen Stationen in der Fahrtechnik (End of Line) gefördert. In der Fahrtechnik finden weitere Prüf- und Inbetriebnahmeumfänge statt. Die Fahrzeuginbetriebnahme beschreibt alle Tätigkeiten, die notwendig sind, um die zusammgebauten Teilsysteme und Produkte in einen betriebsbereiten Zustand zu versetzen. Dabei werden beispielsweise Steuergeräte parametrieren, indem Vorgabewerte zum Betriebs- und Umgebungsverhalten gesendet und gespeichert werden. Da der Fahrzeugproduktionsprozess toleranzbehaftet ist, finden auch Justiertätigkeiten in der Fahrtechnik statt. Aufgrund der Produktionstoleranzen sind einige Funktionen des Fahrzeugs, wie beispielsweise die Scheinwerferausleuchtung, mit Abweichungen zum Zielwert behaftet. Durch das Justieren der Scheinwerfer werden die vorgegebenen Ziele und Grenzwerte erreicht, sodass die Funktion mit der geforderten Genauigkeit ausgeführt werden kann. Den Abschluss der Endmontage bilden diverse Funktionsprüfungen am fertigen Produkt. Diese sichern die Erfüllung der grundlegenden Funktionen des Produkts ab. Im Bereich der Fahrtechnik ist die Regenprobe, bei der die Dichtheit des Fahrzeugs überprüft wird, Teil einer Funktionsprüfung. Die Fahrtechnik ist im Gegensatz zum Rest der Endmontage nicht mehr einlinig ausgeführt, da die Taktzeiten auf den einzelnen Stationen höher sind und die durchgeführten Inbetriebnahmeumfänge mehr Zeit benötigen. [Mül15-2]

Zur Sicherstellung der vollen Funktionsfähigkeit eines Fahrzeugs werden die verbauten Systeme und Komponenten in Betrieb genommen. Dabei finden einige Inbetriebnahmeprozesse bereits in der Endmontage statt. Der Großteil der Kalibrier-

und Inbetriebnahmeumfänge werden in der Fahrtechnik realisiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Endmontage der Aufbauzustand des Fahrzeugs viele Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge noch nicht zulässt. Einige Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge können außerdem nur an einem fahrfertigen Fahrzeug durchgeführt werden. Abbildung 6 zeigt die einzelnen Prüfstationen für ein Fahrzeug in der Fahrtechnik.

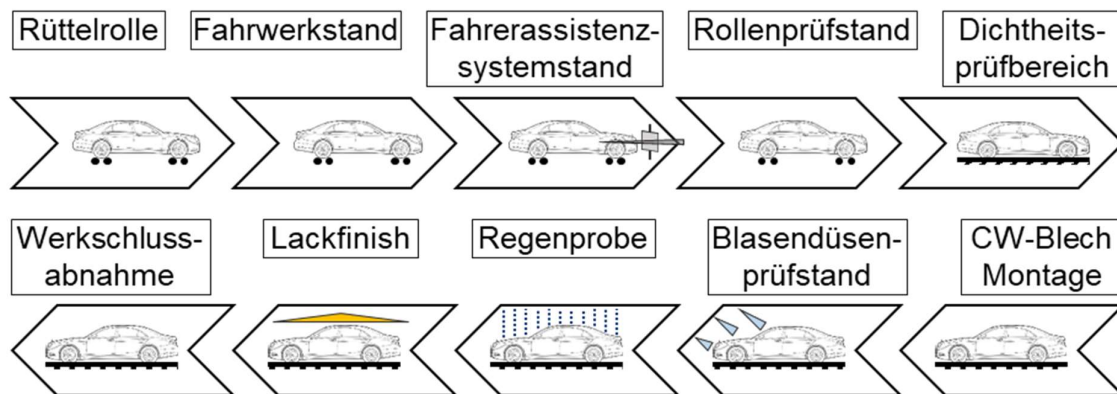


Abbildung 6 Stationen der Fahrzeuginbetriebnahme in der Fahrtechnik

Am Beginn des Fahrtechnikbereichs erfolgt der Motorerststart des Fahrzeugs. Das Fahrzeug wird anschließend auf die Rüttelrolle gefahren, um es auf Klappergeräusche und lose Bauteile zu prüfen. Hierzu sind Unebenheiten auf den Rollen angebracht, wodurch Schwingungen in das Fahrzeug beim abrollen eingeleitet werden. Auf den Rollen selbst können mehrere Fahrspuren mit unterschiedlich hohen Unebenheiten aufgebracht sein, sodass auch verschiedene Schwingungen erzeugt werden. Nach der Rüttelrolle folgt der Fahrwerkstand. Kernaufgabe des Fahrwerkstandes ist es das Fahrwerk einzustellen, um den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit zu gewährleisten. Ein korrekt eingestelltes Fahrwerk garantiert einen sauberen Geradeauslauf bei nicht eingeschlagenem Lenkrad und reduziert den Verschleiß der Reifen. Dies wirkt sich wiederum positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die CO₂ Emissionen aus. Neben der Fahrwerkeinstellung werden häufig auch die Scheinwerfer justiert und die Umfeldsensorik der Fahrerassistenzsysteme kalibriert. Hierzu wird das Fahrzeug im Fahrwerkstand positioniert und die Fahrachse vermessen, sodass eine anschließende Justage und Kalibrierung durchgeführt werden kann. Findet die Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme nicht auf dem Fahrwerkstand statt, so ist in der Regel ein nachgelagerter Fahrerassistenzsystemstand installiert. Dieser Prüfstand gewinnt zunehmend an Bedeutung, da die Anzahl der Fahrerassistenzsysteme zukünftig weiter steigen wird. Die Kalibrierung der Umfeldsensorik auf die Fahrachse des Fahrzeugs ist aufgrund der toleranzbehafteten Sensorausrichtung im Fahrzeug notwendig. Die Fehlstellung eines Sensors resultiert aus der Ausrichtung des Sensors zum

Sensorträger oder aus dem Ausrichtungsfehler der äußeren Anbauteile, wie beispielsweise dem Frontmodul. Weiter können sensorinterne Ausrichtungsfehler, die durch produktionsbedingte Abweichungen bei der Sensorherstellung verursacht werden, eine Kalibrierung notwendig machen. Ab diesem Zeitpunkt ist das Fahrzeug zum großen Teil elektrisch und elektronisch in Betrieb genommen. Es folgt der Rollenprüfstand auf dem Komponenten des Antriebssystems in Betrieb genommen werden. Im Bremstest werden die Bremsen des Fahrzeugs eingebremst und die Bremskraft überprüft. Hierbei wird auch ein Vertauschungstest durchgeführt, um die korrekte Montage der Bremsleitungen sicher zu stellen. Der Vertauschungstest wird durch das einzelne Anbremsen aller Räder auf dem Rollenprüfstand realisiert. Im Bereich der Antriebseinheit werden eine Automatikgetriebe- sowie eine Motoradaption durchgeführt. Bei der Motoradaption werden beispielsweise die Funktion der Lambdasonden und der Ladedruck der Turbolader überprüft sowie ein Injektormengenabgleich des Motorkennfelds durchgeführt. Zur Durchführung der Funktionsprüfungen und Inbetriebnahmen auf dem Rollenprüfstand werden vorgegebene Fahrkurven abgefahren. Dies wird manuell durch einen Werker oder automatisiert durch ein Diagnosesystem durchgeführt. Im darauffolgenden Dichtheitsprüfbereich wird die Dichtheit von Nebenaggregaten, wie beispielsweise der Klimaanlage, geprüft oder die Gemischadaption durchgeführt. Der Dichtheitsprüfbereich wird auch Motorcheck genannt. Nach dem Dichtheitsprüfbereich finden die letzten Montagevorgänge am Fahrzeug statt. Es wird die Unterbodenverkleidung montiert. Die Unterbodenverkleidung wird nicht in der Hauptmontagelinie verbaut, da ansonsten der Zugang zu den Bauteilen für die Fahrwerkeinstellung versperrt wäre. Im Blasendüsenprüfstand erfolgt die Überprüfung des Fahrzeugs auf Windgeräusche. Hierfür befindet sich das Fahrzeug in einer Kabine, um störende Geräusche aus der Umgebung abzuschotten. In der Kabine des Blasendüsenprüfstandes ist ein Gebläse aufgebaut, welches das Fahrzeug von vorne und seitlich mit Luft anbläst. Ein Werker bewertet die auftretenden Geräusche im Innenraum des zu prüfenden Fahrzeugs. Ein Blasendüsenprüfstand bietet im Vergleich zu einer Realfahrt den Vorteil der witterungs- und verkehrsabhängigen Möglichkeit zur Detektion von Windgeräuschen. Die nachgelagerte Regenprobe dient zur Überprüfung des Fahrzeugs auf Dichtheit gegenüber dem Eintreten von Wasser. Bei der Regenprobe befindet sich das Fahrzeug auf einem Förderband und wird durch eine Beregnungskabine transportiert. In der Kabine sind mehrere Sprühdüsen angebracht, die das Fahrzeug mit Wasser besprühen. Das Fahrzeug wird nach der Regenprobe in der Kabine mit Luft von außen abgetrocknet und von einem Werker inspiziert. Der Werker befundet das Fahrzeug zumeist visuell sowie haptisch und prüft ob Wasser oder Feuchtigkeit in den Innenraum des Fahrzeugs eingetreten ist. Parallel zur Regenprobe kann eine Ruhestrommessung durchgeführt werden. Aufgrund der langen Verweildauer der Fahrzeuge in der Regenprobe ist sichergestellt, dass alle Steuergeräte und Verbraucher abschalten und somit eine korrekte Ruhestrommessung durchgeführt werden kann. Das Fahrzeug wird im Lackfinish auf

Lackbeschädigungen geprüft und in der Werkschlussabnahme für den Transport mit einer Schutzfolie vorbereitet. Dabei finden auch eine Kontrolle des Interieurs und eine diagnoseseitige Umschaltung des Fahrzeugs in den Kundenmodus statt. Vor der Übergabe an den Vertrieb werden final alle Fehlerspeicher bereinigt und die Kommunikation mit dem Diagnosesystem wird beendet. [Mül15-3]

Die grundsätzliche Anordnung, Ausprägung und Reihenfolge der Anlagen und Betriebsmittel variiert zwischen den Automobilherstellern, sodass kein einheitlicher Standard existiert. Die Fahrzeugbewegungen in der Fahrtechnik werden entweder manuell durch einen Werker durchgeführt oder automatisiert über Förderbänder. Bei einer automatisierten Förderung verbleiben die Werker an ihren zugewiesenen Prüfständen. Zwischen den Anlagen sind, in Abhängigkeit des Betreibers, Kreuzungsmöglichkeiten vorgesehen. Werden Fehler am Fahrzeug auf einem der Prüfstände in der Fahrtechnik erkannt, so werden die Fehler markiert und in einem dafür vorgesehenen Nacharbeitsbereich korrigiert. Abbildung 7 skizziert den schematischen Ablauf der Fahrzeuginbetriebnahme in der Fahrtechnik.

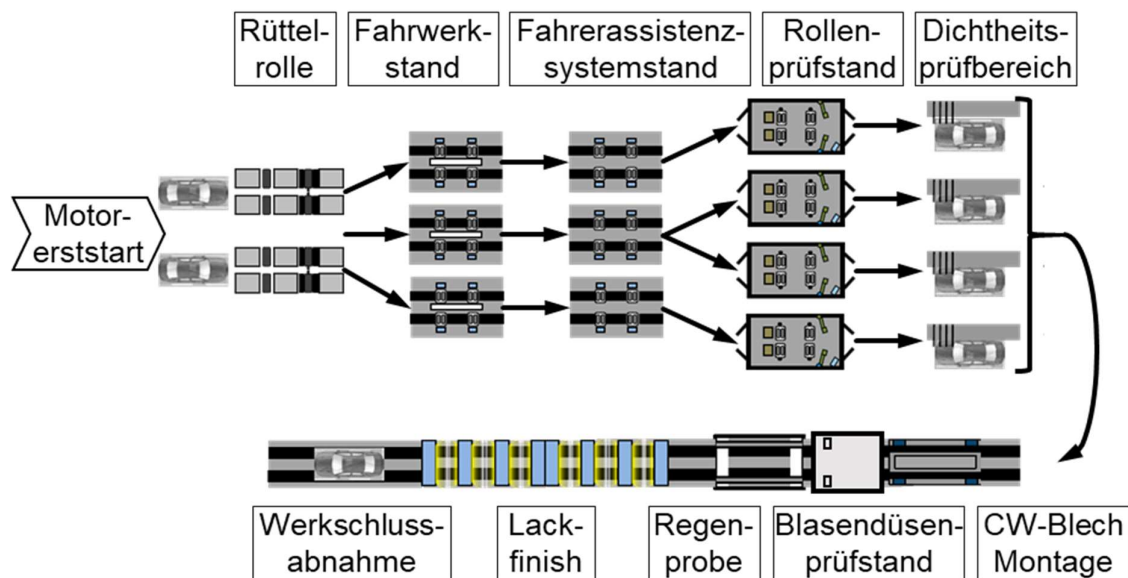


Abbildung 7 Ablauf der Fahrzeuginbetriebnahme in der Fahrtechnik [vgl. Mül15-3]

Aufgrund der höheren Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand, im Vergleich zum Hallentakt der Montagelinie, müssen mehrere Fahrwerkstände parallel betrieben werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Taktzeit auf dem Fahrwerkstand in etwa zweimal bis dreimal höher ist als der Hallentakt der Hauptmontagelinie. Dies führt zu einer hohen inhaltlichen sowie strukturellen Parallelität in der Fahrtechnik. Die möglichen Prozesszeiten auf dem Rollenprüfstand und dem Motorcheck sind bereits im Bereich des Hallentaktes der Montagelinie. Der

Fahrwerkstand stellt somit einen Flaschenhals in der Produktionslinie dar und verhindert die Einlinigkeit in der Fahrtechnik. Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge [Bra17] werden die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge auf dem Rollenprüfstand und dem Motorcheck noch weiter reduziert, sodass die Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand in Zukunft deutlich kritischer zu betrachten ist. Außerdem stellt die Fahrtechnik einen kostenintensiven Bereich dar, da sehr hohe Anforderungen an die Betriebsmittel und die Anzahl an eingesetzten Mitarbeitern gestellt werden [Mül15-3].

Maßgeblich für den Anstieg der Komplexität auf dem Fahrwerkstand ist die Zunahme der Elektrik und Elektronik im Fahrzeug. Die technischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie erlauben immer weitere komplexe Funktionen. Die aktuelle Fahrzeuggeneration übertrifft mit ihrer Leistungsfähigkeit die Raumkapsel der Apollo 11 Mission, welche im Jahr 1969 den Mond umkreiste und die erste bemannte Mondlandung durchführte. [Rei11] Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Verlauf der Systemkomplexität in der Kraftfahrzeugelektronik.

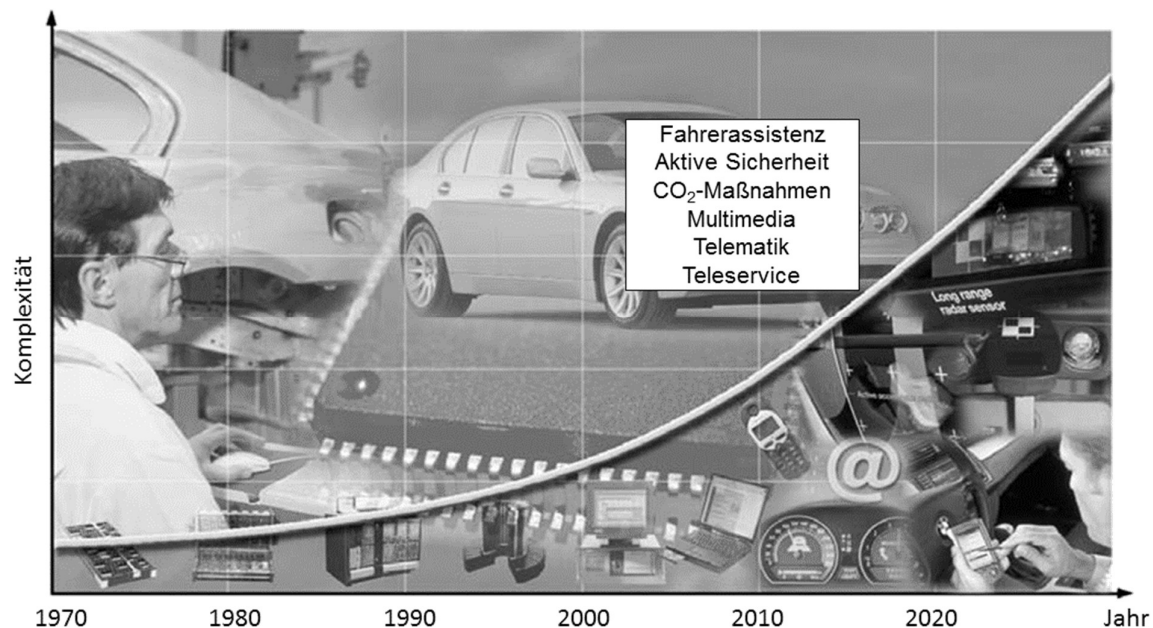


Abbildung 8 Systemkomplexität in der Kraftfahrzeugelektronik [vgl. Wal06]

Die Funktionalität und Leistungsfähigkeit moderner Fahrzeuge ist hauptsächlich auf die Fahrzeugelektronik zurückzuführen. Etwa 90% aller Innovationen, der aktuellen Generation von Fahrzeugen, werden durch die Verwendung von elektronischen Systemen realisiert. [Wal06]

Viele der Innovationen, die eine Kalibrierung oder Inbetriebnahme benötigen, sind im Bereich der Fahrerassistenzsysteme zu finden. Fahrerassistenzsysteme sind Systeme, die Aufgaben oder Funktionen des Fahrzeugführers übernehmen oder ihn dabei unterstützen diese Aufgaben auszuführen. Die Systeme sollen dazu dienen die Fahrsicherheit zu erhöhen. Die Fahrerassistenzsysteme werden dabei in vier Gruppen aufgeteilt. Dies sind zum einen Systeme, die die Längs- und Querführung des Fahrzeugs beeinflussen sowie Systeme die dem Fahrzeugführer allgemeine Hilfen oder eine Sichtunterstützung bieten. [Hil16] Abbildung 9 zeigt eine Auswahl an verschiedenen Fahrerassistenzsystemen, die den vier Gruppen zugeordnet sind.

Längsführung	Querführung	Allgemeine Hilfen	Sichtunterstützung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ABS, ASR ▪ Tempomat ▪ Abstandswarner ▪ Hillholder ▪ Bremsassistent ▪ Abstandsregeltempomat ▪ Aktiver Notbremsassistent 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ESP ▪ Spurhalteassistent ▪ Seitenwindkompensation ▪ Aktiver Spurhalteassistent ▪ Kurvenwarner 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsschilderkennung ▪ Müdigkeitserkennung ▪ Reibwerterkennung ▪ Fahrstiltrainer ▪ Licht- & Wischersteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Totwinkelassistent ▪ Nachtsichtunterstützung ▪ Abbiegeassistent ▪ Birds Eye View ▪ Rückfahrkamera

Abbildung 9 Gruppeneinteilung verschiedener Fahrerassistenzsysteme [vgl. Hil16]

Die abgebildeten Fahrerassistenzsysteme werden durch unterschiedliche Sensoren und Aktoren im Fahrzeug umgesetzt. Für die Längsführung werden vor allem Radarsensoren eingesetzt. Die Querführung und die Sichtunterstützung übernehmen vorwiegend Kamerasysteme.

Der Radarsensor (RAdio Detection And Ranging) dient zur Entdeckung und Lokalisierung von Objekten mittels Radiowellen. Dabei werden von einem Sender Trägerpulse erzeugt und über eine Antenne mit hoher Richtwirkung abgestrahlt. Die Pulse werden von den Objekten reflektiert und über die Antenne empfangen. Ein angeschlossener Signalprozessor verarbeitet die empfangenen Informationen. Der Radarsensor ist damit in der Lage Objekte zu entdecken und zu lokalisieren sowie den Bewegungszustand des Objektes zu erfassen. [Lud02] Abbildung 10 zeigt einen typischen Radarsensor wie er in der Automobilindustrie eingesetzt wird.

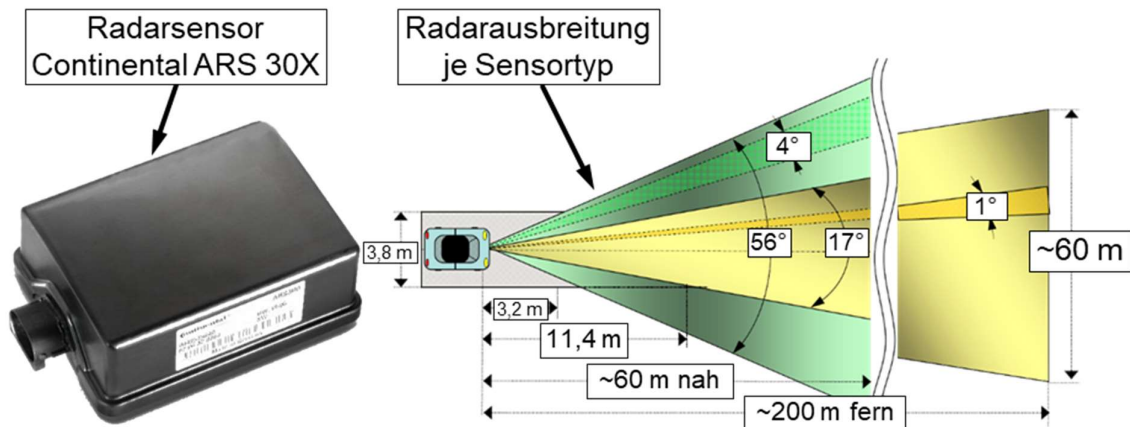


Abbildung 10 Radarsensor in der Automobilindustrie [vgl. Idg18, Adc17]

Je nach eingesetztem Sensortyp werden die Radarsensoren in Nah- und Fernbereichssensoren klassifiziert. Nahbereichsradare arbeiten zwischen 0,25 m und 60 m wohingegen Fernbereichsradare zwischen 0,25 m bis hin zu 200 m arbeiten [Adc17]. Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme müssen im Fahrzeug kalibriert werden. Dies geschieht, indem der Radarsensor zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs ausgerichtet wird. Abbildung 11 verdeutlicht den Einfluss einer fehlerhaften Kalibrierung auf die Erkennung der korrekten Fahrspur.

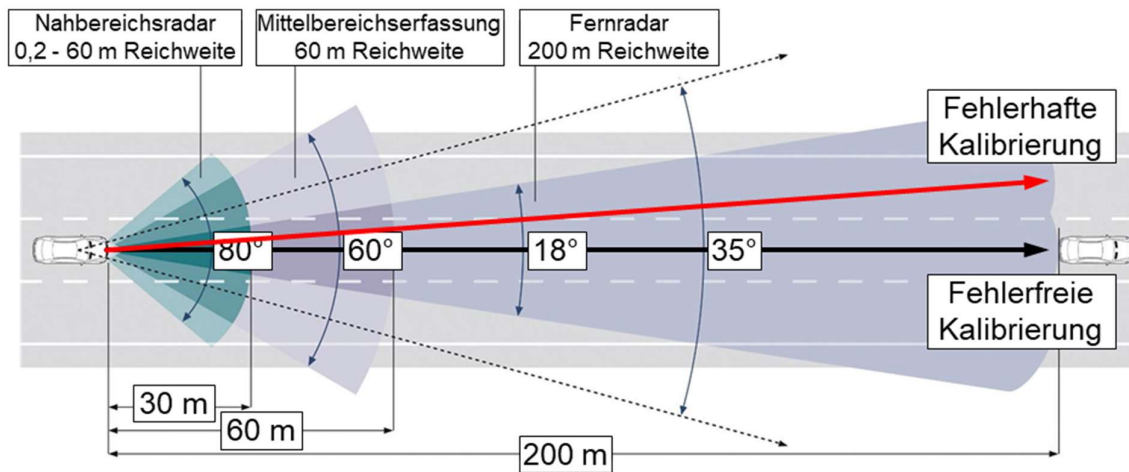


Abbildung 11 Fehlkalibrierung eines Radarsensors [vgl. Dai11-2]

Eine nicht durchgeführte Kalibrierung oder eine Fehlkalibrierung um 1° hat bereits zur Folge, dass in 200 m Entfernung eine Abweichung von 3,5 m auftritt. Somit besteht die Gefahr, dass in dieser Entfernung die falsche Fahrspur erkannt wird und als tatsächliche Fahrspur des Fahrzeugs angenommen wird.

Ein weiterer Sensor, welcher für Fahrerassistenzsysteme eingesetzt wird, ist der Typ LIDAR (LIght Detection And Ranging). Dieser wird vor allem für die höheren Stufen des autonomen Fahrens benötigt, da er sich durch eine feine Auflösung und einer hohen Genauigkeit auszeichnet. Sensoren vom Typ LIDAR sind in der Lage Entfernung und Positionen von Messpunkten sehr präzise, schnell und mit hoher Reichweite zu vermessen. Die Sensoren verwenden Lichtwellen, um die relevanten Eigenschaften von Objekten im Messbereich zu bestimmen. [Cac15] Die nachfolgende Abbildung 12 zeigt einen LIDAR Sensor, wie er in der Automobilindustrie eingesetzt wird.



Abbildung 12 LIDAR Sensor [Val18]

Ein weiterer Sensortyp, der eingesetzt wird um Fahrerassistenzfunktionen zu ermöglichen, ist die Stereokamera. Sie wird auch SMPC (Stereo Multi Purpose Camera) genannt. Die Stereokamera muss für gewöhnlich ebenfalls kalibriert werden. Abbildung 13 zeigt eine in der Automobilindustrie eingesetzte Stereokamera.



Abbildung 13 Stereokamera [Ron15]

Die Funktionsweise der Stereokamera basiert auf der Parallelschaltung von zwei Kameramodulen. Dadurch ist es möglich Tiefeninformationen und eine direkte Bestimmung der Entfernung von Umgebungsobjekten umzusetzen. [Fre16] Die Stereokamera ist zumeist hinter der Windschutzscheibe und vor dem Rückspiegel verbaut. Kamerasysteme, wie die SMPC, sind in der Lage einen Sichtbereich von bis zu 500 m abzudecken [Dai18-1]. Weitere Umgebungssensoren, die eine Kalibrierung benötigen, sind beispielsweise die Nachtsichtkamera, die Rückfahrkamera oder die 360-Grad Kamera. Diese basieren auf dem gleichen oder ähnlichen Prinzip, wie die SMPC.

Die Situation des Straßenverkehrs wird zukünftig durch einen höheren Anteil des teil- und hochautomatisierten Fahrens beeinflusst. Bis zum Jahr 2050 wird mit einer Marktdurchdringung von 73% bei teilautonom fahrenden Fahrzeugen gerechnet. Im gleichen Zeitraum ist eine Marktdurchdringung von 55% für hochautonom fahrende Fahrzeuge prognostiziert. [For17] In der Produktion aktueller und zukünftiger Fahrzeuggenerationen nehmen daher die Inbetriebnahme, die Kalibrierung sowie die Prüfung von Fahrzeugkomponenten einen immer weiter steigenden Stellenwert ein. Anzeigesysteme, Fahrerassistenzsysteme und Fahrwerksysteme sind ein Teil davon. Der aufgezeigte Trend liefert einen weiteren Beitrag zur Verschärfung der bereits angespannten Kostensituation in den Montagewerken von Automobilherstellern. In der Vergangenheit bestanden die wesentlichen Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge auf dem Fahrwerkstand aus der Einstellung des Fahrwerks und der Scheinwerfer. Damit war eine geringe Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand garantiert und der Bedarf nach neuartigen Ansätzen zur Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen nicht gegeben. Im Lauf der Zeit sorgte der Einzug der Elektronik in das Fahrzeug für eine zunehmende Anzahl und Komplexität der Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge auf dem Fahrwerkstand. Im Bereich des Fahrwerks führen aktive Fahrwerke zur Notwendigkeit der Durchführung einer Niveaualibrierung. Die Fahrerassistenzsysteme basieren auf einer im Fahrzeug integrierten Umgebungssensorik, die ebenfalls kalibriert werden muss. Hierbei werden die Radarsensorik für den Abstandsregeltempomaten und diverse Kamerasysteme, wie beispielsweise die Stereokamera, die 360-Grad Kamera oder die Nachtsichtkamera, kalibriert. Sonstige Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge, die auf dem Fahrwerkstand durchzuführen sind, werden im Bereich der Kommunikations- und Klimakompressorprüfung benötigt. Der Trend der steigenden Anzahl an Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen wird in Zukunft weder im klassischen Fahrwerksbereich noch im Bereich der Fahrerassistenzsysteme abreißen. Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge, wie beispielsweise die Einstellung der Hinterachslenkung oder die Inbetriebnahme von weiterer Umgebungssensorik für die höheren Stufen des autonomen Fahrens, werden die Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand weiter erhöhen. Abbildung 14 verdeutlicht die zunehmende Anzahl an Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen im Laufe der Zeit.

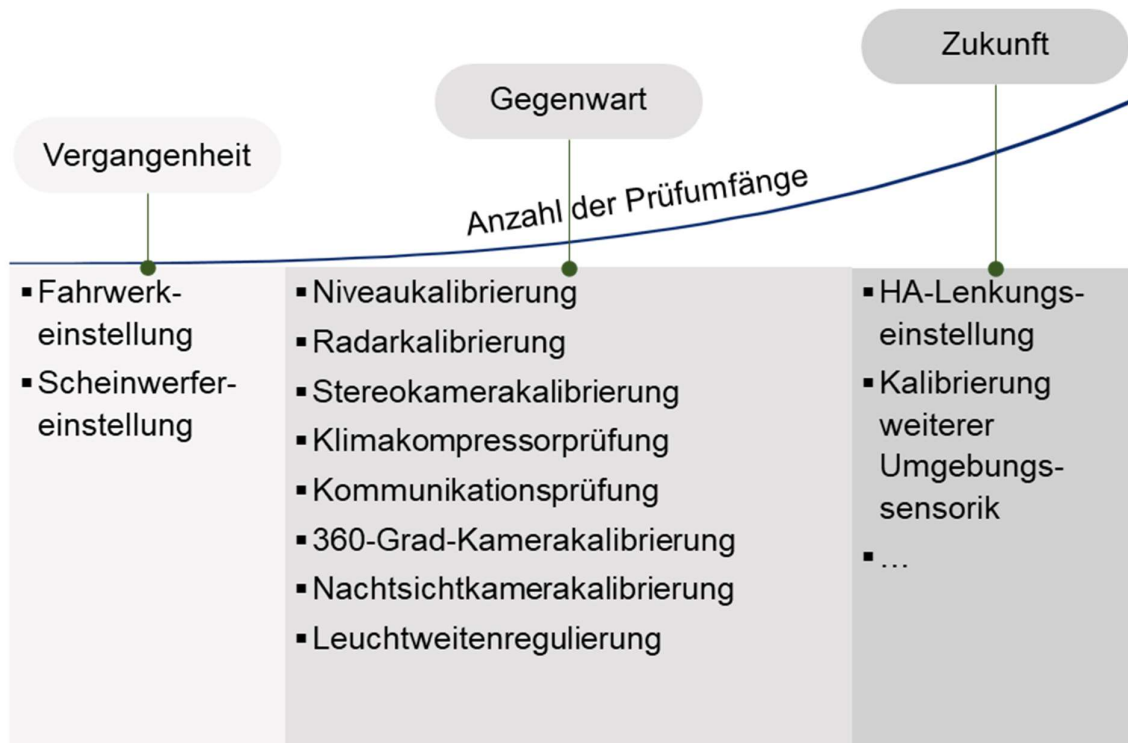


Abbildung 14 Steigende Anzahl an Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen

Die zunehmende Anzahl und Komplexität der Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge führt zu stetig wachsenden Prozesszeiten auf dem Fahrwerkstand. Viele Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge können auf dem Fahrwerkstand parallelisiert werden. Allerdings bleibt eine hohe Anzahl an Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen, die seriell ablaufen müssen und somit für die Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand zeitkritisch sind. Dies führt dazu, dass mehrere Fahrwerkstände parallel betrieben werden, da die Prozesszeit größer ist als der Hallentakt der Montagelinie. Eine angestrebte Einlinigkeit in der Fahrtechnik wird aufgrund der Differenz zwischen der Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand und dem Hallentakt der Montagelinie nicht erreicht. Eine Prozesszeitreduktion auf dem Fahrwerkstand in den Bereich des Hallentaktes der Montagelinie ist durch Optimierungsmaßnahmen zur Prozesszeitreduktion auf dem Fahrwerkstand sowie durch eine Vorverlagerung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen in die Montagelinie zu erreichen. Da die Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand um ein vielfaches höher liegt als der Hallentakt der Montagelinie, wirken sich konventionelle Optimierungsmaßnahmen zur Prozesszeitreduktion auf dem Fahrwerkstand vergleichsweise nur wenig aus. Die benötigte Prozesszeitreduktion auf dem Fahrwerkstand in den Bereich des Hallentaktes der Montagelinie wird dadurch nicht erreicht. Um die Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand signifikant zu reduzieren, müssen zeitkritische Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge in die Montagelinie vorverlagert werden. Die zeitkritischen Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge sind im Fahrwerk- und Fahrerassistenzsystembereich zu

finden. Die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge innerhalb beider Bereiche sind als Verbund zu verstehen, der im Gesamten vorverlagert werden muss. Jeder Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfang für sich ist dabei zeitkritisch, jedoch können die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge eines Verbundes in sich geschlossen parallel stattfinden. Abbildung 15 veranschaulicht Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge, die in die Montagelinie vorverlagert werden können.

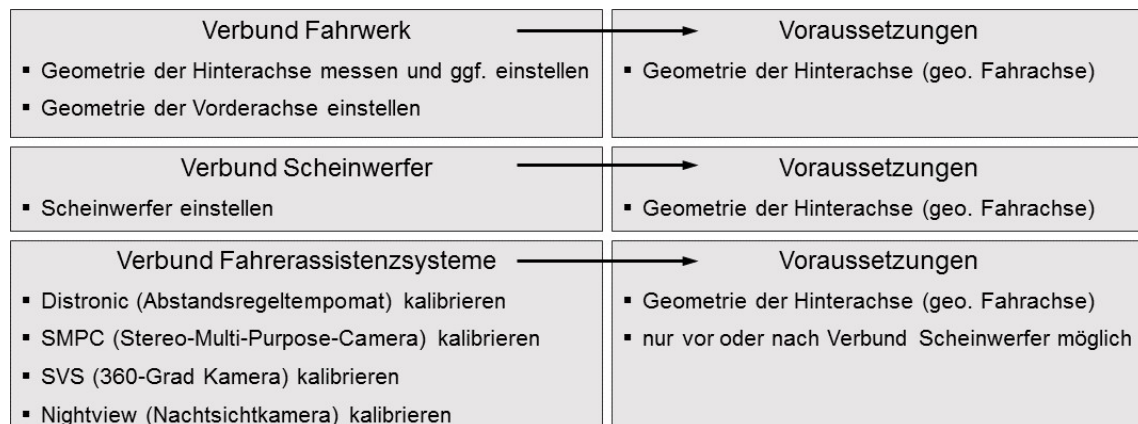


Abbildung 15 Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aufgeteilt in Verbunde

Die Vorverlagerung der Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aus allen Verbänden erfordert eine Vermessung der Fahrwerkgeometrie an der Hinterachse in der Montagelinie. Durch die Vermessung der Fahrwerkgeometrie an der Hinterachse wird die geometrische Fahrachse ermittelt. Die geometrische Fahrachse bestimmt die Fahrtrichtung des Fahrzeugs bei einer geraden Lenkradstellung. Auf Basis dieser geometrischen Fahrachse werden die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aus allen Verbänden durchgeführt. Die Einstellung der Geometrie der Vorderachse erfolgt bei jedem Fahrzeug und bezieht sich dabei ebenfalls auf die geometrische Fahrachse als Referenzachse für die Fahrwerkgeometriewinkel an der Vorderachse. Die Fahrwerkgeometrie der Hinterachse muss im Regelfall nur vermessen werden, da diese bereits im Achsmontagewerk voreingestellt wurde. Für den Fall, dass die Hinterachsgeometrie außerhalb des Toleranzbereichs liegt muss zunächst eine Korrektur auf die vorgegebenen Sollwerte erfolgen bevor weitere Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge durchgeführt werden können. Die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aus dem Scheinwerfer- und dem Fahrerassistenzsysteme-verbund werden ebenfalls auf Basis der geometrischen Fahrachse durchgeführt. Die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aus dem Scheinwerferverbund erfolgen, aufgrund der Notwendigkeit der Kenntnis über die geometrische Fahrachse, nach dem Fahrwerkverbund. Eine Parallelisierung zwischen dem Fahrwerk- und dem Scheinwerferverbund ist möglich. Sobald die geometrische Fahrachse vermessen wurde, können die Einstellung der Scheinwerfer sowie die Einstellung der Vorderachs-

geometrie parallel erfolgen. Die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge des Fahrerassistenzsystemverbundes können vor oder nach dem Scheinwerferverbund erfolgen. Die Ermittlung der geometrischen Fahrachse muss aber ebenfalls zuvor erfolgt sein. Eine Parallelisierung des Scheinwerfer- und des Fahrerassistenzsystemverbundes ist nicht möglich, da für die Scheinwerfereinstellung die Motorhaube geöffnet werden muss. Dadurch wird das Blickfeld des Kamerasystems blockiert. Bei der Scheinwerfereinstellung handelt es sich um eine manuelle Tätigkeit. Durch Personenbewegungen bei der Scheinwerfereinstellung vor dem Fahrzeug kann die Kalibrierung der Radarsensorik gestört werden. Die Fahrwerkgeometrievermessung in der Montagelinie bildet die grundlegende Voraussetzung für eine Vorverlagerung der Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge mit den Zielen der Prozesszeitreduktion auf dem Fahrwerkstand sowie der Realisierung der Einlinigkeit in der Fahrtechnik. Für die Fahrwerkgeometrievermessung in der Montagelinie existieren bereits technische Lösungen. Die technischen Lösungen basieren auf einer taktilen Adaption mit dem Fahrzeug und anschließender Vermessung der Fahrwerkgeometrie. Abbildung 16 zeigt ausgewählte Beispiele für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung durch die Nabengreifertechnologie.

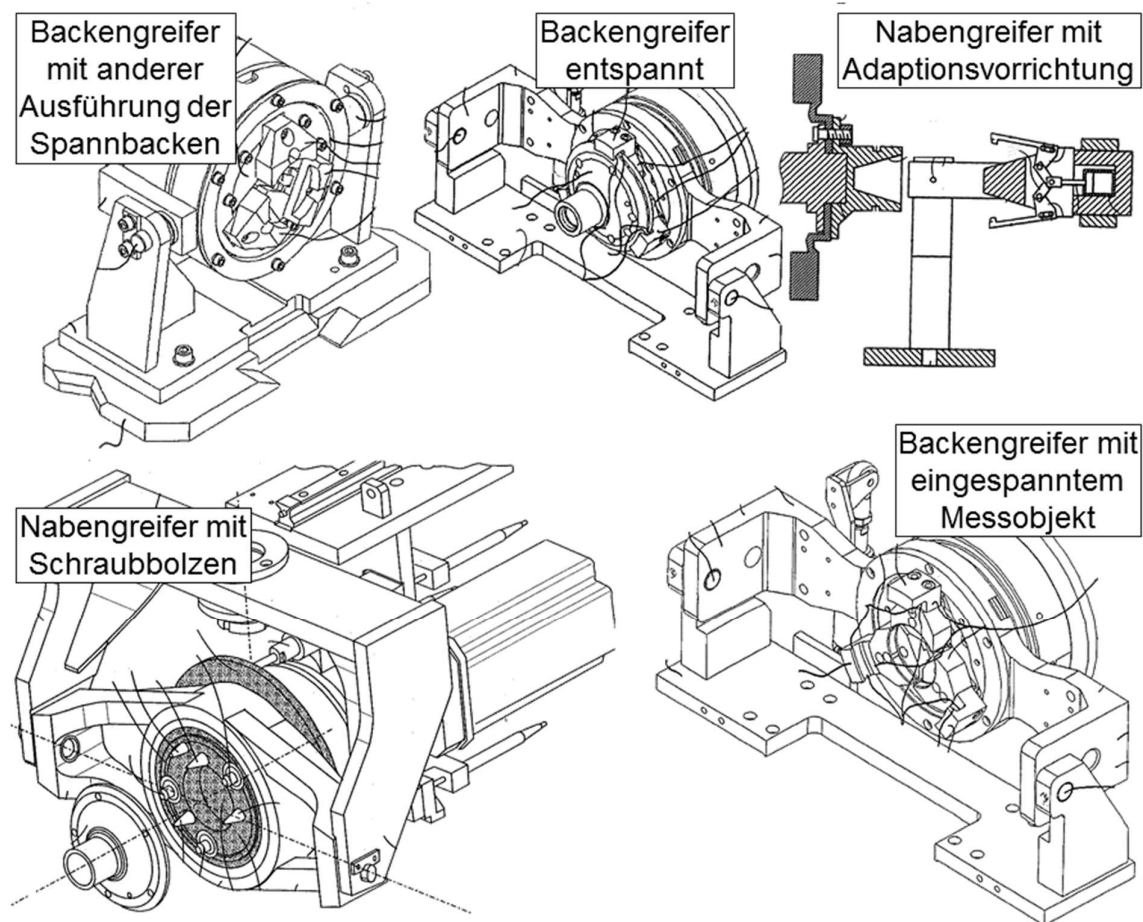


Abbildung 16 Nabengreifer [vgl. Hoh11, Gre01, Ten04, Kam12]

Die auf dem Markt technisch verfügbaren Lösungen unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Art der Adaption an das Fahrzeug. Der Nabengreifer adaptiert sich mit dem Fahrzeug durch Spannbacken oder Schraubbolzen, die an der Radnabe angesetzt werden.

Bei Dehnungsgreifern erfolgt eine Adaption mit dem Fahrzeug, in dem über dehnbare Polyurethanhülsen in den Bohrungen für die Radschrauben eine Verbindung hergestellt wird. Hierzu werden die Dehnungshülsen zunächst vor dem Messobjekt in die korrekte Lage positioniert, um ein Anfahren des Adaptionkopfs zu ermöglichen. Anschließend wird der Adaptionkopf über Linearachsen und Hubsäulen translatorisch in die vorgesehenen Schraubpunkte der Radfelgen hinein bewegt. Die eingefahrenen Hülsen werden nach der Adaption durch einen Mechanismus aufgespannt. Das Aufspannen bewirkt eine Vergrößerung des Außendurchmessers der Dehnungshülsen in den Gewindegängen der Schraubpunkte. Ab diesem Zeitpunkt ist der Adaptionkopf mit dem Fahrzeug fest verbunden und die weiteren Prozessschritte zur Fahrwerkgeometrievermessung können durchgeführt werden. Abbildung 17 zeigt ein Betriebsmittel, das nach dem Prinzip der Dehnungsgreifer arbeitet.

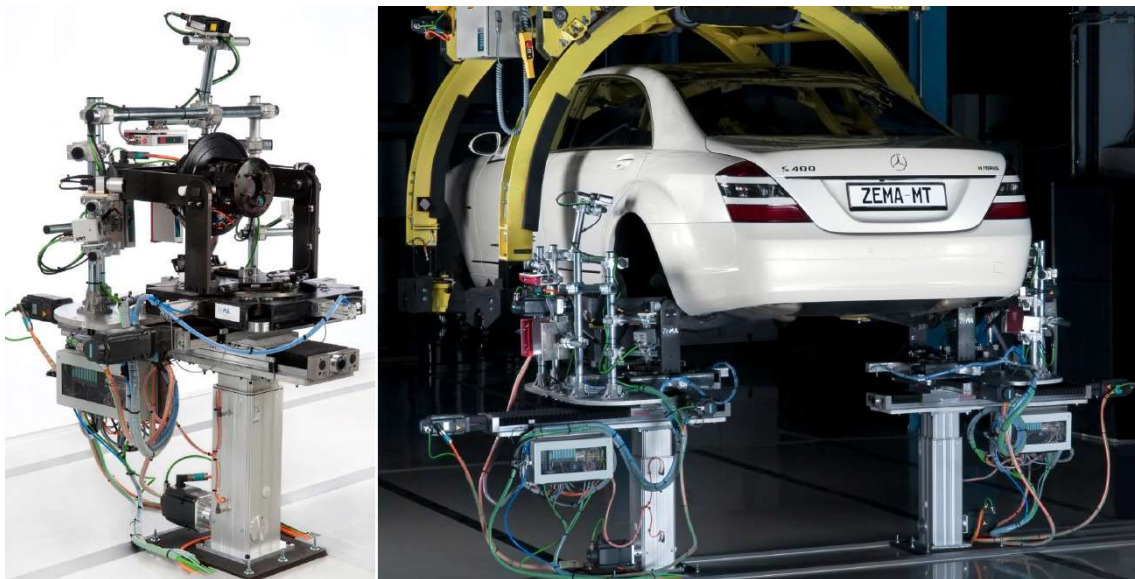


Abbildung 17 Dehnungsgreifer [vgl. Mül16]

Zusätzlich zu den Adaptionköpfen ist eine Messtechnik, in Form von Laser- und Kamerasensoren, installiert. Je nach Art der Ausführung werden auch taktile Sensoren eingesetzt. [Aue16] Durch die installierte Sensorik wird die eigentliche Fahrwerkgeometrievermessung ermöglicht. Die Adaptionköpfe stellen die Voraussetzungen für eine korrekte Fahrwerkgeometrievermessung her. Dies ist zum einen das Einfedern des Fahrzeugs in eine definierte Lage, die dem fahrfertigen Fahrzeug entspricht. Außerdem wird durch den Adaptionkopf eine

Umschlagsmessung des Messobjekts ermöglicht. Die Umschlagsmessung ist notwendig, da das Messobjekt um die eigentliche Raddrehebene für die Fahrwerkgeometrievermessung taumelt. Dadurch entsteht ein Taumelwinkel zwischen der korrekten Messebene und dem Messobjekt. Dies ist unter anderem in den Form- und Lagetoleranzen des Messobjekts begründet. Die hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit bei der Fahrwerkgeometrievermessung erfordern die Kompensation dieses Taumelwinkels durch eine Umschlagsmessung. Da das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Fahrwerkgeometrievermessung in der Montagelinie über keinen Eigenantrieb verfügt, wird die Umschlagsmessung nach der Adaption über das Betriebsmittel realisiert. Aufgrund der Adaptionköpfe und der verwendeten Messtechnologie entstehen beim Einsatz taktiler Betriebsmittel zur Fahrwerkgeometrievermessung hohe Investitionskosten. Die hohen Investitionskosten können bei einer Anwendung, der vergleichsweise komplexen Betriebsmittel zur taktilen Fahrwerkgeometrievermessung, in einer bestehenden Fahrzeugproduktionshalle durch die erzielten Einsparungen in der Fahrtechnik nur bei einer entsprechend langen Restlaufzeit der Fahrzeugproduktion kompensiert werden. Der hohe Platzbedarf der taktilen Betriebsmittel ist in bestehenden Fahrzeugproduktionshallen ein weiterer Nachteil und führt zu Einschränkungen im Bereich des flexiblen Einsatzes. Die Nachteile der taktil messenden Betriebsmittel führen zum Bedarf eines neuen Ansatzes für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung zur Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen am Fahrzeug in bestehenden Fahrzeugproduktionshallen.

Somit ergibt sich die nachfolgende Forschungsfrage: Wie kann die Inline Fahrwerkgeometrievermessung vollständig berührungslos gestaltet werden, um eine effiziente Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen in bestehenden Montagelinie zu ermöglichen?

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, einen neuartigen Ansatz zur Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen durch die Inline Fahrwerkgeometrievermessung darzustellen. Für die Durchführung von Fahrzeugkalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen muss die geometrische Fahrachse im Rahmen einer Fahrwerkgeometrievermessung bestimmt werden. Die Fahrwerkgeometrievermessung stellt somit die Basis für die Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen dar. Aktuelle Technologien sind ausschließlich in der Lage die Fahrwerkgeometrie in der Montagelinie taktil durch Adaption mit dem Fahrzeug zu vermessen. Dadurch entstehen Nachteile in Bezug auf die Anlagenkomplexität, der Investitionskosten sowie der Flexibilität beim Einsatz in bestehenden Fahrzeugproduktionshallen. Die Fahrwerkgeometrievermessung wird durch eine umfassende Betrachtung am Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie durch den Einsatz von datengetriebenen Lösungen in ein berührungsloses Verfahren gewandelt. Dadurch

wird die Möglichkeit geschaffen Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge in die Montagelinie vorzuziehen und eine Prozesszeitreduktion auf dem Fahrwerkstand, mit dem Ziel der Einlinigkeit in der Fahrtechnik, zu erreichen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die hier vorliegende Arbeit behandelt einen neuen Ansatz zur Inline Fahrwerkgeometrievermessung mit dem Ziel der Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen in der Montagelinie. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich dabei an den Kernphasen der Produktentwicklung und -konstruktion nach VDI 2221 [Bin11] und behandelt die Schwerpunkte Produkt, Prozess und Betriebsmittel [Mül11] aus Sicht der produktionsnahen Forschung und Entwicklung. In einer Einleitung werden zunächst die Ausgangssituation und der Bedarf für neuartige Inbetriebnahmeverfahren erläutert. Am Beispiel des Fahrwerkstandes werden Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge aufgezeigt sowie technische Lösungen zur taktilen Vermessung der Fahrwerkgeometrie in der Montagelinie vorgestellt. Im aktuellen Stand der Technik in Forschung und Industrie werden grundlegende Begriffe und Definitionen der Fahrwerkgeometrie gezeigt. Der aktuelle Stand der Technik in Forschung und Industrie wird durch die Grundlagen der Fahrzeuginbetriebnahme ergänzt. Dabei wird die Fahrzeuginbetriebnahme auf dem Fahrwerkstand im Detail erläutert. Eine abschließende Analyse konventioneller taktiler Betriebsmittel und den Voraussetzungen für eine korrekte Fahrwerkgeometrievermessung führt zu einem neuen Ansatz zur Durchführung von Kalibrierumfängen mit Hilfe der Inline Fahrwerkgeometrievermessung. Der neue Ansatz für ein Betriebsmittel zur berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung wird durch eine umfassende Betrachtung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel konzipiert und geplant. Die Produktbetrachtungen gliedern sich in eine Messobjektanalyse mit entsprechenden experimentellen Voruntersuchungen und der Ableitung von produktspezifischen Einflussfaktoren. Die Betriebsmitteluntersuchungen werden mit einer Technologierecherche eingeleitet, die zur Konstruktion und Automatisierungstechnik des Betriebsmittels führt. Abschließend werden die betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren dargestellt sowie ein Ansatz eines Kalibrierkonzeptes erstellt. Die Betrachtung des Prozesses für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung enthält eine Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse sowie die Prozessbeschreibung für den Montagefließ- und Montagetaktbetrieb. Die zuvor ermittelten produktspezifischen Einflüsse führen zur Entwicklung eines Algorithmus zur Fahrzeugniveau- und Fahrzeuggewichtsprädiktion. Im Entwurf und der Ausarbeitung der Inline Fahrwerkgeometrievermessung ist der Fokus auf die Betriebsmittelinbetriebnahme und Anlagendigitalisierung sowie einem mathematischen Rechenmodell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung gelegt. Ergänzend hierzu wird eine modellprädiktive Regelung des Betriebsmittels implementiert sowie die Messobjekt detektion und die Automatisierung des Messverfahrens vorangetrieben. Im Rahmen eines Design of Experiments für die

berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung werden der Versuchsaufbau sowie der Messplan vorgestellt. Der Messplan besteht dabei aus vollfaktoriellen Versuchsplänen für die Untersuchung der produkt- und betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren. Die Umsetzung der Einflussfaktoren wird anhand der aufgebauten Experimente erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse und Zusammenhänge der experimentellen Versuche vorgestellt. Den Ergebnissen der Produktuntersuchungen folgen die Ergebnisse der Betriebsmitteluntersuchungen. Die zuvor durchgeführten Experimente unter Laborbedingungen werden im Rahmen von Vergleichsmessungen sowie in einem Betriebsversuch im Mercedes-Benz Werk Sindelfingen validiert. Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick, der das weitere Vorgehen und die Optimierungs- und Entwicklungsmöglichkeiten der Inline Fahrwerkgeometrievermessung darstellt.

2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

Zur Lösung der Forschungsfrage werden im Stand der Technik in Forschung und Industrie zunächst die Begriffe der Fahrwerkgeometrie erklärt. Diese sind für den gesamten Verlauf der Arbeit von großer Bedeutung. Darauf aufbauend erfolgt eine Erläuterung der Fahrzeuginbetriebnahme auf dem Fahrwerkstand mit den unterschiedlichen Kalibrieraufgaben und dem Zusammenhang zur Fahrwerkgeometrie. Hieraus kann ein neuer Ansatz zur Durchführung von Kalibrierumfängen formuliert werden. Auf Basis des neuen Ansatzes erfolgt die Präzisierung der Forschungsfrage in Teilaspekte.

2.1 Begriffe und Definitionen

Die Fahrwerkgeometrie eines Fahrzeugs wird im Allgemeinen durch Winkel und Abstände von Punkten, wie beispielsweise den Radmittelpunkten, angegeben. Die Winkel der Fahrwerkgeometrie können in Grad oder Winkelminuten angegeben werden. Abstände werden üblicherweise in Millimetern angegeben.

Die Fahrwerkgeometrieparameter beziehen sich auf das Fahrzeugkoordinatensystem. Das Fahrzeugkoordinatensystem ist in Abbildung 18 dargestellt.

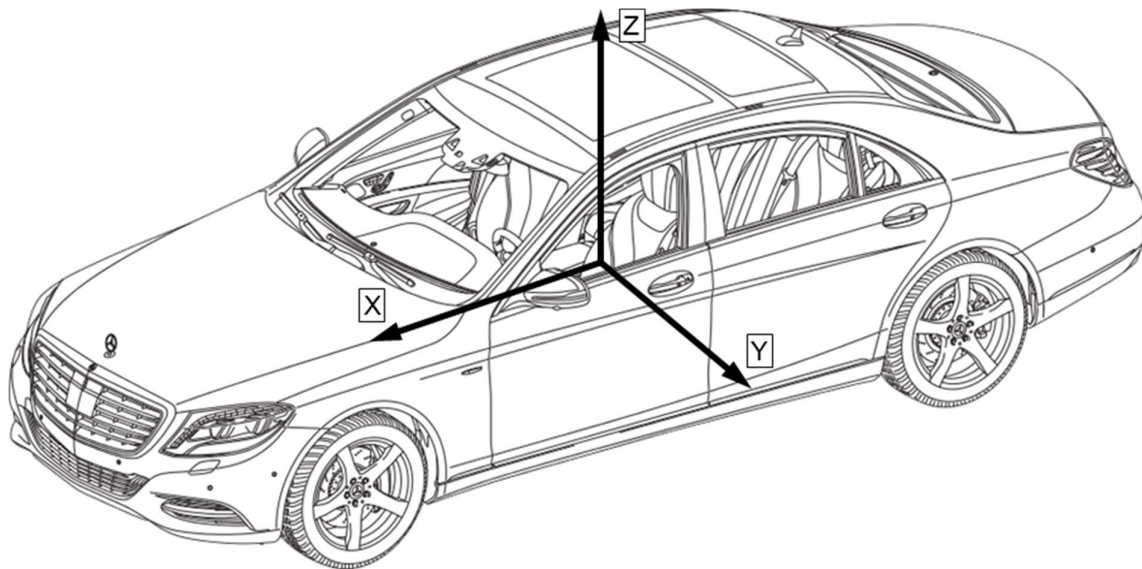


Abbildung 18 Fahrzeugkoordinatensystem [vgl. Dai11-1]

Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems kann unterschiedlich gewählt werden, wie beispielsweise im Fahrzeugschwerpunkt [Mat07]. Im weiteren Verlauf befindet sich der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems auf dem Mittelpunkt der Verbindungslinie der Radmittelpunkte der Vorderachse. Die X-Achse wird entlang der

Fahrtrichtung als positiv definiert. Die Y-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems wird in Fahrtrichtung nach links gesehen als positiv definiert. [Deu94] Abbildung 19 veranschaulicht diesen Zusammenhang mit einer Ansicht auf den Unterboden des Fahrzeugs und dem im Mittelpunkt der Vorderachse zentrierten Fahrzeugkoordinatensystem.

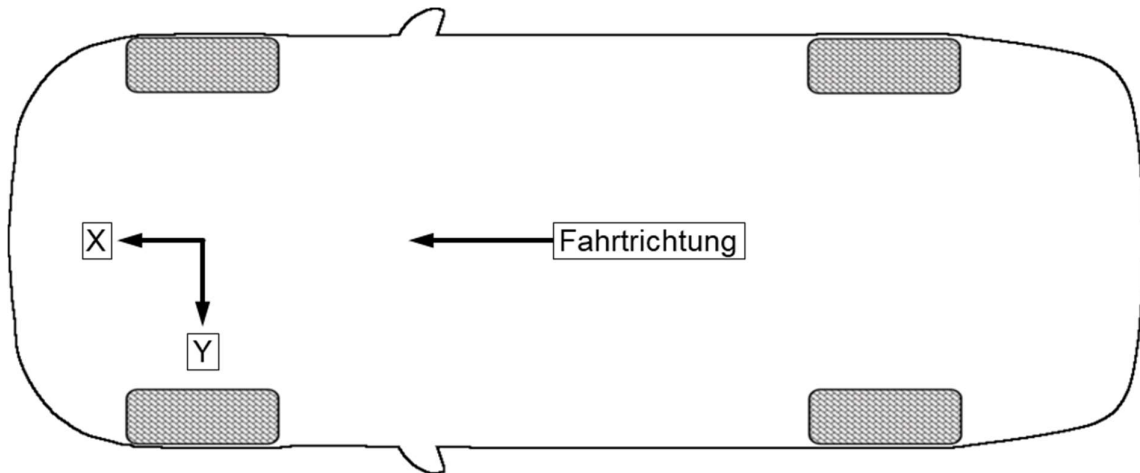


Abbildung 19 Sicht auf das Fahrzeugkoordinatensystem von unten

Zur korrekten Bestimmung und Interpretation der Fahrwerkgeometrie muss das Fahrzeugniveau bekannt sein. Die Angabe des Fahrzeugniveaus erfolgt in Millimetern oder in Grad bei einer Messung des Inklinometerwinkels. Das Fahrzeugniveau kann beispielsweise über die Messung des Abstandes vom Radmittelpunkt zur Radhauskante bestimmt werden. Alternativ kann das Fahrzeugniveau durch eine Messung des Inklinometerwinkels des Querlenkers an der Vorderachse oder der Antriebswelle an der Hinterachse gemessen werden. Dabei gilt, dass der gemessene Inklinometerwinkel positiv definiert ist, wenn der äußere Punkt des gemessenen Bauteils im Wagennetz tiefer liegt als der innere Punkt. Die Vorzeichenkonvention beim Fahrzeugniveau ist dahingehend definiert, dass beim Einfedern das Fahrzeugniveau negativ wird. Der Federweg ist mit umgekehrtem Vorzeichen definiert, sodass beim Einfedern des Fahrzeugs der Federweg positiv wird. [Mer17] Abbildung 20 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

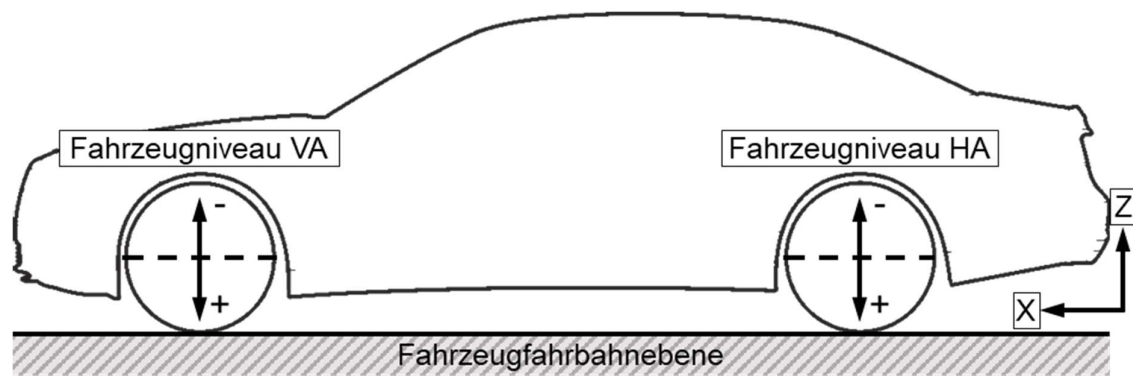


Abbildung 20 Fahrzeugniveau

Das Fahrzeugniveau kann auf unterschiedliche Niveaueingangslagen bezogen werden. Folgende Niveaueingangslagen werden dabei unterschieden:

- K0-Niveau
- 3x68-Niveau
- Fahrfertig EG
- Fahrfertig USA
- Fahrfertig ECE

Das K0-Niveau gibt als Niveaueingangslage die Position vor, in der das Fahrzeug konstruktiv ausgelegt und gezeichnet worden ist. Dabei wird auf ein Geometriemodell des Fahrzeugs zurückgegriffen. Das 3x68-Niveau entspricht einer Niveaueingangslage in der das Fahrzeug mit 3x68 kg beladen ist. Die Verteilung der Gewichte ist mit je 68 kg auf Fahrer- und Beifahrersitz und 68 kg auf dem Fondsitze in der Mitte festgelegt. Außerdem verfügt das Fahrzeug über Sonderausstattungen und ist voll betankt. [Mer17] Das K0-Niveau ist für die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge sowie für die Sollwertberechnung der Fahrwerkgeometrie in der Produktion das maßgebende Niveau.

Die Niveaueingangslage Fahrfertig EG ergibt sich aus einer Zusatzbeladung von 68 kg auf dem Fahrersitz des fahrbereiten Fahrzeugs. Das Fahrzeug ist betankt und mit Schmiermitteln sowie Kühlfüssigkeit versorgt. Außerdem sind im Fahrzeug ein Ersatzrad sowie das entsprechende Werkzeug vorhanden. [Eur92].

Das Niveau Fahrfertig USA definiert die Niveaueingangslage des Fahrzeugs ohne Beladung und Sonderausstattungen aber mit einer vollen Kraftstoff-, Öl- und Kühlfüssigkeitsbetankung. [Soc75].

Die Niveaueingangslage Fahrfertig ECE entspricht einem Fahrzeugniveau mit 75 kg Beladung als Fahreranteil. Es entfallen 68 kg auf die Masse des Fahrers und 7 kg auf die Masse des Gepäcks. Das Fahrzeug ist in diesem Fall zu 90% betankt. Dabei werden die Betriebsanleitung, der Erste-Hilfe-Kasten sowie das Warndreieck nicht berücksichtigt. [Deu08]

Die Winkel der Fahrwerkgeometrie werden im Allgemeinen auf Symmetrieachse im Fahrzeug bezogen. Die Symmetrieachse des Fahrwerks wird durch die Fahrzeuglängsmittlebene definiert. [Deu13] Die Fahrzeuglängsmittlebene ergibt sich aus den Koordinaten der Radmittelpunkte. Über die Verbindungsstrecke der Radmitten der Vorderachse wird der Achsmittelpunkt der Vorderachse bestimmt. Der Achsmittelpunkt der Hinterachse wird über die Verbindungsstrecke der Radmitten der Hinterachse ermittelt. Die Fahrwerksymmetrieachse entsteht durch die Verbindung der Mittelpunkte der Vorder- und Hinterachse. Abbildung 21 zeigt die Konstruktion der Fahrwerksymmetrieachse.

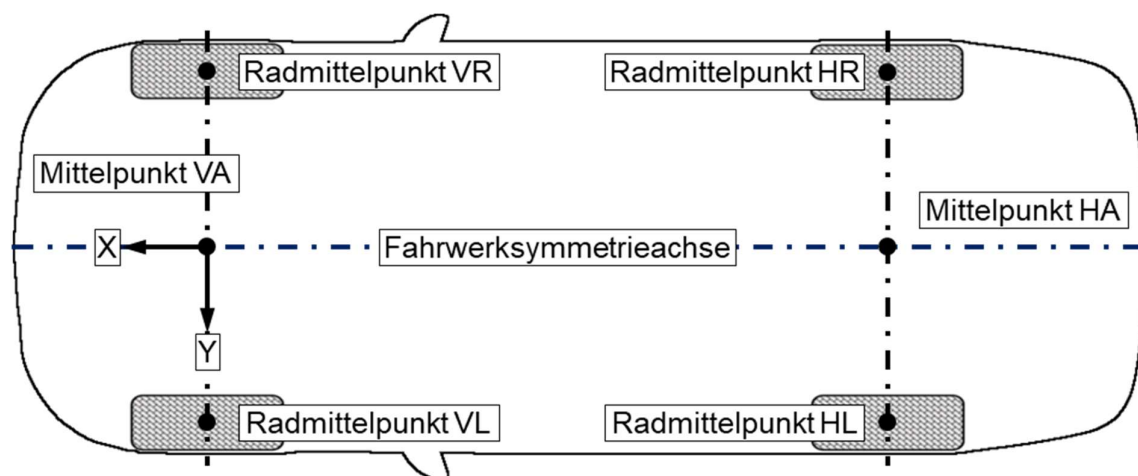


Abbildung 21 Fahrwerksymmetrieachse

Eine weitere Symmetrieachse im Fahrzeug wird durch die Hinterachssymmetrieachse dargestellt. Die Hinterachssymmetrieachse ist durch die Mittelsenkrechte der Verbindungslinie der Radmittelpunkte an der Hinterachse definiert. Abbildung 22 zeigt diesen Zusammenhang.

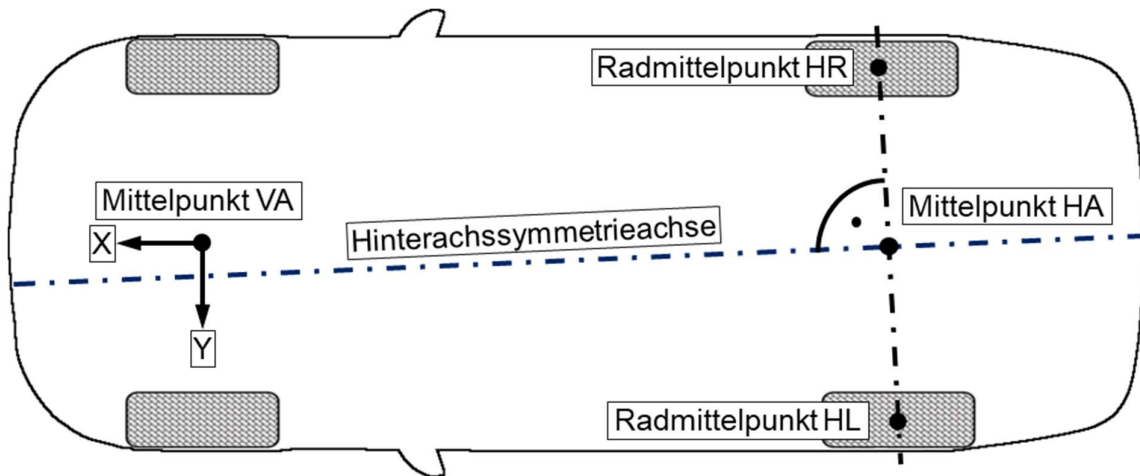


Abbildung 22 Hinterachssymmetrieachse

Im Idealfall sind die Fahrwerk- und die Hinterachssymmetrieachse deckungsgleich. Bei der Montage der Hinterachse mit der Karosserie kann es allerdings dazu kommen, dass die Hinterachse nicht parallel zur Fahrwerksymmetrieachse, sondern um die Fahrzeug Z-Achse verdreht eingebaut wird. Dies liegt darin begründet, dass die Hinterachse über Langlöcher mit der Karosserie verbunden wird. Dies erleichtert den Montageprozess und steigert die Prozessstabilität. Die Langlöcher dienen zum Ausgleich von Karosserie- und Montagetoleranzen und vereinfachen das einfädeln der Hinterachse in die Karosserie beim Montageprozess. Bei der Angabe von Fahrwerks winkeln an der Hinterachse muss deshalb unterschieden werden, ob diese bezüglich der Fahrwerk- oder der Hinterachssymmetrieachse gemessen wurden.

Der Sturzwinkel beschreibt eine Drehung bzw. Neigung des Rades um die X-Achse zur vertikalen Ebene im Fahrzeugkoordinatensystem. [Hen93] Abbildung 23 zeigt die negative und positive Ausrichtung des Sturzwinkels am Rad.

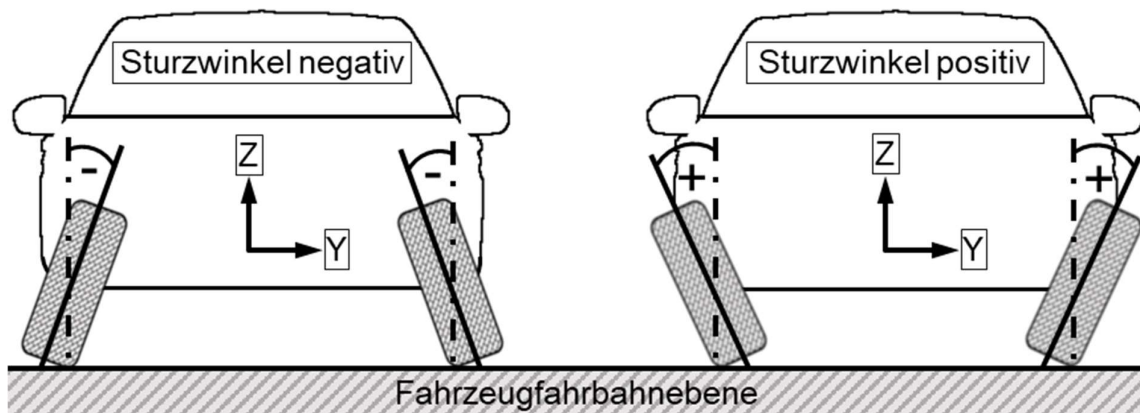


Abbildung 23 Sturzwinkel

Ist das Rad nach Innen geneigt, so wird der Sturz als negativ definiert. Eine Neigung nach Außen definiert den Sturz als positiv. Der Sturzwinkel bestimmt die Übertragbarkeit von Seitenkräften und beeinflusst damit die Fahrstabilität eines Fahrzeugs. [Hei13]

Die Definition des Sturzwinkels ist auch über eine Ebenen- und Geradenbetrachtung darstellbar. Der Sturzwinkel ist demnach definiert als der Winkel zwischen der Schnittgeraden der Raddrehebene mit einer senkrechten Ebene zur Fahrzeugfahrbahnebene und der Fahrwerksymmetrieebene. Abbildung 24 zeigt die entsprechenden Ebenen und die Schnittgerade, wobei die Fahrwerksymmetrieebene nicht dargestellt ist.

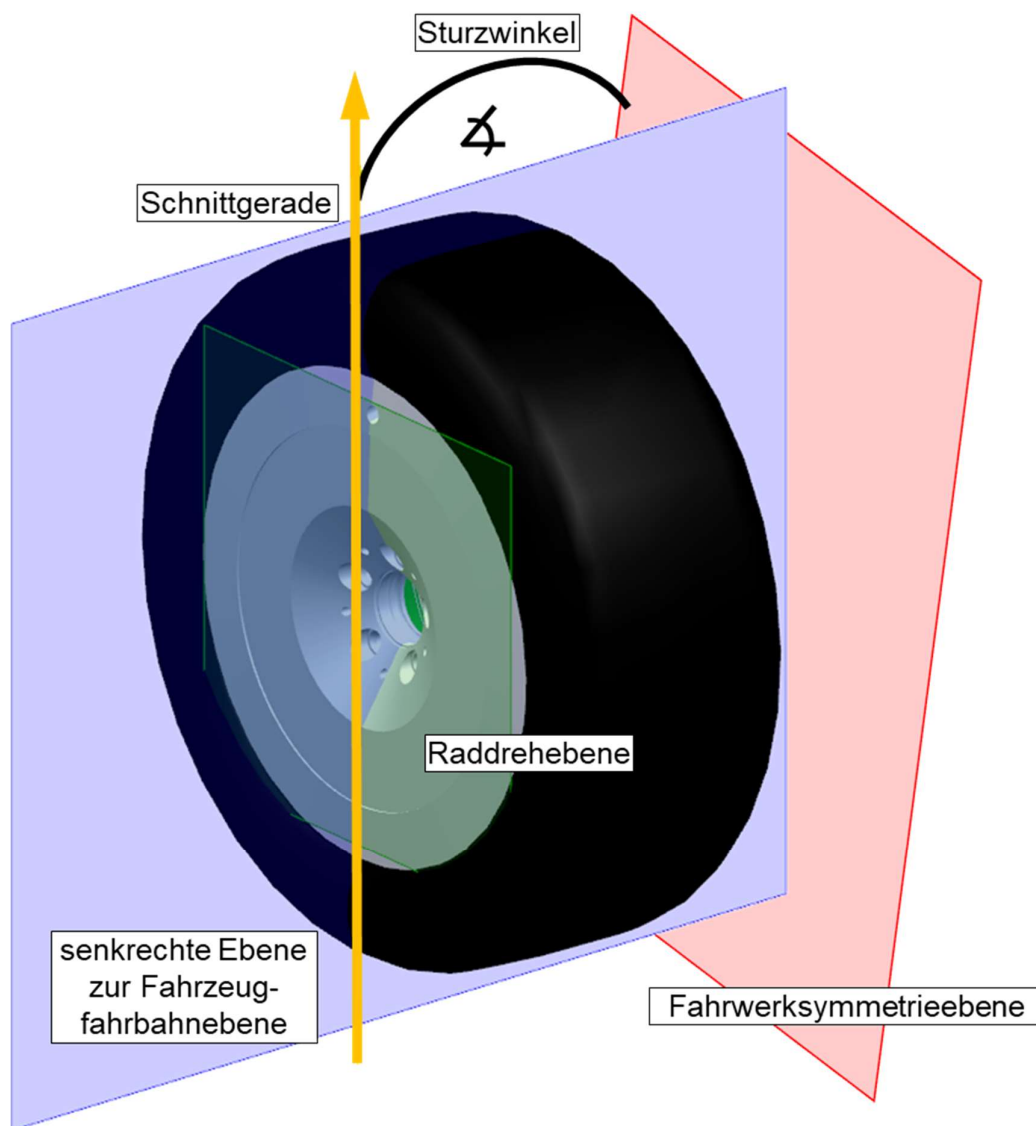


Abbildung 24 Sturzwinkel im Ebenenschnitt

Der Spurwinkel wird durch eine Drehung bzw. Neigung des Rades um die Z-Achse im Fahrzeugkoordinatensystem beschrieben. Ist das Rad nach Innen in Richtung der Fahrwerksymmetrieachse geneigt, so wird der Spurwinkel als positiv definiert. Dieser Zustand wird Vorspur genannt. Eine Drehung des Rades nach Außen definiert den Spurwinkel als negativ. In diesem Fall wird die Spur als Nachspur bezeichnet. [Bra13] Des Weiteren kann die Spur auch über den Abstand der Felgenhörner zueinander definiert werden. Ist der Abstand der Felgenhörner, in Fahrtrichtung gesehen, vorne kleiner als hinten so stellt dies den Zustand der Vorspur dar. [Wie11] Eine Vorspureinstellung bewirkt eine Seitenkraft im Reifen, wodurch ein stabiler Geradeauslauf sichergestellt wird. [Püt17] Abbildung 25 zeigt die Ausrichtungen des Spurwinkels als Vorspur am Rad.

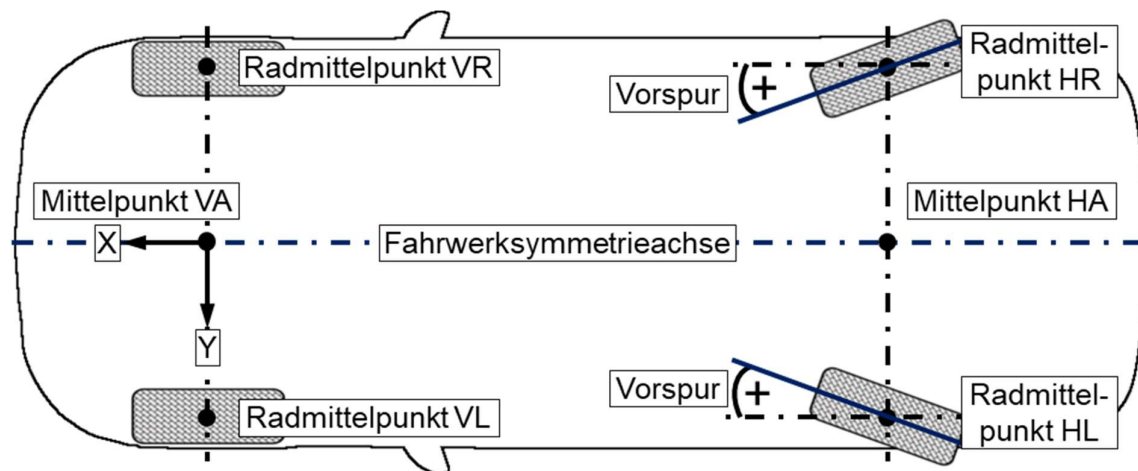


Abbildung 25 Spurwinkel

Die Gesamtspur ist als Summe der Einzelspuren definiert. Die Spurwinkel der Hinterachse im fahrfertigen Fahrzeug werden zur Fahrwerksymmetrieachse gemessen. Die Definition des Spurwinkels kann analog zum Sturzwinkel ebenfalls über eine Ebenen- und Geradenbetrachtung dargestellt werden. Der Spurwinkel ist demnach definiert als der Winkel zwischen der Schnittgeraden der Raddrehebene mit der Fahrzeugfahrbahnebene und der Schnittgeraden der Fahrwerksymmetrieebene mit der Fahrzeugfahrbahnebene. Abbildung 26 zeigt die Ebenen und die Schnittgerade am Rad. Die Fahrwerksymmetrieebene sowie die entsprechende Schnittgerade zur Fahrzeugfahrbahnebene sind nicht dargestellt.

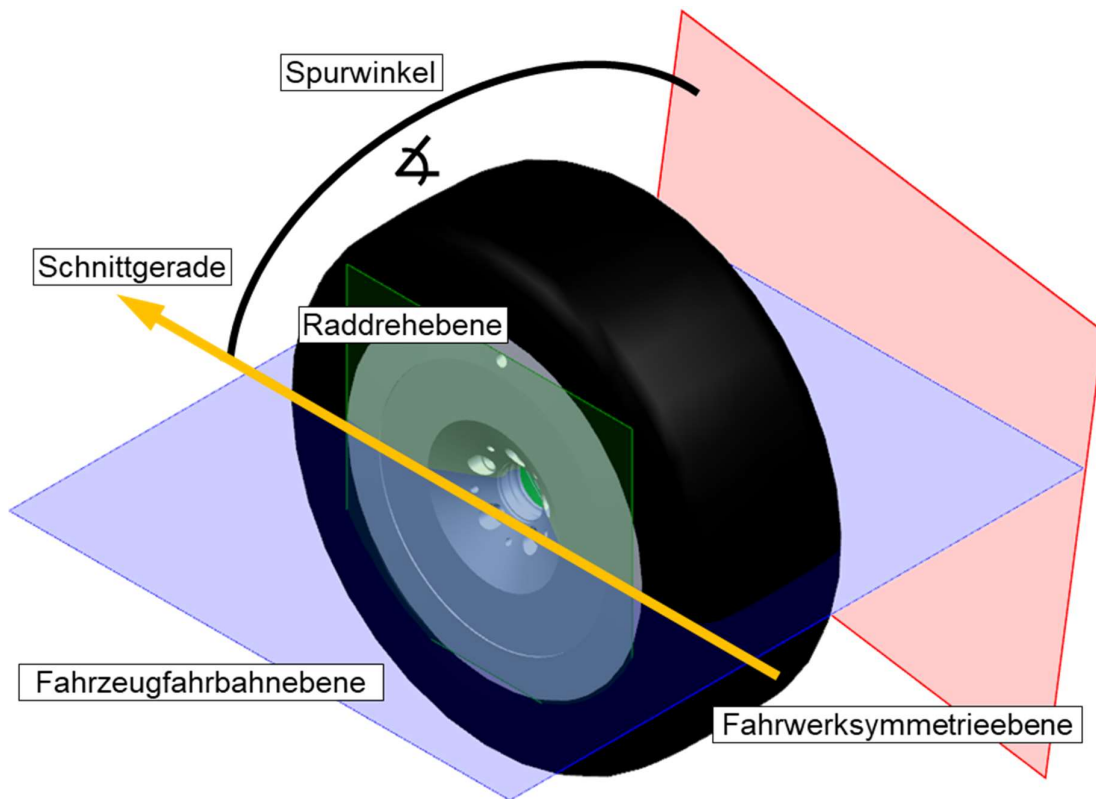


Abbildung 26 Spurwinkel im Ebenenschnitt

Die geometrische Fahrachse ist definiert als die Winkelhalbierende der Gesamtpur der Hinterachse. [Deu92] Die Spurwinkel der Vorderachse werden auf die geometrische Fahrachse bezogen. [Vau11] Im Vergleich dazu werden die Spurwinkel der Hinterachse auf die Fahrwerksymmetrieachse bezogen. Der Winkel δ zwischen der geometrischen Fahrachse und der Fahrwerksymmetrieachse wird als Fahrachswinkel oder Dackellauf bezeichnet. Der Fahrachswinkel wird mit nachfolgender Gleichung berechnet.

$$\delta = \frac{\alpha - \beta}{2} \quad \text{Gl. 2.1}$$

- δ : Fahrachswinkel
- α : linker Spurwinkel an der Hinterachse
- β : rechter Spurwinkel an der Hinterachse

Abbildung 27 zeigt die geometrische Fahrachse sowie den Fahrachswinkel δ zur Fahrwerksymmetrieachse.

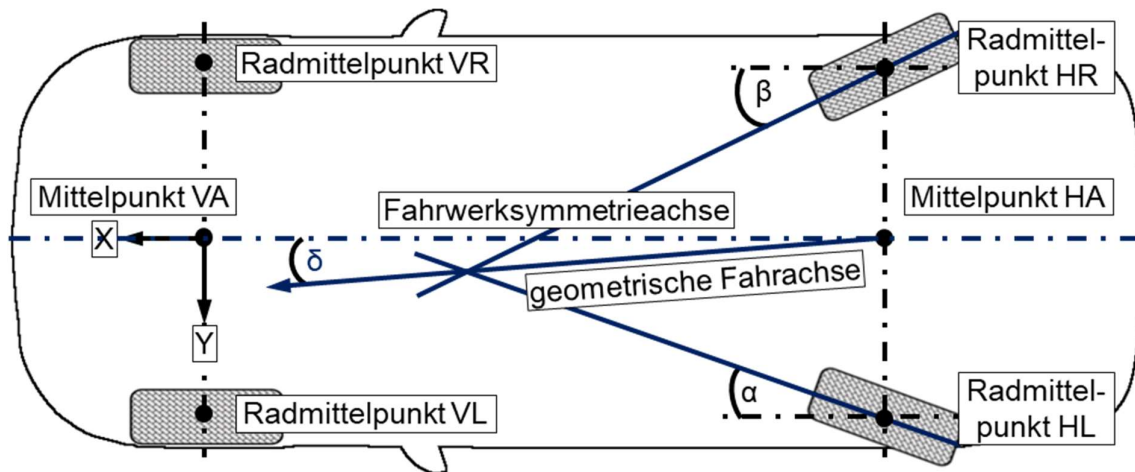


Abbildung 27 geometrische Fahrachse

Die geometrische Fahrachse gibt die Fahrtrichtung bei gerader Lenkradstellung an und ist gleichzeitig die Bezugsachse zur Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen.

2.2 Grundlagen der Fahrzeuginbetriebnahme

Die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge eines Fahrzeugs werden auf dem Fahrwerkstand durchgeführt. Das Fahrzeug ist zu diesem Zeitpunkt bereits fahrfertig. Die Montageumfänge sind, bis auf die Unterbodenverkleidung zur Erleichterung des Zugangs für die Fahrwerkeinstellung, abgeschlossen. Abbildung 28 zeigt einen Fahrwerkstand mit den Anlagenmodulen für die Fahrzeuginbetriebnahme.

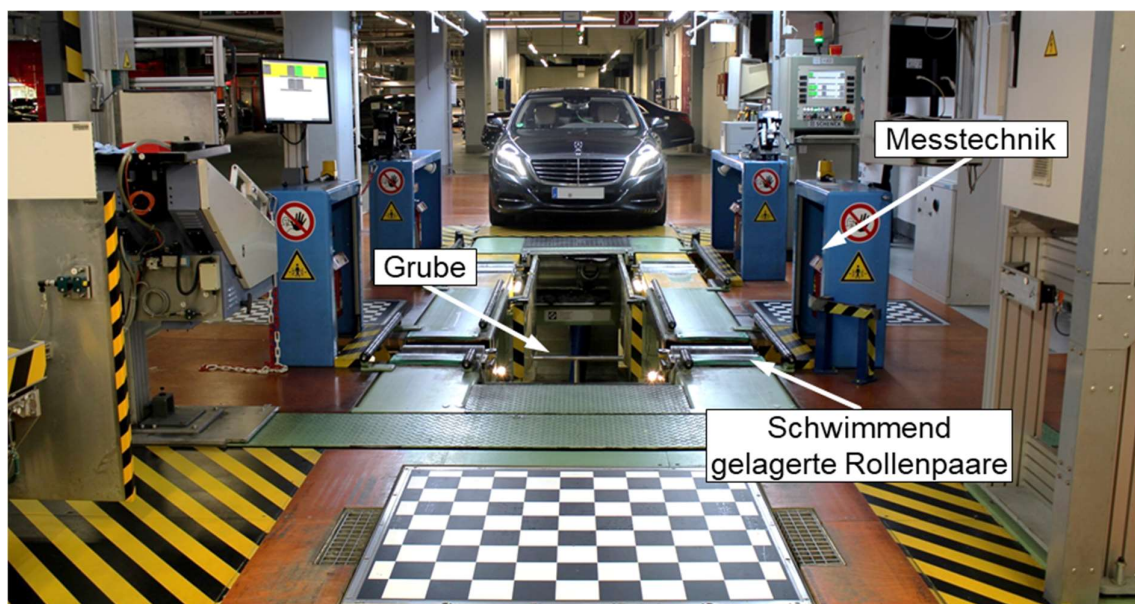


Abbildung 28 Fahrwerkstand

Die nachfolgenden Prüf- und Inbetriebnahmeinhalte des Fahrwerkstandes beziehen sich auf [Sch17, Pre11]. Die Kommunikation zwischen dem Fahrwerkstand und dem Fahrzeug wird mit einem Fahrzeugprüfsystem, welches mit der Diagnoseschnittstelle des Fahrzeugs verbunden ist, realisiert. Das Fahrzeugprüfsystem enthält den Prüfablauf und steuert den Fahrwerkstand. Ein Prüfablauf wird in Ablaufblöcke gegliedert, die Prüfsequenzen und Prüfschritte enthalten. [Rau16] Die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge eines Fahrzeugs werden in Modulen aufgeteilt. Die Anzahl an zu kalibrierenden Modulen hängt von der Sonderausstattung des Fahrzeugs ab. Ist beispielsweise ein Radarsensor des Abstandsregeltempomaten nicht verbaut, so muss dieser nicht kalibriert werden. Die Sollwerte für die Kalibriermodule werden in Kalibrier- und Inbetriebnahmevorschriften definiert. Die nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über die zu kalibrierenden Module:

- Niveaualibrierung
- Fahrwerkeinstellung
- Scheinwerfereinstellung
- Radarkalibrierung
- Stereokamerakalibrierung
- Rückfahrkamerakalibrierung
- Nachtsichtkamerakalibrierung
- Kommunikationsprüfung

Aus Gründen der Prozesszeitersparnis werden einige Kalibriermodule parallel durchgeführt. Die Kalibrierung der Module für die Fahrerassistenzsysteme kann jedoch erst nach erfolgter Fahrwerkeinstellung stattfinden, da die geometrische Fahrachse bekannt sein muss. Zusätzlich zu den Kalibriermodulen wird im Hintergrund die Prüfung von elektrischen und elektronischen Komponenten durchgeführt. Die Durchführung der Kalibrierung und Inbetriebnahme eines Fahrzeugs auf dem Fahrwerkstand läuft nach vordefinierten Prozessschritten ab. Der Prüfablauf beginnt mit der Einfahrt des Fahrzeugs auf den Fahrwerkstand. Hierzu muss das Fahrzeug zunächst die Fahrzeugdaten, wie beispielsweise die Produktionsnummer oder das Baumuster, an den Fahrwerkstand senden. Ist der Fahrwerkstand mit keinem Fahrzeug belegt wird der Radstand der Anlage auf den Radstand des einzufahrenden Fahrzeugs angepasst. Das Fahrzeug wird durch eine Person eingefahren. Nachdem die Person aus dem Fahrzeug ausgestiegen ist, setzt sie eine Lenkradwaage auf das Lenkrad des Fahrzeugs auf. Sobald die mechanische Lenkradwaage aus der Ablage entnommen wird, startet automatisch der Vorgang zur Positionierung und Fahrwerkvermessung. Die Person stellt mit der Lenkradwaage die Geradeausstellung des Lenkrades innerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs ein. Die Lenkradwaage übermittelt den Drehwinkel des Lenkrads an das Fahrzeugprüfsystem, sodass die Sollwerte für die Spureinstellung an der Vorderachse entsprechend des Lenkwinkels angepasst werden. Dies stellt sicher, dass das Lenkrad bei einer Geradeausfahrt waagrecht steht. Abbildung 29 zeigt eine auf dem Lenkrad fixierte mechanische Lenkradwaage.



Abbildung 29 mechanische Lenkradwaage

Die ersten Radumschläge während des Positioniervorganges dienen der Fahrzeugzentrierung und Fahrwerkentspannung. Dabei wird das Fahrzeug durch schwimmend gelagerte und angetriebene Rollenpaare auf die Längsachse des Fahrwerkstandes zentriert. Zum Zwecke der Positionierung werden auch Pusher eingesetzt. Die Pusher bestehen aus kleinen Rollen, die seitlich an die Radflanken angelegt werden. Dadurch kann das Fahrzeug auf dem Fahrwerkstand, durch gezieltes Andrücken der Rollen gegen die Radflanken, positioniert werden. Durch die korrekte Positionierung und Zentrierung des Fahrzeugs wird sichergestellt, dass sich die Messmittel im Messbereich befinden und die Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme durchgeführt werden kann. Nachdem die Fahrzeugzentrierung durchgeführt wurde, beginnt die Fahrwerkvermessung. Zunächst wird der Einfederungszustand über den Radmittelpunkt und den höchsten Punkt der Radhauskante über die externe Messtechnik ermittelt. Bei regelbaren Fahrwerken, wie beispielsweise Luftfahrwerken, findet nach der Eingangsniveaumessung die Niveauekalibrierung statt. Dabei wird das Fahrzeug, unter kontinuierlicher Messung der Niveauewerte und durch gezielte Ansteuerung der Niveaueventile, auf den Niveausollwert justiert. Das Fahrzeug befindet sich nach der Niveauekalibrierung im fahrfertigen Fahrzeugniveau. Die Niveaue regulierung findet bei Fahrzeugen mit einer Stahlfederung nicht statt. Hier wird der Einfederungszustand gemessen und direkt zur Sollwertberechnung der Fahrwerkgeometrie weitergeleitet. Die eigentliche Fahrwerkvermessung findet mit einer Laser- oder Kameramesstechnik statt. Die Fahrwerkvermessung erfolgt bei drehenden Rädern, um den Felgen- und Reifenschlag zu kompensieren. Die Messgenauigkeit der Anlage für die Spur- und Sturzwinkelvermessung beträgt $\pm 0,01^\circ$. Abbildung 30 zeigt ein Fahrzeug auf dem Fahrwerkstand nach der Zentrierung und Fahrwerkvermessung.



Abbildung 30 Fahrzeug auf dem Fahrwerkstand zentriert und vermessen

Im Anschluss an die Fahrwerkvermessung beginnt die Fahrwerkgeometrie- und Scheinwerfereinstellung. Die Scheinwerfereinstellung wird von der Person übernommen, die das Fahrzeug eingefahren hat. Die Fahrwerkeinstellung wird durch eine andere Person in der Grube des Fahrwerkstandes durchgeführt. Ist die Fahrwerkeinstellung an der Hinterachse außerhalb des Toleranzbereichs, so muss mit der Einstellung der Hinterachse begonnen werden, da die Spureinstellung der Vorderachse auf die geometrische Fahrachse bezogen wird. Nachdem die Einstellung der Spurwerte an der Hinterachse durchgeführt wurde, wird die Spureinstellung über die Spurstangen an der Vorderachse erledigt. Abbildung 31 zeigt die Einstellung des Fahrwerks an der Hinter- und Vorderachse von einer Person in der Grube des Fahrwerkstandes.

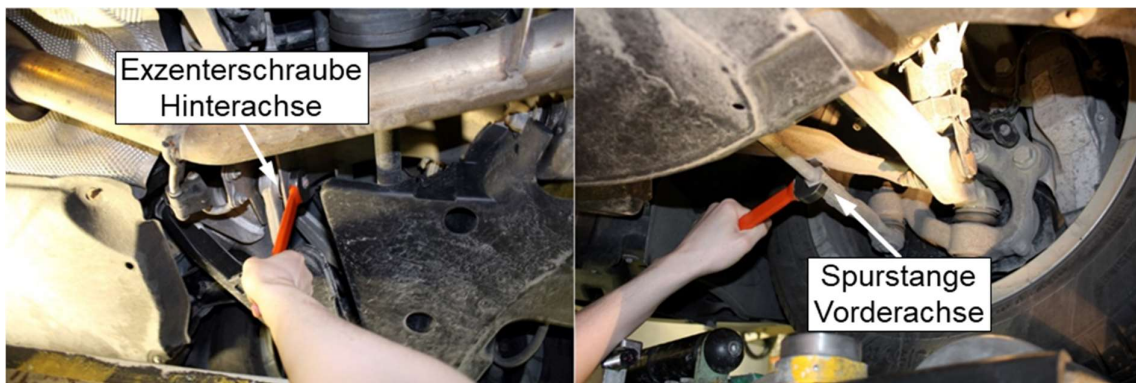


Abbildung 31 Fahrwerkeinstellung an Hinter- und Vorderachse

Parallel zur Fahrwerkeinstellung wird die Scheinwerfereinstellung durchgeführt. Hierzu wird ein Lichtsammelkasten über ein Portal zum einzustellenden Scheinwerfer geführt. Eine im Lichtsammelkasten integrierte Kamera wertet die Hell- und Dunkelgrenze aus und gibt diese auf einem Monitor aus. Die horizontale und vertikale Einstellung der

Scheinwerfer wird über Einstellschrauben mit einem Handschraubwerkzeug durchgeführt. Die horizontale Einstellung der Scheinwerfer berücksichtigt dabei die Ausrichtung der geometrischen Fahrachse. Abbildung 32 zeigt die Einstellung der Scheinwerfer mit einem Lichtsammelkasten.

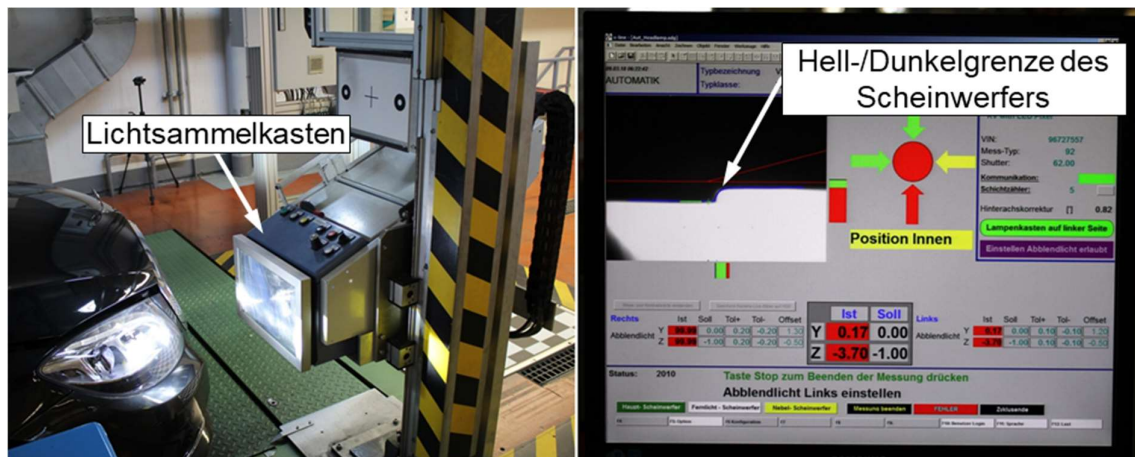


Abbildung 32 Scheinwerfereinstellung mit einem Lichtsammelkasten

Die Radar-, Stereokamera- und Nachtsichtkamerakalibrierung erfolgen über ein weiteres Portal. Diese Kalibriermodule können erst nach erfolgter Fahrwerkeinstellung durchgeführt werden. Außerdem muss die Scheinwerfereinstellung abgeschlossen sein, sodass keine Gefahr der Fehkalibrierung oder ein Abbruch der Kalibrierung durch vorbeilaufende Personen entsteht. Für die Kalibrierung der Radarsensorik und der Stereokamera wird eine Metallplatte, welche am Portal befestigt ist, vor das Fahrzeug automatisch eingefahren. Die Metallplatte dient der Kalibrierung des Höhenwinkels (Elevation) und des Seitenwinkels (Azimut) der Radarsensorik. Für die Kalibrierung der Stereokamera ist an der Metallplatte eine zusätzliche Platte mit einem Kalibriermuster angebracht. Nachdem die Metallplatte vor das Fahrzeug über das Portal eingefahren wurde, erfolgt eine Drehung der Metallplatte um die Hochachse, sodass die Metallplatte und die Platte mit dem Kalibriermuster senkrecht zur geometrischen Fahrachse ausgerichtet werden. Außerdem wird der Winkel der Zentrierung des Fahrzeugs zur Fahrwerkstandsymmetrieachse berücksichtigt. Die Kalibrierung der Radarsensorik und der Stereokamera beginnen automatisch nach der Ausrichtung der Metallplatte. Für die Kalibrierung der Nachtsichtkamera ist ebenfalls eine Platte mit einem Kalibriermuster am Portal angebracht. Das Kalibriermuster ist beheizt, da es sich bei der Nachtsichtkamera um eine Infrarotkamera handelt. Abbildung 33 zeigt das Portal mit der Metallplatte und den Kalibriermustern.



Abbildung 33 Radar-, Stereokamera- und Nachtsichtkamerakalibrierung

Die Kalibrierung der Rückfahr- bzw. 360°-Kamera findet ebenfalls auf dem Fahrwerkstand statt. Hierzu sind vor, hinter und seitlich zum Fahrzeug Kalibriermuster auf dem Hallenboden angebracht. Die Kalibrierung der Rückfahr- bzw. 360°-Kamera erfolgt ebenfalls nach der Scheinwerfereinstellung. Abbildung 34 zeigt typische Kalibriermuster zur Kamerakalibrierung auf dem Hallenboden.



Abbildung 34 Kalibriermuster für die Kamerakalibrierung

Parallel zum vordergründigen Prüfablauf laufen diverse Prüfumfänge im Hintergrund ab. Diese betreffen zumeist Fahrzeugkomponenten aus dem Kommunikations- und Infotainmentbereich. Es werden beispielsweise die Frequenzen der Radiobänder AM, FM, DAB sowie die Lautsprecherkontaktierungen und die GSM Antenne abgeprüft. Zusätzlich findet der Klimakompressoreinlauf statt. Nachdem alle Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge auf dem Fahrwerkstand beendet sind, entnimmt eine Person die mechanische Lenkradwaage und fährt das Fahrzeug aus der Anlage heraus. Zum Abschluss wird ein Prüfprotokoll für das Fahrzeug erstellt und archiviert.

2.3 Neuer Ansatz zur Durchführung von Kalibrierumfängen durch die Inline Fahrwerkgeometrievermessung

Die Hauptbestandteile und Voraussetzungen für die Durchführung einer korrekten Fahrwerkgeometrievermessung im klassischen Sinne sind die Planlaufkompensation, ein fahrfertiges Fahrzeugniveau, die Radlast für den Einfluss der Elastokinematik sowie eine parallele Ausrichtung zwischen dem Betriebsmittel und der Fahrzeugfahrbahnebene. Aus diesen Randbedingungen kann eine Präzisierung der Forschungsfrage in vier Aspekte abgeleitet werden:

- Kann die Planlaufkompensation durch die Wahl geeigneter Messobjekte bei der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung entfallen?
- Wie kann das fahrfertige Fahrzeugniveau ohne physische Einfederung des Fahrzeugs berücksichtigt werden?
- Wie kann der Einfluss der Radlast auf die Elastokinematik bei der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung kompensiert werden?
- Wie wird sichergestellt, dass eine parallele Ausrichtung zwischen dem Betriebsmittel und der Fahrzeugfahrbahnebene während dem Messvorgang eingehalten wird?

Zur Lösung der vier Forschungsaspekte werden die konventionellen Bestandteile einer Fahrwerkgeometrievermessung durch alternative Lösungen sowie durch den Einsatz neuer Technologien substituiert. Der neue Ansatz zur Durchführung von Kalibrierumfängen durch die Inline Fahrwerkgeometrievermessung basiert auf einem kompakten und berührungslosen Betriebsmittel, einem alternativen Messobjekt sowie der Unterstützung durch datengetriebene Lösungen. Damit werden die Nachteile von taktilen Betriebsmitteln, wie beispielsweise hohe Investitionskosten, hoher Platzbedarf und die komplexe Implementierung in bereits bestehenden Montagehallen, umgangen.

Für die Planlaufkompensation müssen konventionelle taktile Betriebsmittel mit dem Fahrzeug adaptiert werden. Nach der Adaption führen diese Art von Betriebsmitteln eine Drehbewegung des Messobjekts durch. Durch diese Umschlagsmessung wird der Planlauf des Messobjekts detektiert und in den Messergebnissen kompensiert. Die Wahl eines neuen Messobjekts mit geringen Form- und Lagetoleranzen erlaubt es eine Fahrwerkgeometrievermessung ohne die Planlaufkompensation bzw. die Drehbewegung durchzuführen. Eine weitere Voraussetzung für eine korrekte Fahrwerkgeometrievermessung ist ein fahrfertiges Fahrzeug. Dadurch wird sichergestellt, dass sich das Fahrzeug in der fahrfertigen Niveaulage befindet und der Einfluss auf die Elastokinematik durch die Gewichtskraft ausgeübt wird. Konventionelle taktile Betriebsmittel stellen diesen Zustand her, indem das Betriebsmittel an das Fahrzeug adaptiert wird und das Fahrzeug in die geforderte Lage eingefedert wird. Im

neuen Ansatz der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung wird eine datengetriebene Lösung verwendet, um die Effekte der Einfederung in den Messergebnissen darzustellen. Die Fahrwerkgeometrievermessung findet im neuen Ansatz im ausgefederten Zustand statt. Durch baureihenspezifische Fahrwerkgeometrieänderungskurven werden die gemessenen Fahrwerkgeometriewinkel auf das fahrfertige Fahrzeugniveau angepasst. Der Einfluss der statischen Radlast auf die Elastokinematik des Fahrwerks wird durch Korrekturwerte ausgehend vom Änderungsverhalten der Fahrwerkgeometriewinkel über der statischen Radlast kompensiert. Das fahrfertige Fahrzeugniveau sowie die Radlast werden durch datengetriebene Prädiktionsalgorithmen vorhergesagt. Diese alternativen Lösungen ermöglichen es, die Fahrwerkgeometrie im nicht fahrfertigen Zustand und ohne Einfederung des Fahrzeugs zu messen. Damit ist eine Adaption des Betriebsmittels an das Fahrzeug nicht nötig. Die Parallelität zwischen der Betriebsmittelebene und der Fahrzeugfahrbahnebene wird bei konventionellen Betriebsmitteln zur Fahrwerkgeometrievermessung durch die Messung des Fahrzeugniveaus erreicht. Bei der Einfederung des Fahrzeugs wird die Niveaulage über die Radmittelpunkte und der Radhauskante bestimmt. Dadurch ist eine zielgenaue Einfederung auf das fahrfertige Fahrzeugniveau gewährleistet und die Parallelität hergestellt. Dies ist bei konventionellen Betriebsmitteln zur Fahrwerkgeometrievermessung notwendig, da die eingesetzten Messmittel keine Bewegungen im Raum durchführen können. Ein mathematisches Rechenmodell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung für den neuen Ansatz der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung ermöglicht es die Fahrwerkgeometrie in jedem beliebigen Winkel zwischen der Fahrzeugfahrbahnebene und der Betriebsmittelebene zu vermessen. Eine Parallelität zwischen den beiden Ebenen ist nicht zwingend notwendig. Der neue Ansatz für eine nicht taktile Messung der Fahrwerkgeometrie reduziert das Betriebsmittel auf ein Minimum bezüglich der benötigten Technologien. Das neue Betriebsmittel kann entsprechend kompakt und vergleichsweise simpel ausgeführt werden. Abbildung 35 stellt eine Zusammenfassung der Hauptbestandteile und Voraussetzungen der Fahrwerkgeometrievermessung sowie die entsprechenden Lösungsansätze des neuen Ansatzes grafisch dar.

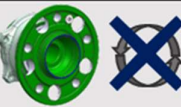



Konventionelle taktile Betriebsmittel	Voraussetzungen für eine korrekte Fahrwerksgeometrievermessung	Neuer Ansatz für ein nicht taktiles Betriebsmittel
Drehbewegung	Planlaufkompensation	Messobjekt ohne Planlauftoleranz 
Einfederung	fahrfertiges Fahrzeug bzw. K0-Lage	Korrekturwerte 
Einfederung	Elastokinematikkompensation	Korrekturwerte 
Niveaubestimmung	Parallelität zwischen Betriebsmittel- und Fahrzeugfahrbahnebene	mathematisches Rechenmodell 

Abbildung 35 Voraussetzungen der Fahrwerkvermessung und Lösungsansätze

Im Anschluss an die Inline Fahrwerkgeometrievermessung kann eine Inbetriebnahme und Kalibrierung von Verbänden auf Basis der geometrischen Fahrachse in der Montagelinie stattfinden. Durch die Inline Fahrwerkgeometrievermessung werden weitere Potentiale geschaffen, um die Inbetriebnahmeverfahren vorzuziehen und die Prozesszeit auf dem Fahrwerkstand auf den Hallentakt zu reduzieren. Da der Fahrwerkstand den Flaschenhals in den Montagehallen bezüglich der Prozesszeit darstellt hat die Prozesszeitreduktion einen hohen Stellenwert, um eine durchgängige Einlinigkeit in der Fahrtechnik zu erreichen.

3 Planung und Konzeption der Inline Fahrwerkgeometrievermessung

In diesem Kapitel werden geeignete Messobjekte für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung mit ihren Toleranzen vorgestellt. Hieraus wird ein geeignetes Messobjekt abgeleitet und in experimentellen Voruntersuchungen analysiert. Aus den dabei gewonnen Erkenntnissen folgen die produktspezifischen Einflussfaktoren, die im weiteren Verlauf einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der Fahrwerkgeometrievermessung ausüben und deshalb weiter untersucht werden müssen. Anhand der produktspezifischen Bedarfe wird das Betriebsmittel ausgestaltet. Hierzu wird zunächst eine Technologierecherche durchgeführt und abschließend das Betriebsmittel auf Basis der geforderten Messgenauigkeiten, Produktspezifikationen und Toleranzen konstruiert. Zur späteren Validierung des Betriebsmittels werden betriebsmittelspezifische Einflussfaktoren definiert. Es wird ein Prozess erarbeitet, der es ermöglicht die Fahrwerkgeometrie auf dem Messobjekt in der Montagelinie mithilfe des Betriebsmittels zu vermessen. Die gesamtheitliche Betrachtung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel ermöglicht es eine abschließende Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse durchzuführen bevor die reale Umsetzung erfolgt.

3.1 Produkt

Dieses Kapitel behandelt die produktspezifischen Inhalte für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung. Als Produkt wird im Nachfolgenden das Gesamtfahrzeug verstanden. Für die Messaufgabe werden unterschiedliche Objekte vorgestellt und bezüglich ihrer Toleranzen miteinander theoretisch verglichen. In experimentellen Voruntersuchungen werden die Messobjekte weiter analysiert, sodass eine Auswahl getroffen werden kann.

3.1.1 Messobjekt

Als Messobjekt für die Fahrwerkgeometrievermessung eignen sich unterschiedliche Bauteile. Das wesentliche Ziel dabei ist es, die räumliche Lage der Raddrehebene und der Raddrehachse zu ermitteln um damit die Winkel der Fahrwerkgeometrie berechnen zu können. Dabei wird heutzutage im Werkstattbereich sowie im Fahrzeugmontagewerk auf Reifen und Felgen gemessen. Außerdem ist es möglich die Fahrwerkgeometrie auf dem Bremsring, dem Bremstopf sowie auf dem Radflansch zu messen. Abbildung 36 zeigt eine Auswahl an möglichen Bauteilen für die Fahrwerkgeometrievermessung.

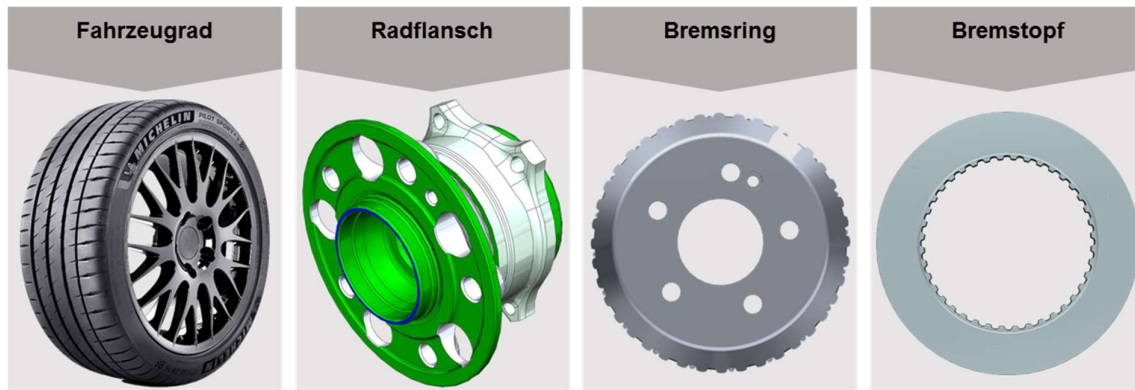


Abbildung 36 Bauteile zur Umsetzung einer Fahrwerkvermessung [vgl. Tyr18]

Die vorgestellten Bauteile sind mit Form- und Lagetoleranzen behaftet, die es notwendig machen kompensiert zu werden. Bei der Messung auf Rädern entsteht der größte Einfluss durch den Felgenschlag. Außerdem können die Vulkanisierung von Reifenbezeichnungen und Markenlogos einen negativen Einfluss auf das Messergebnis haben. Der Felgenschlag beschreibt eine Taumelbewegung der Drehebene bzw. der Drehachse. Der Felgenschlag entsteht durch die Fertigungstoleranzen und kann auch als Formabweichung zu einer ideal planen Scheibe verstanden werden. Um den Felgenschlag zu kompensieren, wird der Felgenumfang vollständig erfasst indem eine oder mehrere Radumdrehungen durchgeführt werden. Dieser Vorgang wird auch als Radumschlagsmessung oder Planlaufkompensation bezeichnet. Dabei wird der Taumelwinkel, der dem Winkel zwischen der momentanen Raddrehebene und der idealen Raddrehebene entspricht, ermittelt und als Korrekturwert bei der Berechnung der Fahrwerkgeometrie berücksichtigt. Der Taumelwinkel stellt sich ebenfalls zwischen der idealen und der momentanen Drehachse ein. Bei der momentanen Raddrehebene handelt es sich entweder um eine einzelne Momentaufnahme oder um eine Ausgleichsradrehebene aller gemessenen Formabweichungen. [Bos06] Der Planlauffehler ist bei allen hier vorgestellten Messobjekten in unterschiedlicher Größe vorzufinden. Abbildung 37 zeigt die beiden Raddrehebene und Drehachsen mit dem dazugehörigen Taumelwinkel.

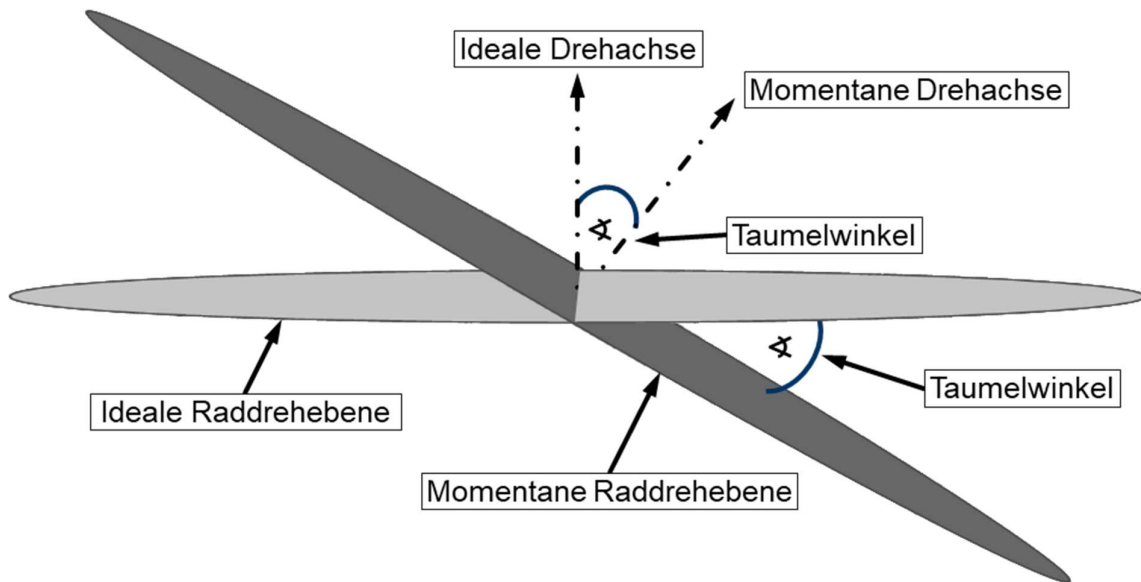


Abbildung 37 Raddrehebene und Taumelwinkel [vgl. Bos06]

Zur Verdeutlichung sowie zur Größeneinordnung werden in Abbildung 38 real gemessene Planlaufwerte an allen Rädern von unterschiedlichen Fahrzeugen auf dem Fahrwerkstand gezeigt.

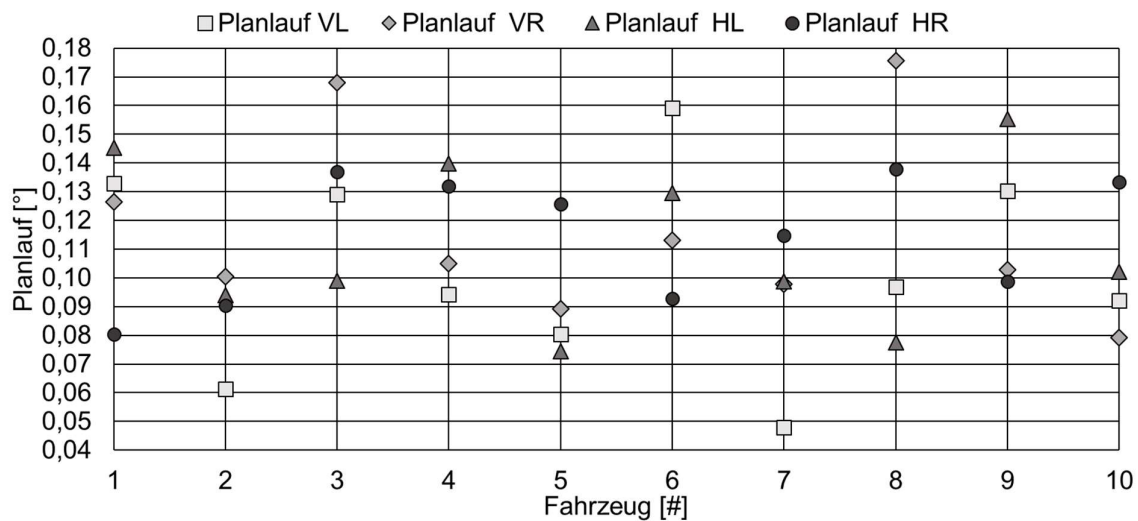


Abbildung 38 Planlauf von Fahrzeugen auf dem Fahrwerkstand

Der Planlauf erreicht Werte von bis zu $0,18^\circ$. Bei einer geforderten Messgenauigkeit von $\pm 0,01^\circ$ muss die Umschlagsmessung bei einer Fahrwerkgeometrievermessung auf dem Fahrzeugrad in jedem Fall durchgeführt werden. Die im nachfolgenden vorgestellten Toleranzen beziehen sich auf eine Verbundbremscheibe der Mercedes-

Benz S-Klasse der Baureihe 222. Der Durchmesser des Bremsrings beträgt 320 mm. Der Durchmesser des Bremstopfes beträgt 166 mm. Der Zentrierabsatz des Radflansches weist einen Durchmesser von 66,5 mm auf. Die Bauteile werden an Hinterachsen bei Fahrzeugen mit 4-, 6- und 8-Zylinder Serienmotorisierung verbaut. Weitere Toleranzen, die durch das Betriebsmittel oder das Fahrzeugsetzverhalten entstehen, werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Messung der Fahrwerkgeometrie auf dem Bremsring wird durch Form-, Lage- und Beschichtungstoleranzen, die in Tabelle 1 aufgezeigt sind, beeinflusst.

Tabelle 1 Toleranzen am Bremsring [Dai15]

Parameter	Wert	Bezug	Bemerkung
Planlauf	25 µm	zur Rotationsachse	
Welligkeit (DTV)	18 µm	bis 2 Wellen	disc thickness variation
Dickentoleranz Reibring	10 µm	bis 1 Welle	
Glättungstiefe	5 µm	Bremsring	R _p
Beschichtung	10 µm	Bremsring	Zinkstaubfarbe

In Summe ergibt sich eine maximale Abweichung von 68 µm auf dem Bremsring.

Die Messung der Fahrwerkgeometrie auf dem Bremstopf wird durch die nachfolgenden Form-, Lage- und Beschichtungstoleranzen beeinflusst. Tabelle 2 fasst die Toleranzen zusammen.

Tabelle 2 Toleranzen am Bremstopf [Dai15]

Parameter	Wert	Bezug	Bemerkung
Planlauf	50 µm	zur Rotationsachse	
Dickendifferenz	15 µm	Umlaufend	Maximalwert
Beschichtung	5 µm	Bremstopf	Korrosionsschutz

In Summe ergibt sich eine maximale Abweichung von 70 µm auf dem Bremstopf.

Problematisch bei der Messung auf der Verbundbremsscheibe (Bremsring und Bremstopf) ist die Tatsache, dass die Verbundbremsscheibe mit dem Radflansch nur über eine Transportschraube befestigt ist. Dies führt dazu, dass die Verbundbremsscheibe auf der Anlagefläche des Radflansches nicht passgenau anliegt. Dadurch entsteht ein Spalt zwischen der Verbundbremsscheibe und dem Radflansch, der zu einem Winkelfehler führt, der weitaus größer ist als der Felgenslag und deshalb ebenfalls durch einen Radumschlag kompensiert werden

muss. Die Verbundbremsscheibe liegt erst nach dem Verschrauben der Radfelge auf dem Radflansch an.

Die Messung der Fahrwerkgeometrie auf dem Radflansch wird durch die in Tabelle 3 aufgeführte Toleranz beeinflusst.

Tabelle 3 Toleranzen am Radflansch [Dai17]

Parameter	Wert	Bezug	Bemerkung
Planlauf	30 µm	zur Rotationsachse	

In Summe ergibt sich eine maximale Abweichung von 30 µm auf dem Radflansch.

Werden die theoretisch maximal ermittelten Abweichungen auf die jeweiligen Durchmesser der Bauteile bezogen, so ist es möglich den auftretenden Taumelwinkel zu berechnen. Zusammenfassend sind in Tabelle 4 die berechneten und gemessenen Taumelwinkel der unterschiedlichen Bauteile aufgetragen.

Tabelle 4 Taumelwinkel an verschiedenen Bauteilen [Bos06]

Bauteil	Durchmesser	Taumelwinkel durch Toleranzen
Rad	330,2 mm - 431,8 mm (13"-18")	> +/- 0,016°
Bremsring	320 mm	+/- 0,006°
Bremstopf	166 mm	+/- 0,012°
Radflansch	66,5 mm	+/- 0,013°

Da die Inline Fahrwerkgeometrievermessung berührungslos erfolgen soll, kann eine Radumschlagsmessung nicht durchgeführt werden. Das Fahrzeug kann die Drehbewegung im Montagewerk ebenfalls nicht selbstständig ausführen, da der Aufbauzustand dies nicht zulässt. Aus diesem Grund kann der Taumelwinkel nicht kompensiert werden, sodass eine Fahrwerkvermessung auf dem Fahrzeugrad, welches Taumelwinkel von bis zu 0,18° aufweist, sowie auf der Verbundbremsscheibe, die aufgrund der Transportschraube nicht bündig auf dem Radflansch aufliegt, nicht weiter betrachtet werden. Der Radflansch weist im Vergleich zu den anderen Bauteilen den geringsten Taumelwinkel bzw. Planlaufabweichung auf und wird daher als Messobjekt ausgewählt.

3.1.2 Experimentelle Voruntersuchungen

Die theoretische Betrachtung zuvor wird in diesem Abschnitt durch experimentelle Untersuchungen und Messdaten aus unterschiedlichen Quellen an den einzelnen Bauteilen, außer am Fahrzeugrad und an der Verbundbremsscheibe, überprüft. Dabei wird primär der Spurwinkel betrachtet, da dieser die geometrische Fahrachse bildet

und im Vergleich zum Sturzwinkel mit betragsmäßig kleineren Sollwerten und Einstelltoleranzen vorkommt.

Zur Durchführung der experimentellen Voruntersuchungen wird ein Hilfsmesssystem eingesetzt. Die Informationen über die Funktionsweise des Hilfsmesssystems beziehen sich auf [Kef18]. Dabei handelt es sich um ein Koordinatenmessgerät, welches für die Positionsbestimmung von Objekten im Raum eingesetzt wird. Der Lasertracker ist auf einem Tripod montiert und kann an beliebigen Stellen im Raum aufgebaut werden. Der Lasertracker erzeugt durch ein Laserinterferometer einen Laserstrahl. Das Laserinterferometer ist an zwei drehbaren Achsen montiert, welche motorisch bewegt werden können. Die Positionsbestimmung der drehbaren Achsen erfolgt über integrierte Winkelmesssysteme. Um den Laserstrahl manuell auf einen bestimmten Punkt zu richten, wird ein Reflektor benötigt. Der Reflektor besteht aus einer Metallkugel mit einer integrierten Reflektoroptik. Der Laserstrahl folgt der Reflektoroptik automatisch, da der Laserstrahl in die Empfängeroptik zurückgeworfen wird. Dabei bestimmt das Laserinterferometer den Abstand zum Reflektor und kann mit Hilfe der Winkelmesssysteme die Position im Raum des Reflektors ermitteln. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau des Faro Laser Trackers [Far18] sowie die Hinterachse auf einem Gestell.

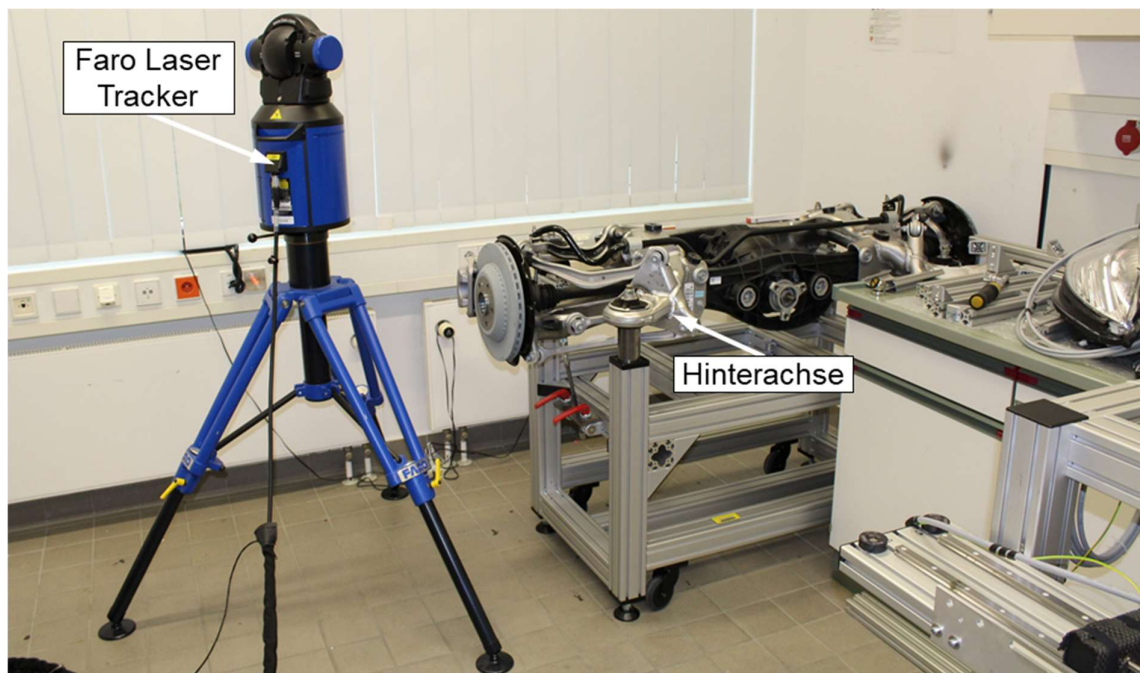


Abbildung 39 Faro Laser Tracker mit einer Hinterachse auf einem Gestell

Die zu vermessende Hinterachse wird in der Mercedes Benz S-Klasse der Baureihe 222 verbaut. Die hier gezeigte Achse wird in 6-Zylinder Dieselfahrzeugen mit Allradantrieb eingesetzt. Die mit dem Hilfsmesssystem gemessenen Spurwinkel werden mit der entsprechenden Prüfvorschrift sowie mit der Spurvoreinstellung im Achsmontagewerk verglichen. Abbildung 40 stellt die Ergebnisse der Spurwinkelmessung dar. Außerdem ist zur weiteren Verdeutlichung der Planlauf-toleranz eine Messung des Bremsrings aufgezeigt.

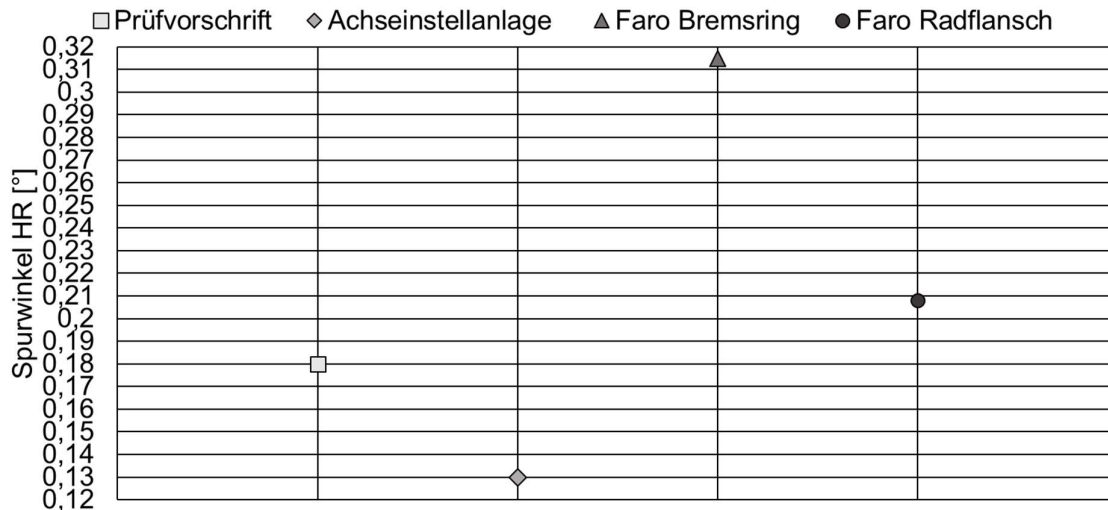


Abbildung 40 Spurmessung hinten rechts mit dem Hilfsmesssystem

Zur Interpretation der gemessenen Werte dient der Messwert der Vorspureinstellung in der Achseinstellanlage im Achsmontagewerk als Referenzwert. Die Achseinstellanlage bestimmt die Spurwinkel zur Prüfstands-symmetrieachse, sodass der Referenzwert mit einem Fehler behaftet ist. Die in den experimentellen Voruntersuchungen ermittelten Spurwinkel sind auf die Hinterachssymmetrieachse bezogen. Dieser Fehlereintrag kann nicht kompensiert werden, da in der Achseinstellanlage die Radmittelpunkte nicht messtechnisch erfasst werden. Der Referenzwert der Achseinstellanlage ist auf das Niveau der gemessenen Hinterachse umgerechnet, da die Achseinstellanlage im K0-Niveau misst. Die Hinterachse wurde im entspannten Zustand gemessen. Im entspannten Zustand weist die Hinterachse ein Niveau von 24 mm Ausfederung auf. Bei der Messung wurde kein Radumschlag durchgeführt. Die größte Differenz von $0,185^\circ$ besteht zwischen der Messung des Bremsrings und der Achseinstellanlage. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verbundbrems-scheibe Form- und Lagetoleranzen aufweist, die mit einem Radumschlag kompensiert werden müssen. Der größte Anteil an der Differenz ist jedoch die Tatsache, dass die Verbundbrems-scheibe nur mit einer Transportschraube am Radflansch gesichert ist. Der entstehende Spalt führt dazu, dass der Taumelwinkel

weiter ansteigt und eine Fahrwerkvermessung ohne Radumschlag auf der Verbundbremscheibe nicht möglich ist. Die gemessene Spurwinkeldifferenz zwischen dem Radflansch und der Achseinstellanlage beträgt $0,078^\circ$. Einen entscheidenden Faktor, der zu dieser Differenz führt, leistet die unterschiedliche Federkraft, unter der die Hinterachse gemessen wurde. Die Achseinstellanlage misst die Fahrwerkgeometrie der Hinterachse im eingefederten Zustand. Im entspannten Zustand werden die elastokinematischen Einflüsse der Gummilagerung durch die statische Federkraft allerdings nicht berücksichtigt. Ein weiterer Anteil der Spurwinkeldifferenz wird durch die Form- und Lagetoleranzen des Radflansches eingebracht. Die Messoberfläche des Zentrierabsatzes des Radflansches ist durch die spanende Bearbeitung mit feinen Rillen versehen. In Abhängigkeit, ob auf einem Hochpunkt oder einem Tiefpunkt gemessen wird, wird das Messergebnis mit einem Fehler behaftet. Der Radflansch weist ebenfalls einen Taumelwinkel auf, der jedoch niedriger ist als beispielsweise bei der Verbundbremscheibe oder am Fahrzeugrad. Abbildung 41 zeigt den Planlauf auf der linken und rechten Seite unterschiedlicher Hinterachsen, die in der Achseinstellanlage auf der Auflagefläche des Radflansches gemessen wurden.

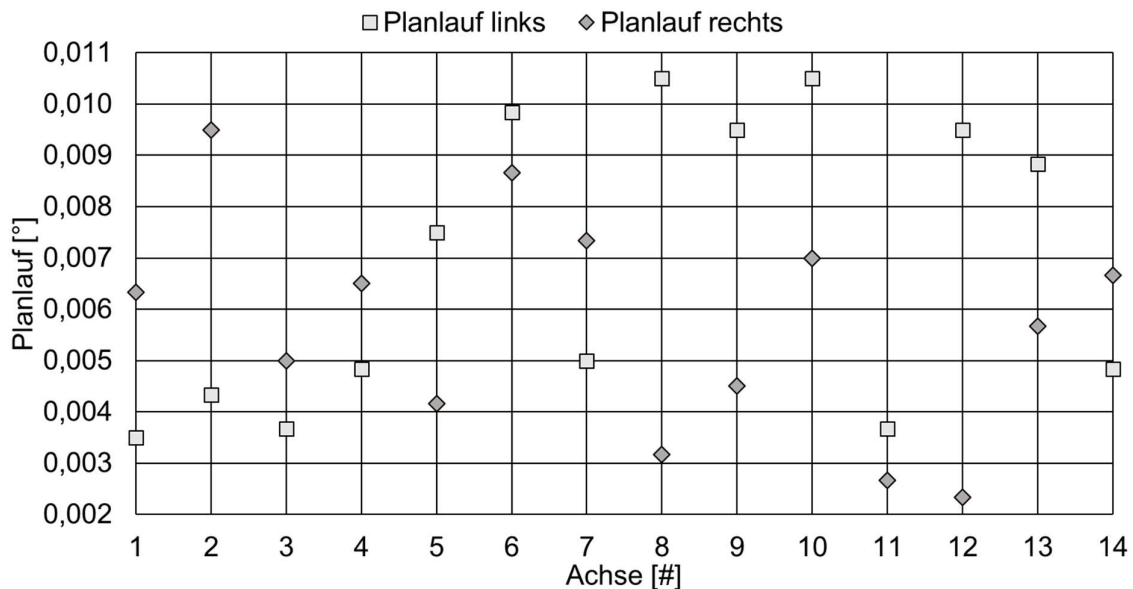


Abbildung 41 Planlauf am Radflansch gemessen auf der Achseinstellanlage

Die Messungen zeigen, dass der Taumelwinkel des Radflansches vergleichsweise gering ist. Die Messwerte liegen unterhalb der zuvor theoretisch betrachteten Toleranzen am Radflansch. Der geringe Fehlereintrag durch den Taumelwinkel erlaubt es die Fahrwerkgeometrievermessung auf dem Radflansch, ohne die Notwendigkeit zur Durchführung eines Radumschlages, umzusetzen.

3.1.3 Definition von produktspezifischen Einflussfaktoren

Die Messobjektbetrachtung sowie die experimentellen Voruntersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche produktspezifische Einflüsse bei der Fahrwerkgeometrievermessung zu beachten sind. Zum einen muss der elastokinematische Einfluss der Federkraft auf die Fahrwerkgeometrie bei der Messung kompensiert werden. Die Winkel der Fahrwerkgeometrie sind niveauabhängig. Eine Aus- bzw. Einfederung bewirkt eine Änderung der Spur- und Sturzwinkel. Da die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung bei vollausgefedertem Zustand stattfindet, muss das Niveauänderungsverhalten der Spur- und Sturzwinkel angewendet werden, um die gemessene Fahrwerkgeometrie auf eine fahrfertige Fahrzeuglage zurückführen zu können. Die experimentellen Voruntersuchungen zum Einfluss des Taumelwinkels des Radflansches auf die Fahrwerkgeometrievermessung haben im Vergleich zu anderen Fahrzeugbauteilen die besten Ergebnisse gezeigt. Dieser Fehlereintrag kann bei der berührungslosen Messung nicht kompensiert werden, da eine Radumschlagsmessung nicht möglich ist. In Abhängigkeit vom Messobjekt hat der Taumelwinkel den größten Einfluss auf eine korrekte Fahrwerkgeometrievermessung. Die Messoberfläche spielt für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung ebenfalls eine Rolle. Der Einfluss entsteht durch die spanende Bearbeitung des Radflansches und wirkt sich in einer rauen und welligen Messoberfläche aus. Zusammenfassend sind nachfolgend die produktspezifischen Einflussfaktoren mit den entsprechenden Faktorstufen in Tabelle 5 definiert.

Tabelle 5 produktspezifische Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Faktorstufe1	Faktorstufe2	Faktorstufe3	Faktorstufe4
Federkraft	ja	nein		
Federweg	-110 mm	-80 mm	K0	+80 mm
Position Radflansch	0°	120°	240°	
Messoberfläche	glatt	rau		

Die produktspezifischen Einflussfaktoren und ihre Faktorstufen werden im Rahmen der Durchführung von Versuchsplänen untersucht und analysiert.

3.2 Betriebsmittel

Zur Erreichung der hohen Messgenauigkeitsanforderungen werden in diesem Kapitel geeignete Messtechnologien recherchiert. Nach Festlegung der Messtechnologie wird das Betriebsmittel konstruiert, sodass die produkt- und prozessspezifischen Anforderungen für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung erfüllt werden können.

3.2.1 Technologierecherche

Für die Vermessung der Fahrwerkgeometrie in der Montagelinie wird ein geeignetes Messmittel benötigt. Die Technologierecherche zeigt unterschiedliche Möglichkeiten auf, die es erlauben Distanzen und Winkel zu messen. Bei der Messung von Distanzen werden die Winkel der Fahrwerkgeometrie über ein mathematisches Rechenmodell im Anschluss berechnet. Die Technologierecherche beinhaltet eine Erläuterung des Messprinzips sowie die Vor- und Nachteile der entsprechenden Messtechnologie. Der Einsatz des Messmittels im Bereich der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung erfordert eine sehr hohe Messgenauigkeit bezüglich dem Radflansch als Messobjekt, bedingt durch die geforderte Messgenauigkeit der Fahrwerkgeometriewinkel von $\pm 0,01^\circ$ und dem Verzicht auf den Radumschlag. Die Technologierecherche beinhaltet ausschließlich berührungslose Messmittel.

Lasertriangulationssensor

Ein Lasertriangulationssensor erlaubt es Distanzen mit Hilfe des Triangulationsprinzips zu vermessen. Dabei wird ein Lichtpunkt von einem Sender, der als LED oder Laserdiode ausgeführt sein kann, durch eine Auskoppeloptik in einem Lichtbündel auf ein Messobjekt gestrahlt. Die Oberfläche des Messobjektes reflektiert das Licht und strahlt es über eine Einkoppeloptik in die Detektionsebene des Aufnahmeelementes des Lasertriangulationssensors zurück. Das Aufnahmeelement kann beispielsweise aus einem Zeilensensor bestehen. Im Aufnahmeelement erscheint das zurückreflektierte Licht als Lichtverteilung mit einer Schwerpunktposition. In Abhängigkeit der Position des zurückreflektierten Laserstrahls auf dem Aufnahmeelement oder durch Verschiebung des Messobjektes ändert sich der Lichtschwerpunkt. Über eine Winkelbeziehung wird eine Distanz errechnet, die den Abstand des Messobjektes vom Lasertriangulationssensor angibt. [Her18] Die Messwerte können über Schnittstellen abgegriffen werden. Abbildung 42 stellt das Messprinzip grafisch dar.

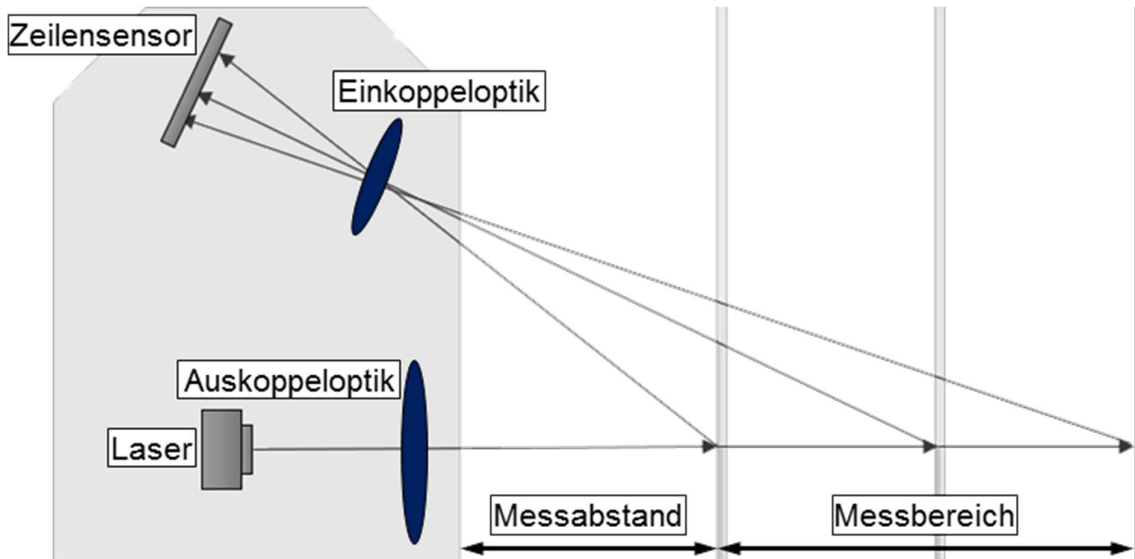


Abbildung 42 Messprinzip eines Lasertriangulationssensor [vgl. Lap15]

Der Messbereich, die Messgenauigkeit und die Auflösung hängen von der zu messenden Distanz und damit dem Messabstand ab. Messobjekte mit geringem Abstand zum Lasertriangulationssensor erzeugen größere Änderungen der Schwerpunktposition auf dem Aufnahmeelement. Befindet sich das Messobjekt in größerer Distanz zum Lasertriangulationssensor wird die Messgenauigkeit negativ beeinflusst, da der detektierte Laserstrahl eine geringe Lageänderung der Schwerpunktposition hervorruft. Die Messgenauigkeit wird bei Lasertriangulationssensoren über die Linearität definiert. Die Linearität gibt die Abweichung des Messwertes vom tatsächlichen Wert über den Messbereich in Prozent an. [Deu00] Die Messgenauigkeit kann bei rauen Oberflächen über die Laserspotform gesteigert werden. Dabei wird anstatt eines Laserpunktes eine Linie oder Ellipse verwendet. Dies hat zur Folge, dass das zurückreflektierte Laserlicht gemittelt wird. Lasertriangulationssensoren zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit und ihren relativ günstigen Preis aus. Die Messfrequenz bei Lasertriangulationssensoren ist hoch und das simple Messprinzip erlaubt eine kompakte Bauweise. Eine hohe Messgenauigkeit bei einem großen Messabstand hat zur Folge, dass der nutzbare Messbereich vergleichsweise klein ausfällt. [Lan16]

Laserlinienscanner

Der Laserlinienscanner kann Oberflächen unter Einsatz des 2D-Triangulationsprinzips abtasten. Das Messprinzip des Laserlinienscanners ist analog zum Messprinzip des Lasertriangulationssensors. Beim Laserlinienscanner wird eine Laserlinie über eine Auskoppeloptik auf das Messobjekt gestrahlt. Die zurückreflektierte Linie, die aus einer Vielzahl an einzelnen Punkten besteht, wird über eine Einkoppeloptik auf einem Matrixsensor abgebildet. Über die Intensitätsverteilung auf dem Matrixsensor werden,

mit Hilfe der Winkelbeziehung zum ausgestrahlten Laserstrahl, die Distanzwerte berechnet. [Mic18] Abbildung 43 zeigt das Messprinzip des Laserlinienscanners.

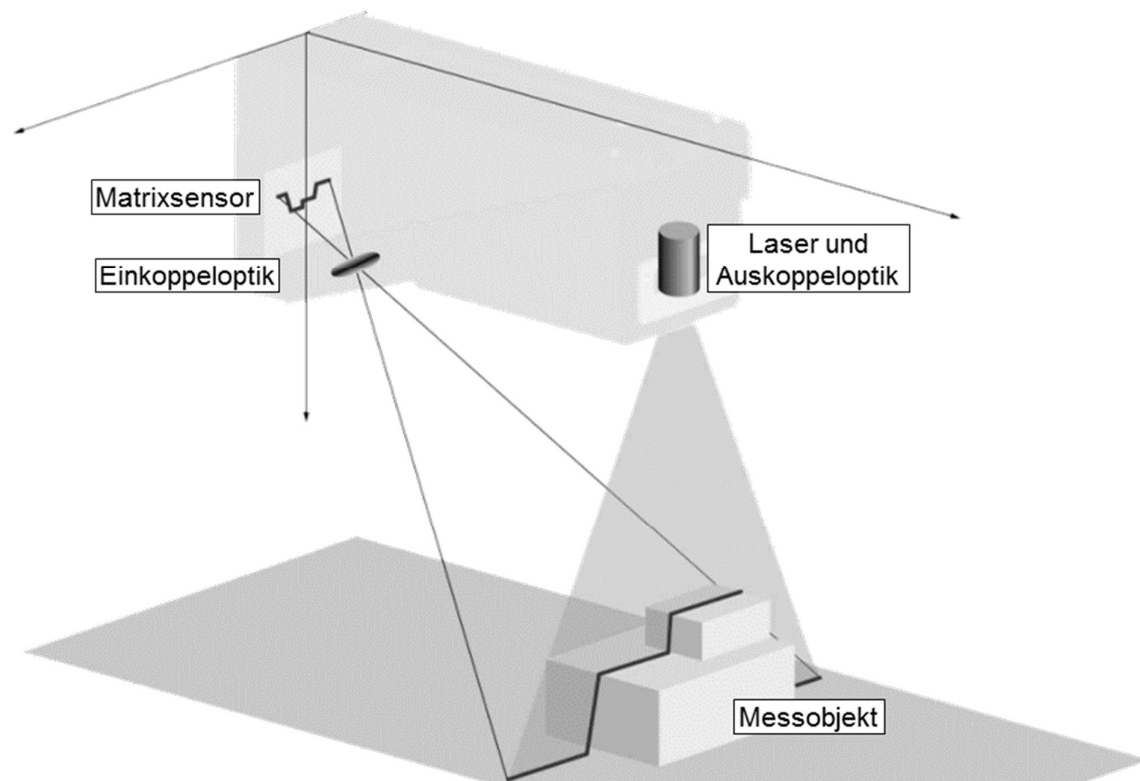


Abbildung 43 Messprinzip eines Laserlinienscanners [vgl. Leu18]

Laserlinienscanner erreichen nicht die hohe Genauigkeit eines Lasertriangulationsensors. Sie zeichnen sich durch eine hohe Messfrequenz und eine kompakte Bauform aus. Durch die ausgestrahlte Laserlinie kann bei einem Messdurchgang eine sehr hohe Anzahl an Messpunkten aufgenommen werden. Laserlinienscanner sind relativ teuer und weisen bei einem großen Messabstand und hoher Messgenauigkeitsanforderung einen kleinen Messbereich auf. [Lan16]

Autokollimator

Der Autokollimator kann direkte und hochgenaue Winkelmessungen durchführen und ist ebenfalls ein optisches Messinstrument wie der Lasertriangulationssensor. Der Autokollimator setzt sich aus einer Lichtquelle mit Kollimationsoptik, einer Lichtstrahlteilung sowie einem Empfangselement zusammen. Das Empfangselement ist um eine definierte Brennweite von der Kollimationsoptik entfernt. Der Autokollimator projiziert ein Bild eines Strichkreuzes im Unendlichen, sodass die Lichtstrahlen parallel aus dem Objektiv austreten. Das Messobjekt reflektiert das Strahlenbündel in den Autokollimator zurück, sodass sich das Strichkreuz auf dem Empfangselement

verschiebt. Über die Verschiebung des Strichkreuzes auf dem Empfangselement und der bekannten Brennweite kann der Winkel α des Messobjekts berechnet werden. [Nau74] Abbildung 44 stellt die Funktionsweise und das Messprinzip eines Autokollimators grafisch dar.

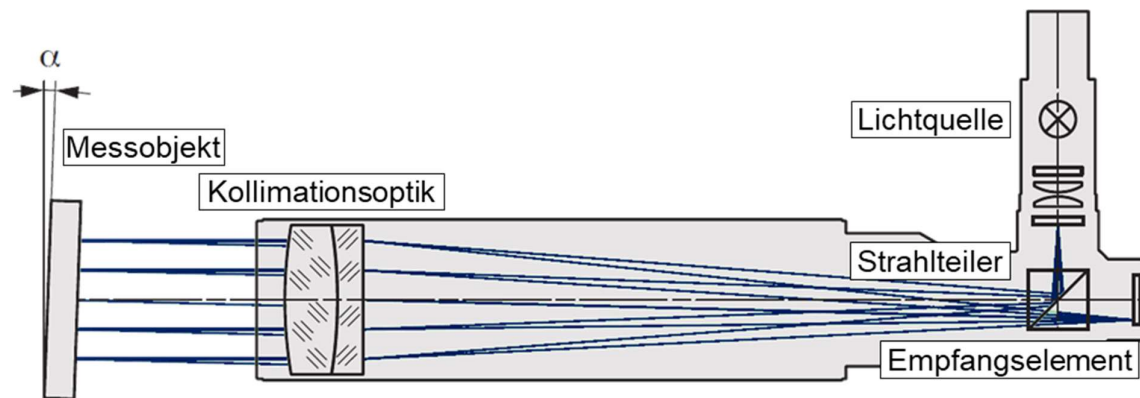


Abbildung 44 Messprinzip eines Autokollimators [vgl. Möl10]

Die Messgenauigkeit eines Autokollimators wird von der Brennweite bestimmt. Eine größere Brennweite führt dazu, dass kleinere Winkel detektiert werden können. Jedoch schränkt eine große Brennweite den Messbereich ein. Der Messbereich gibt dabei den maximalen Winkel an unter dem der rückreflektierte Strahl vom Messmittel noch detektiert werden kann. Der Autokollimator weist im Vergleich zum Lasertriangulationssensor eine noch höhere Genauigkeit auf. Das Messprinzip erlaubt eine direkte Winkelmessung. Dem gegenüber stehen ein relativ hoher Preis, ein kleiner Messbereich sowie die notwendigen Materialeigenschaften des Messobjekts. Messungen mit einem Autokollimator erfordern ein sehr hohes Reflexionsverhalten des Messobjekts. [Lan16]

Bildverarbeitungssystem mit einer oder mehreren Kameras

Ein Bildverarbeitungssystem mit einer oder mehreren Kameras kann ebenfalls zur berührungslosen Messung von Distanzen eingesetzt werden. Hauptbestandteil des Bildverarbeitungssystems ist eine Digitalkamera mit einem Objektiv. Der lichtempfindliche Matrix- oder Zeilensensor der Digitalkamera empfängt über das Objektiv die reflektierten Lichtstrahlen des Messobjekts und bildet sie auf den Pixeln des Bildsensors ab. Ein weiterer Bestandteil des Bildverarbeitungssystems ist die Beleuchtung, die je nach Einsatzzweck und -ort angepasst wird. Abbildung 45 stellt den Aufbau und eine Auswahl an Komponenten dar. Weitere Komponenten des Bildverarbeitungssystems betreffen die Kamerasteuerung, die Bild- und Signalverarbeitung sowie die entsprechenden Schnittstellen und Software zur Parametrierung und Auswertung. Die Messgenauigkeit ergibt sich aus einer Vielzahl von Parametern, wie beispielsweise dem Abstand zum Messobjekt, dem Sichtfeld, der

Auflösung sowie der Größe des Sensorchips. Der vielfältige Einsatz von Bildverarbeitungssystemen mit Kameras und die hohe Anzahl am Markt verfügbarer Hersteller erlaubt die Lösung verschiedenster Aufgaben. Nachteilig zu bewerten sind die hohe Anzahl an kostenintensiven Komponenten sowie die sehr hohe Komplexität bei der Umsetzung eines Bildverarbeitungssystems. [Lan16]

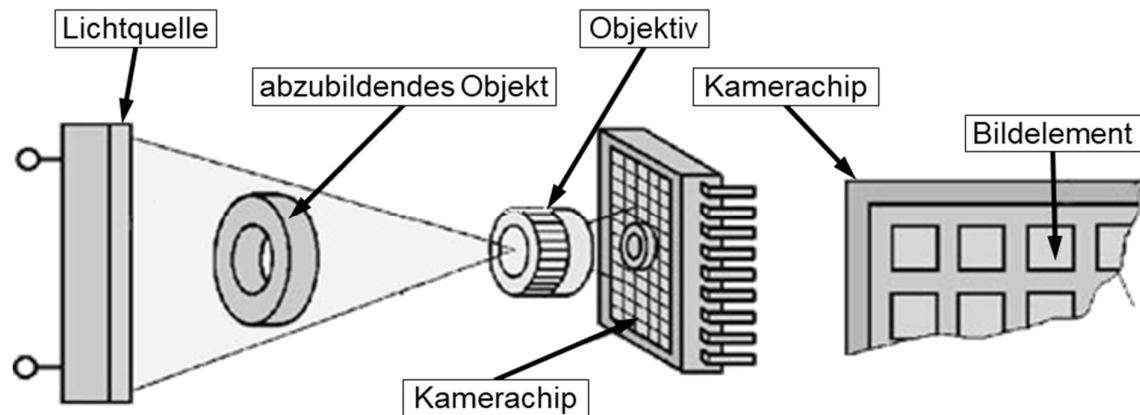


Abbildung 45 Aufbau eines Kamerasystems [vgl. Hes14]

Chromatisch-konfokaler Sensor

Chromatisch-konfokale Sensoren basieren auf dem Prinzip der chromatischen Dispersion. Dabei wird weißes Licht über eine Lochblende und eine Auskoppeloptik auf das Messobjekt geleitet. Durch die chromatische Dispersion wird das Licht in seine spektralen Anteile zerlegt, sodass am Messobjekt eine Wellenlänge λ besonders stark in das Messgerät zurückreflektiert wird. Ein Strahlteiler lenkt das Licht auf ein Spektrometer. Das Spektrometer detektiert die Wellenlänge des zurückreflektierten Lichts. Da jeder Wellenlänge eine Distanzinformation zugeordnet ist, kann der Abstand zum Messobjekt bestimmt werden. [Deu11] Abbildung 46 stellt den Strahlengang und das Messprinzip eines chromatisch-konfokalen Sensors grafisch dar.

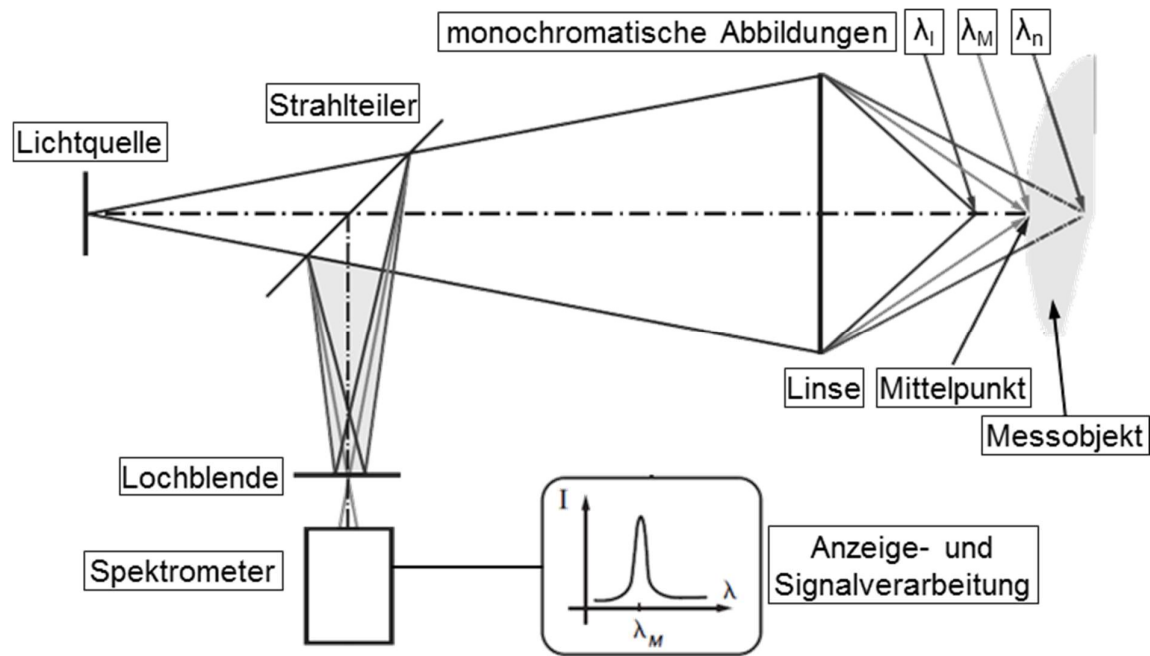


Abbildung 46 Messprinzip eines chromatisch-konfokalen Sensors [vgl. Pol16]

Chromatisch-konfokale Sensoren weisen eine hohe Genauigkeit bei einer kompakten Bauform auf. Allerdings sind die Sensoren relativ teuer und von den Materialeigenschaften des Messobjekts abhängig. Die Oberfläche des Messobjekts darf keine Unebenheiten aufweisen. Der Messbereich von chromatisch-konfokalen Sensoren ist relativ klein. [Lan16]

Kapazitive Wegsensoren

Kapazitive Wegsensoren basieren auf dem Prinzip eines idealen Plattenkondensators. Dabei bilden der Sensor sowie das Messobjekt jeweils eine Plattenelektrode. Die Distanz vom Wegsensor zum Messobjekt wird über den eingespeisten Wechselstrom ermittelt. Durch die Kalibrierung ist jedem Wechselstrom eine Distanz zugeordnet. [Hes14] Kapazitive Wegsensoren können eingesetzt werden, wenn das Material elektrisch leitfähig ist. Außerdem müssen das Messobjekt sowie die Umgebung sauber sein, da kapazitive Wegsensoren empfindlich gegenüber Schmutz, Feuchte und Staub reagieren. Der Messabstand sowie der Messbereich von kapazitiven Wegsensoren sind vergleichsweise klein. Vorteilhaft sind die hohe Messgenauigkeit und die Langzeitstabilität bei einer geringen Temperaturempfindlichkeit. [Gev99] Das Messprinzip eines kapazitiven Wegsensors ist in Abbildung 47 dargestellt.

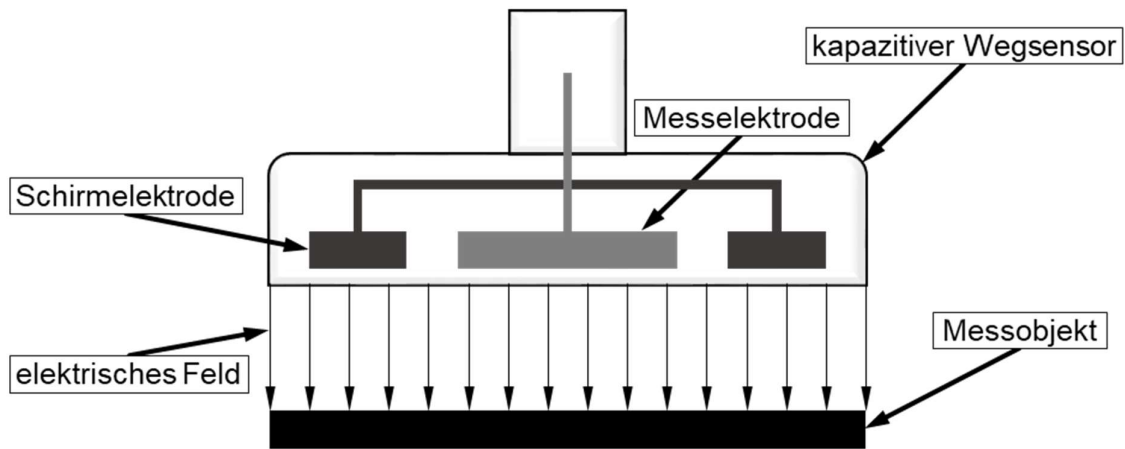


Abbildung 47 Messprinzip eines kapazitiven Wegsensors [vgl. Way19-1]

Magneto-induktive Wegsensoren

Diese Art der Wegsensoren nutzen das Prinzip des Energieentzugs von einem Schwingkreis. Dabei wird eine Spule mit einem Wechselstrom gespeist und ein Magnetfeld erzeugt. Befindet sich ein elektrisch leitfähiges Messobjekt im Messbereich des Sensors wird ein Magnetfeld im Messobjekt induziert. Das induzierte Magnetfeld wirkt entgegen dem Magnetfeld in der Spule, sodass sich die Impedanz der Spule ändert. [Trä14] Der Änderung der Impedanz ist durch die Kalibrierung eine Distanzinformation zugeordnet. Die Sensoren weisen eine hohe Messgenauigkeit auf und werden durch Schmutz und Staub nicht beeinträchtigt. Die Magneto-induktiven Wegsensoren zeigen jedoch eine hohe Nichtlinearität sowie eine erhebliche Temperatur- und Feuchteabhängigkeit auf. Der Messbereich sowie der Messabstand sind sehr klein. [Gev99] In Abbildung 48 wird das Messprinzip dargestellt.

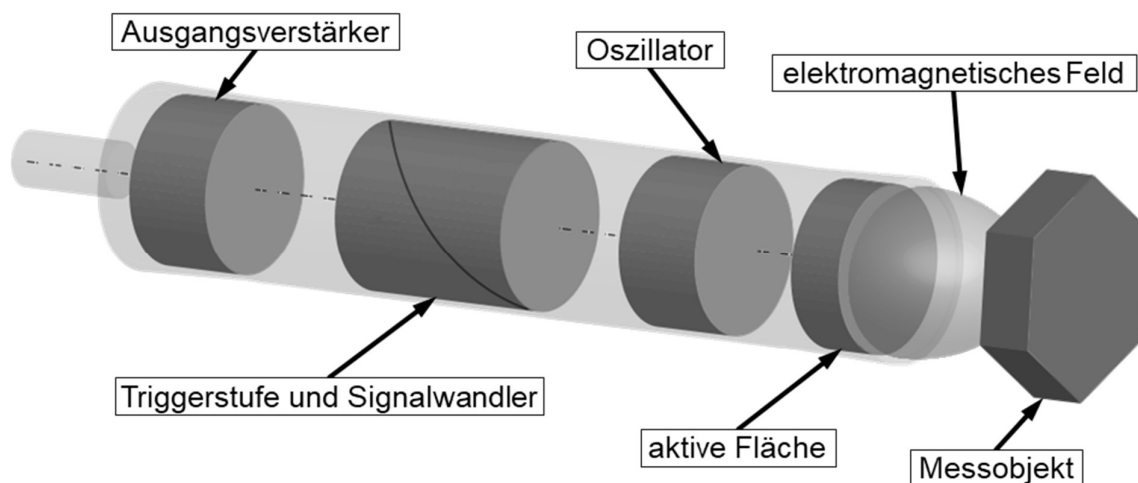


Abbildung 48 Messprinzip eines Magneto-induktiven Wegsensors [vgl. Way19-2]

Ergebnis der Technologierecherche

Die Technologierecherche hat gezeigt, dass eine Vielzahl von berührungslosen Sensoren für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung einsetzbar ist. Magneto-induktive Wegsensoren werden, aufgrund des sehr kleinen Messbereichs und Messabstandes, nicht weiter betrachtet. Die kapazitiven Wegsensoren eignen sich für die Messung des Radflansches nicht, da sie ebenfalls nur sehr kleine Messabstände erlauben. Chromatisch-konfokale Sensoren können auf dem Zentrierabsatz des Radflansches nicht eingesetzt werden, da die Materialoberfläche durch das Feindreihen zu große Unebenheiten aufweist. Die Komplexität von Bildverarbeitungssystemen mit Kameras und die Vielzahl an Einflüssen auf die Messgenauigkeit führen dazu, dass diese Art der Messtechnologie für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung nicht weiter betrachtet wird. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Materialeigenschaften und das Reflexionsverhalten des Messobjekts kann der Autokollimator auch nicht eingesetzt werden. Für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung eignen sich vor allem Lasersensoren, aufgrund ihres einfachen Messprinzips und der kompakten Bauform. Der Lasertriangulationssensor weist im Vergleich zum Laserlinienscanner eine noch höhere Messgenauigkeit bei einem größeren Messbereich und Messabstand auf. Da die aufzulösenden Winkel, im Bezug auf den Durchmesser des Messobjektes, sehr klein sind ist der Lasertriangulationssensor vor allem wegen der höheren Messgenauigkeit dem Laserlinienscanner vorzuziehen. Außerdem kann mit dem Lasertriangulationssensor ein größerer Messabstand im Vergleich zum Laserlinienscanner realisiert werden. Dadurch entsteht kein Risiko für Kollisionen mit der Fördertechnik oder dem Fahrzeug. Zur Umsetzung des Betriebsmittels wird daher der Lasertriangulationssensor gewählt. Das Betriebsmittel muss jedoch kinematisch mit umfangreicheren Positioniermöglichkeiten ausgestattet werden, da der Lasertriangulationssensor nur punktuell messen kann. Zur Gewährleistung der hohen Messgenauigkeit eines Lasertriangulationssensors ist eine steife und präzise gefertigte Konstruktion des Betriebsmittels notwendig. Ansonsten kann die hohe Messgenauigkeit durch die Fertigungs- und Montageteranzen des Betriebsmittels nicht gehalten werden.

3.2.2 Konstruktion und Automatisierungstechnik

Das Betriebsmittel misst mit einem Lasertriangulationssensor Abstände an unterschiedlichen Positionen auf dem Messobjekt, um anschließend die Winkel der Fahrwerkgeometrie zu berechnen. Hierzu ist es notwendig, dass das Betriebsmittel den Lasertriangulationssensor auf die vorgegebenen Messpositionen verfährt. Die Montage des Betriebsmittels erfolgt modular, sodass der Unterbau vom Rest des Betriebsmittels zu jeder Zeit getrennt werden kann. Dies erlaubt die Anbringung des Betriebsmittels an unterschiedlichen Orten. Der Unterbau wird mit einer Fußverstellung ausgeführt, um die Nivellierung des Betriebsmittels und die Höhenverstellung an die vor Ort gegebenen Bedingungen anzupassen. Zur Überprüfung der Nivellierung wird zusätzlich an den Betriebsmitteln ein Neigungssensor installiert.

Die Höhe des Laseraustritts bei der Hälfte des Hubes in Z-Richtung ist durch die Position der Fahrzeuge auf dem Montageband und entsprechend dem Messobjekt mit 730 mm definiert. Die Parallelität in Y-Richtung der Fahrwege ist entscheidend für eine korrekte Messung und aufgrund der Messgenauigkeitsanforderung von $\pm 0,01^\circ$ mit $10 \mu\text{m}$ toleriert. Die Positioniergenauigkeit der Kugelgewindespindel darf $0,1 \text{ mm}$ nicht überschreiten. Der Nutzhub der X-Achse ergibt sich aus dem Durchmesser des Messobjekts und den Radständen der zu messenden Fahrzeuge. Im Falle der Mercedes-Benz S-Klasse ist ein Nutzhub von 600 mm gefordert, da Fahrzeuge mit kurzem und besonders langem Radstand vermessen werden. Der Nutzhub der Z-Achse ergibt sich aus dem Durchmesser des Messobjekts und den unterschiedlichen K0-Niveaus von Serien- und Sportfahrzeugen (AMG). Zur Vereinfachung der Montage und des Transports sind am Betriebsmittel zusätzliche Transportösen angebracht. Abbildung 49 zeigt die Konstruktion des Betriebsmittels nach [Kir16].

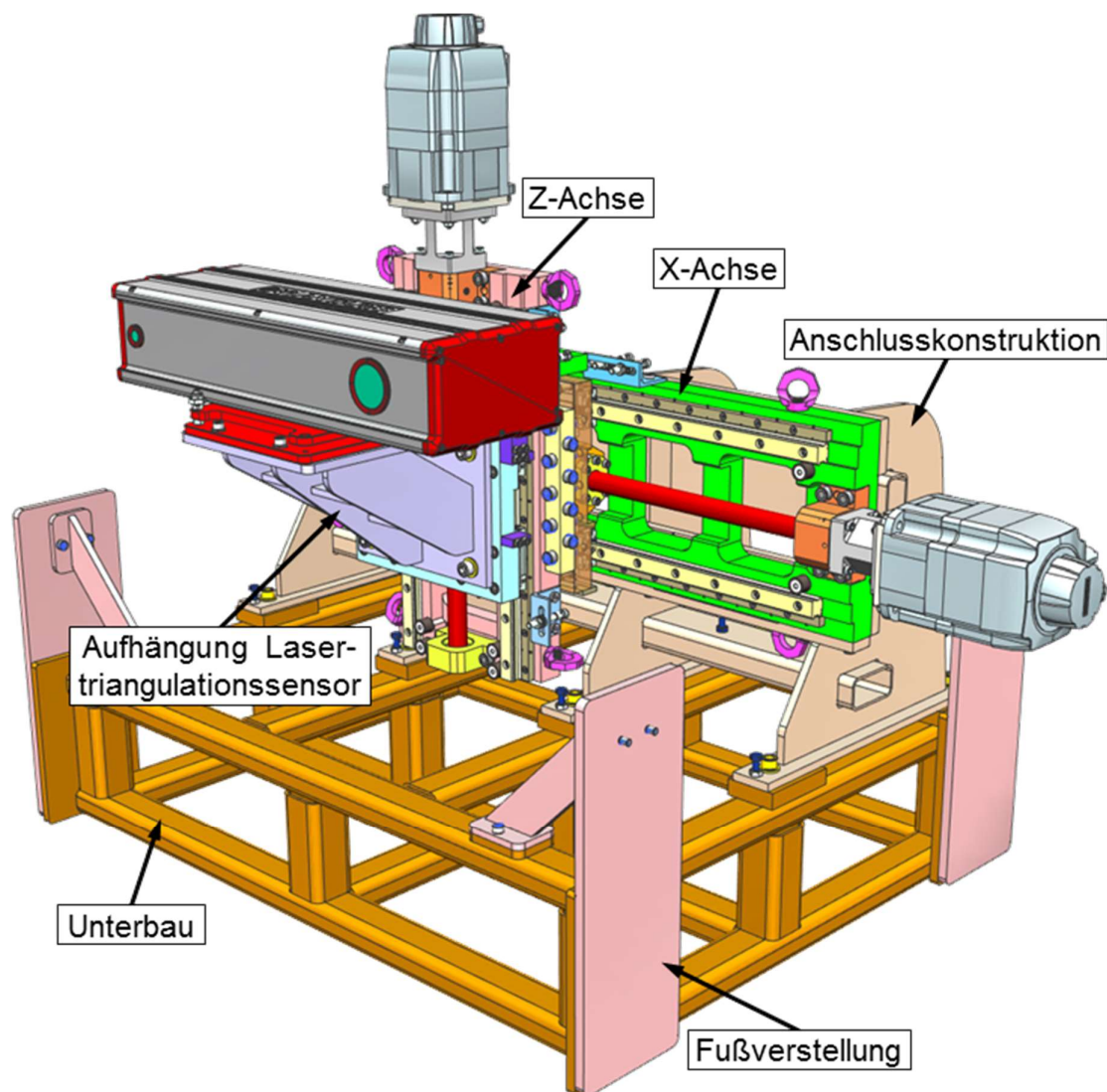


Abbildung 49 Betriebsmittelkonstruktion

Das Betriebsmittel besteht aus insgesamt sechs Baugruppen. Der Lasertriangulations-sensor ist über eine Aufhängung mit der vertikal bewegbaren Z-Achse verbunden. Die horizontale Bewegung wird von der X-Achse ausgeführt. Die Z-Achse ist auf der X-Achse montiert. Die X-Achse selber ist über eine Wandmontage an der Schweißkonstruktion angeschlossen. Die Schweißkonstruktion ist vom Unterbau trennbar. Dies erleichtert den Transport des Betriebsmittels und erlaubt unterschiedliche Ausführungen des Unterbaus. Am Unterbau ist eine vorbereitende Konstruktion für die die Fußverstellung angebracht, um die Höhenverstellung und Nivellierung zu ermöglichen. Der Lasertriangulationssensor ist auf einer Auflageplatte verschraubt. Abbildung 50 zeigt die Sensormontage und einen Teil der Dreipunktlagerung zu Kalibrierzwecken.

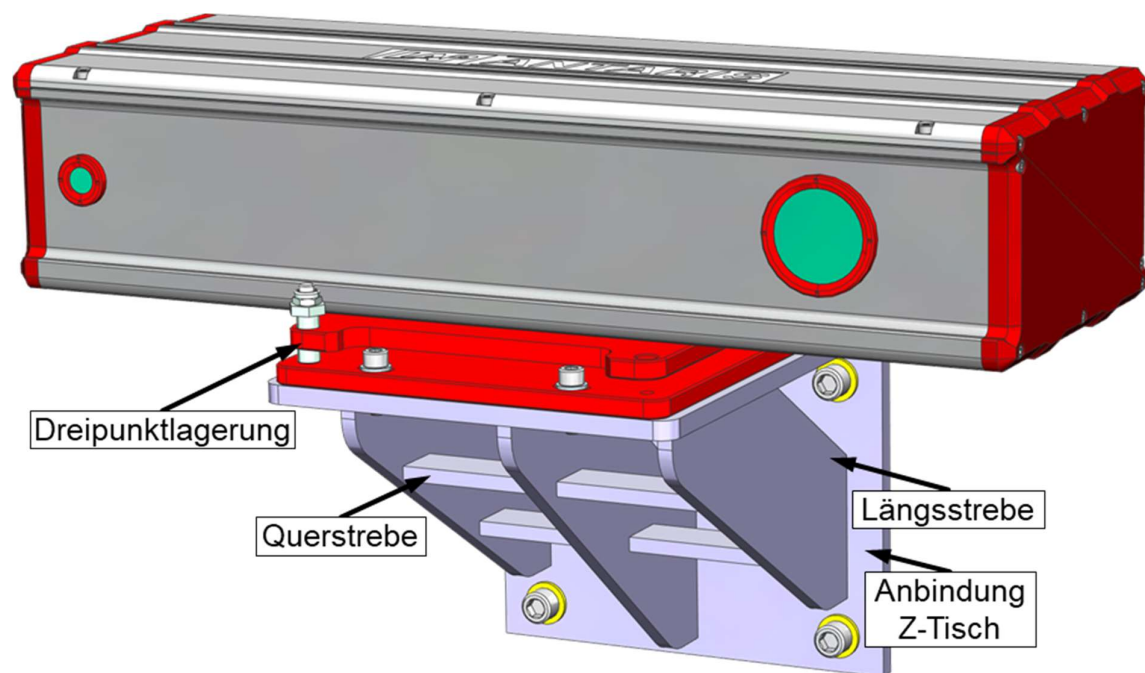


Abbildung 50 Aufhängung des Lasertriangulationssensors

Die Auflageplatte ist als Schweißkonstruktion mit vier Querstreben und drei Längsstreben zur Versteifung ausgeführt. Die Versteifung ist notwendig, um Schwingungen des Messensors beim Positionieren zu vermeiden. Die Bauteile der Auflageplatte haben eine Materialstärke von 8-10 mm und werden als laser-geschnittene Bauteile hergestellt. Die Auflageplatte ist über vier Innensechskantschrauben mit dem Z-Tisch der Z-Achse verbunden. Die Form- und Lagetoleranzen der Schweißkonstruktion sind großzügig toleriert, da der Lasertriangulationssensor über die Dreipunktlagerung eingestellt wird. Die Auflageplatte ist mit der Z-Achse des Betriebsmittels verbunden. Abbildung 51 zeigt die Z-Achse des Betriebsmittels.

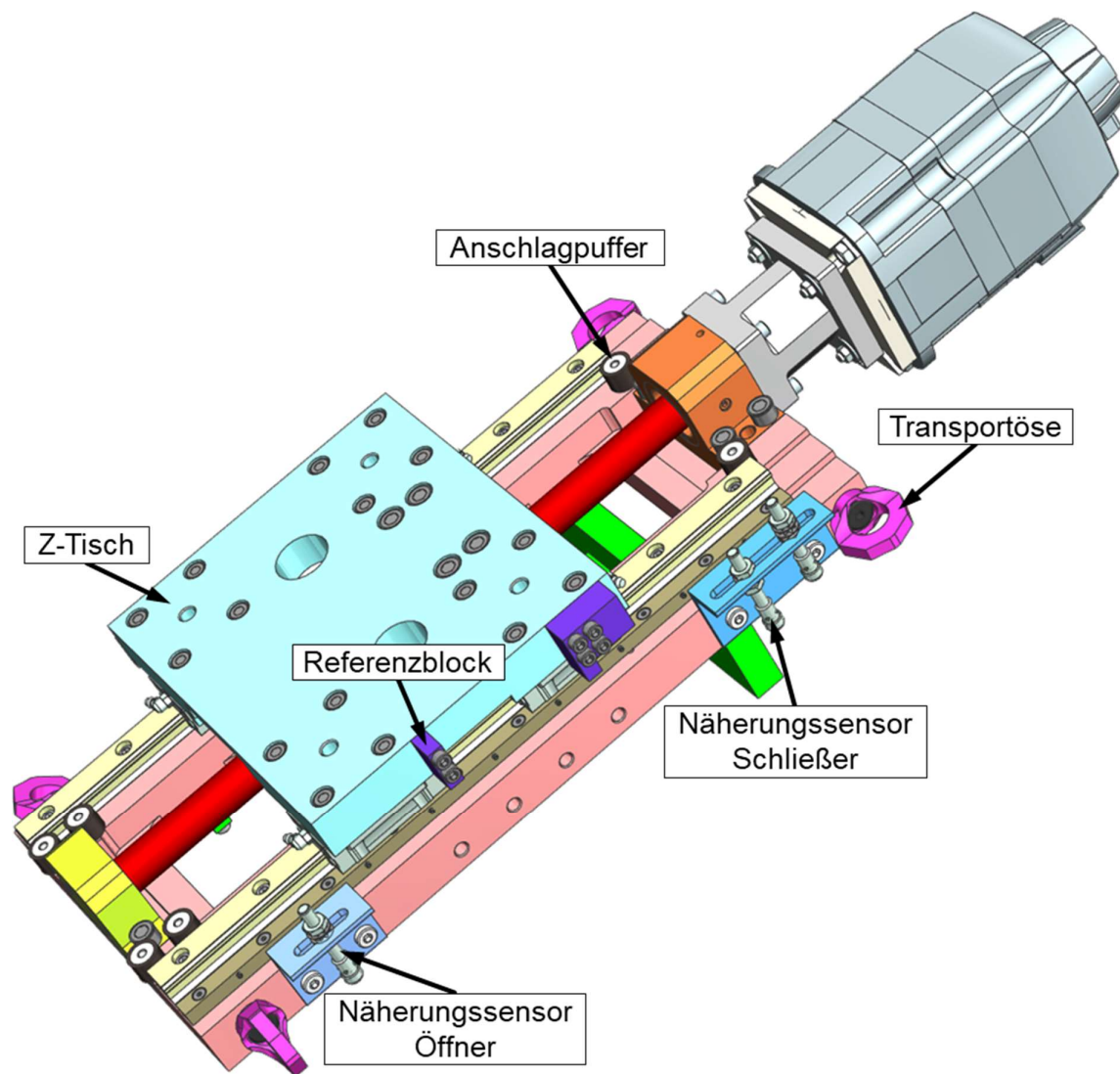


Abbildung 51 Z-Achse des Betriebsmittels

Die Z-Achse und die X-Achse sind bis auf den Nuthub und der daraus resultierenden Länge sowie der Einbaulage identisch. Die Linearführungen der X-Achse sind entsprechend des größeren Nutzhubes angepasst. Der Z-Tisch führt über die Linearführungen eine Hubbewegung in vertikaler Richtung aus. Die Auflageplatte des Lasertriangulationssensors ist mit dem Z-Tisch verbunden. Die Verschraubung der Auflageplatte mit dem Z-Tisch ist mittig auf der Höhe der Führungswägen angebracht, um einen optimalen Kraftfluss zu ermöglichen. Der Z-Tisch wiederum ist auf den Führungswägen der Linearführung verschraubt. Am Z-Tisch sind Referenzblöcke montiert, die die induktiven Näherungssensoren, welche als End- und Referenzschalter konzipiert sind, auslösen. Die Halterung für die induktiven Näherungssensoren sind mit Langlöchern ausgeführt, um die Sensoren justieren zu können. Die Anschlagpuffer dienen Montage- und Transportzwecken, sodass der Z-Tisch sicher in die Endlagen gebracht werden kann. Die Linearführung samt

Führungsschienen und -wägen ist auf der Grundplatte der Z-Achse montiert und mit Aussparungen zur Gewichtsreduktion versehen. Die Steifigkeit ist durch Stege in der Grundplatte gewährleistet. In der Grundplatte sind vier Durchgangsbohrungen vorgesehen, um die Verbindung zur X-Achse über Innensechskantschrauben zu ermöglichen. Der Lochabstand ist identisch mit dem Abstand der Führungsschienen der X-Achse, um das Biegemoment der Z-Achse bestmöglich kompensieren zu können. Die Grundplatten der X- und Z-Achse sind aus einem Präzisionsflachstahl gefertigt. Die Auflageflächen der Linearführungen sind geschliffen, wodurch sehr gute Form- und Lagertoleranzen erreicht werden. Die X- und die Z-Achse werden über Linearführungen und Kugelgewindetriebe in Bewegung gesetzt. Hierzu wird eine Rotation des Synchronmotors in eine Translation umgewandelt. Abbildung 52 zeigt eine Linearführung und die enthaltenen Bauteile.

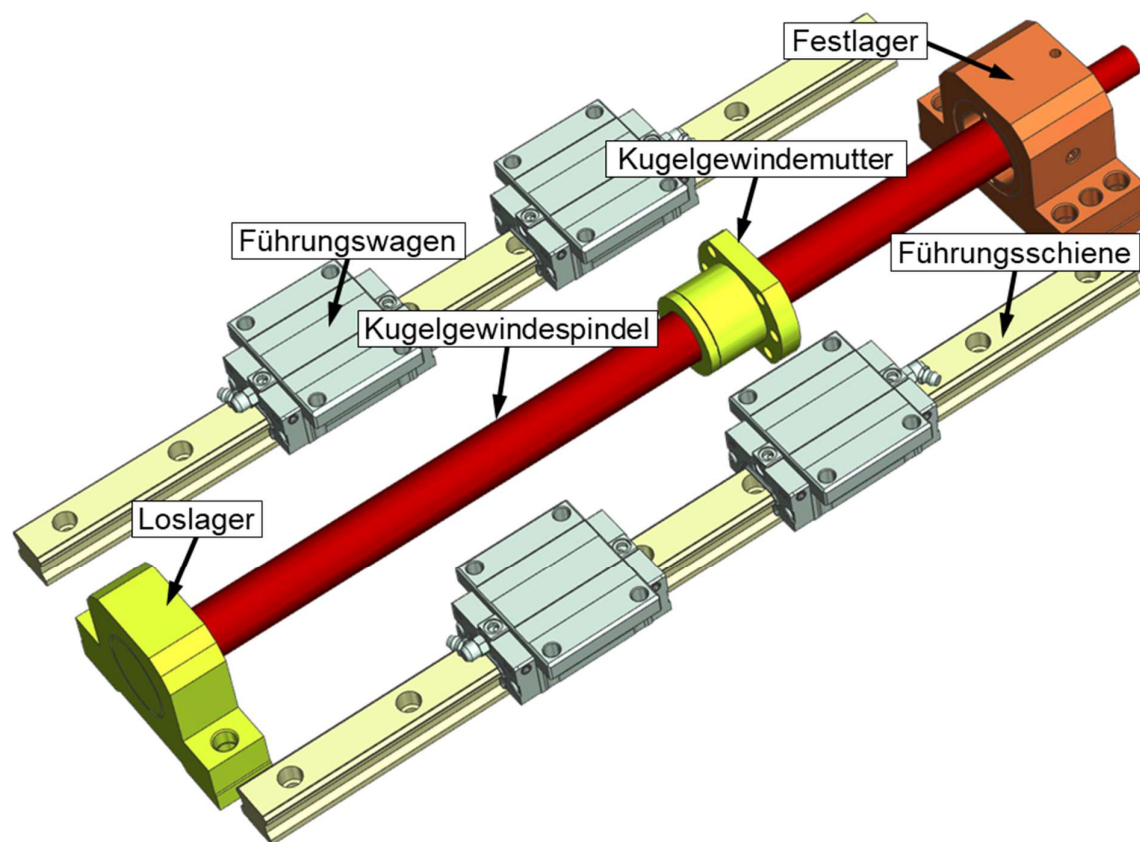


Abbildung 52 Linearführung

Die Kugelgewindespindel ist über eine Fest-Los-Lagerung gelagert. An der Festlagerseite ist eine Antriebsadaption zur Aufnahme des Synchronmotors angebracht. Der Synchronmotor der Z-Achse ist oben an der Festlagereinheit positioniert, um eine Knickgefahr der Kugelgewindespindel zu vermeiden. Der Synchronmotor ist innerhalb der Antriebsadaption mit einer Kupplung zur Kugelgewindespindel verbunden. Die

Kupplung gleicht Winkelversatz und Fluchtungsfehler zwischen der Antriebswelle des Synchronmotors und der Kugelgewindespindel über einen elastischen Zahnkranz aus. Darüber hinaus dämpft die elastische Kupplung Schwingungen, die während des Betriebes der Synchronmotoren entstehen. Die Drehmomentübertragung ist durch eine Klemmverbindung der Kupplung realisiert. Der Kugelgewindetrieb entspricht der Toleranzklasse 5 und gewährleistet die geforderte Positioniergenauigkeit. Die Toleranzklasse beschreibt die zulässige Wegabweichung in Längsrichtung des Kugelgewindetriebes und wird über den Nutweg als Summe des Nutzhubes und der Länge der Kugelgewindemutter bestimmt. Aus Toleranztabellen ergibt sich eine mittlere Wegabweichung für die X-Achse von 0,036 mm und für die Z-Achse von 0,023 mm. [Ntn15] Der Kugelgewindetrieb wird durch Übermaßkugeln vorgespannt. Dadurch wird das Axialspiel verringert und die Steifigkeit sowie die Positioniergenauigkeit erhöht. Die Laufgenauigkeiten der Linearführungen entsprechen der Super-Präzisionsklasse. Die Laufgenauigkeit und damit die Parallelität in Y-Richtung werden über Toleranztabellen in Abhängigkeit der Führungsschienenlänge bestimmt. Für die Z-Achse ergibt sich eine Wegabweichung von 5 µm. Zur Wegabweichung der X-Achse muss die Wegabweichung der Z-Achse addiert werden. In Summe ergibt sich eine Wegabweichung in Y-Richtung der Z-Achse von 9 µm. Dieser Wert ist kleiner als die Toleranzvorgabe von 10 µm. Im Gesamtverbund aus zwei Schienen und vier Führungswagen wird die Wegabweichung, aufgrund der höheren Steifigkeit, noch weiter minimiert. Die Spielfreiheit der Führungswagen wird durch Übermaßkugeln, die eine Vorspannung erzeugen, erreicht. Abbildung 53 zeigt einen Querschnitt der Z-Achse mit der montierten Linearführung.

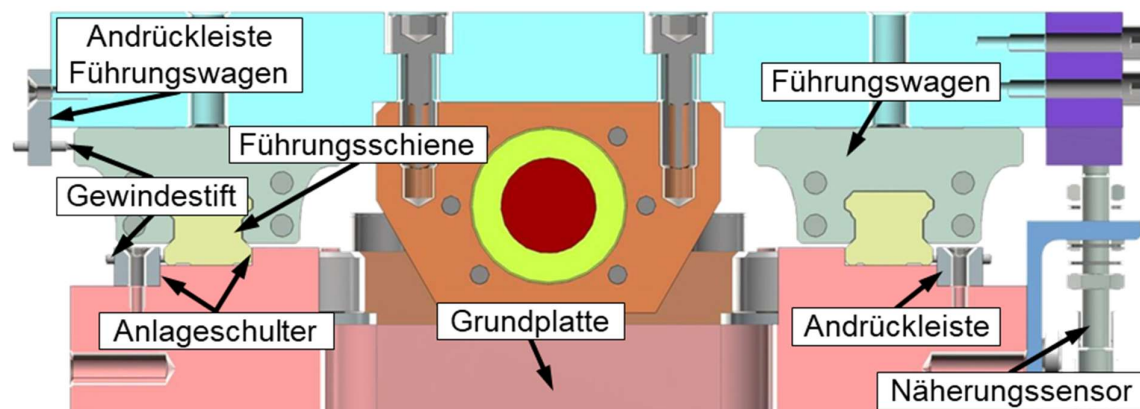


Abbildung 53 Querschnitt der Z-Achse

Die Grundplatten des Betriebsmittels wird in einer Aufspannung mit geschliffenen Anlageschultern versehen, die die Laufparallelität der Führungsschienen herstellen. Hierzu werden die Führungsschienen an die Anlageschultern angelegt und über die Andrückleisten mit Gewindestiften angedrückt. Eine korrekte Anzugsreihenfolge mit

entsprechendem Drehmoment sorgt für eine sichere Montage. Die Verbindung des Z-Tisches mit den Führungswägen erfolgt nur mit einer Anlageschulter und einer Andrückleiste, um Verspannungen durch eine Überbestimmung zu vermeiden. Die horizontale Bewegung des Lasertriangulationssensors wird auf der X-Achse ausgeführt. Die X-Achse ist über eine Wandmontage an die Anschlusskonstruktion angeschlossen. Die Grundplatte der Z-Achse und somit die gesamte Z-Achse ist über den X-Tisch mit der X-Achse verbunden. Abbildung 54 zeigt die X-Achse.

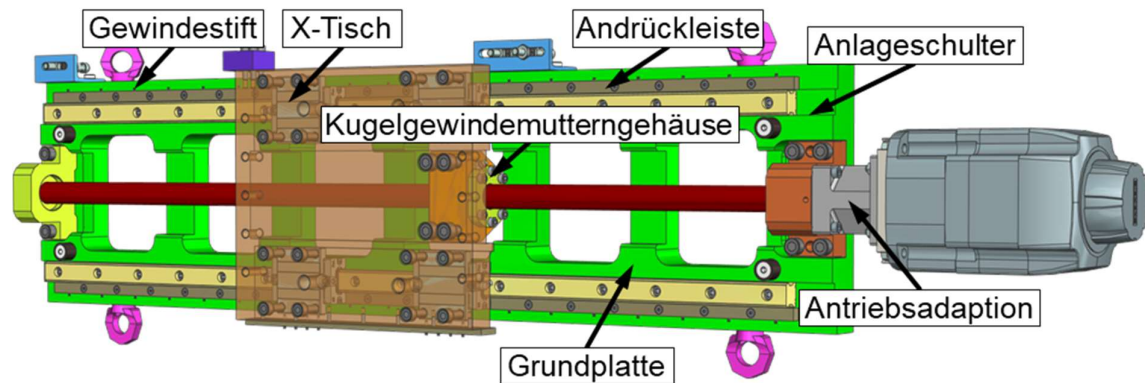


Abbildung 54 X-Achse des Betriebsmittels

Der X-Tisch wird ebenfalls über einen Kugelgewindetrieb mit einem Kugelgewindemuttergehäuse angetrieben. Die Linearführung und Antriebsadaption sind, bis auf die Länge, identisch zu den Bauteilen der Z-Achse. Die X-Achse wird an die geschweißte Anschlusskonstruktion durch Verschraubungen montiert. Abbildung 55 zeigt die geschweißte Anschlusskonstruktion.

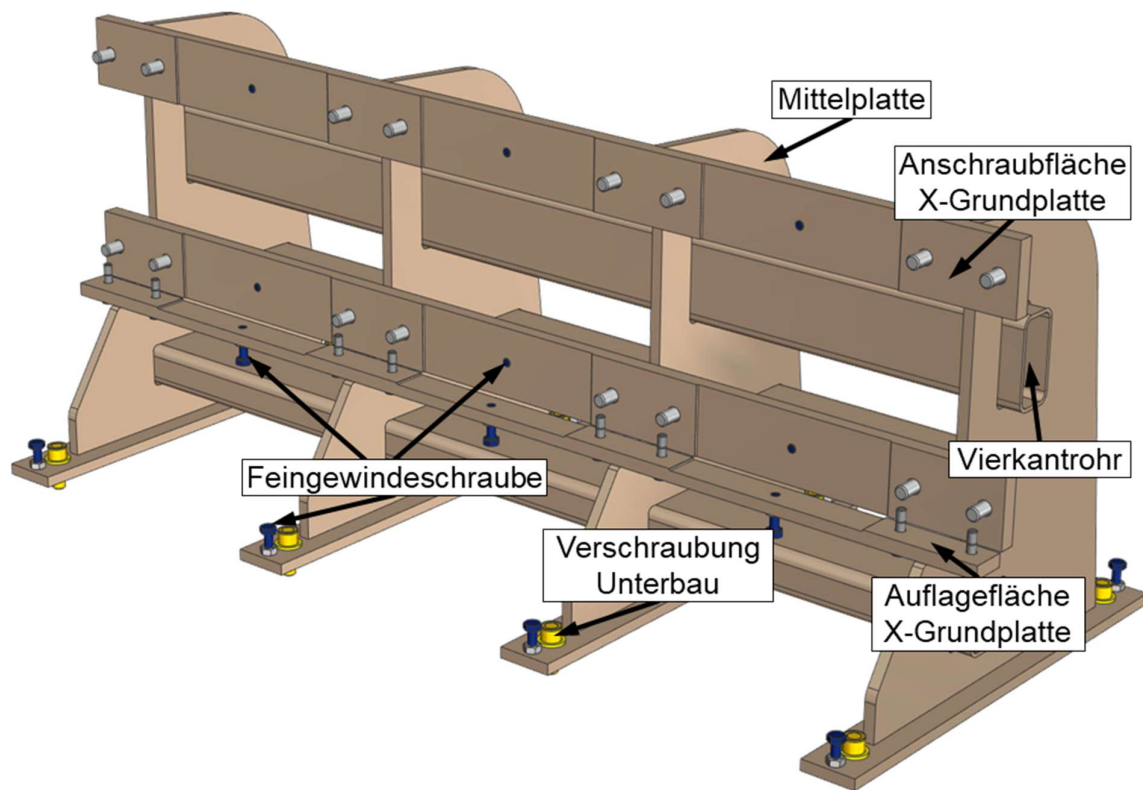


Abbildung 55 Anschlusskonstruktion

Die Anschlusskonstruktion ist steif ausgelegt, um eine Durchbiegung zu vermeiden. Die Materialstärke der Mittelplatten beträgt 10 mm. Die Mittelplatten sind mit laser-geschnittenen Aussparungen versehen und durch Hohlprofile verstärkt. Die Anschlusskonstruktion wurde hinsichtlich des Korrosionsschutzes brüniert. Die Auflagefläche der X-Grundplatte auf der Anschlusskonstruktion ist an den Funktionsflächen geschliffen, wodurch eine hohe Präzision gewährleistet ist. Zur weiteren Feinjustage sind an der Anschlusskonstruktion Feingewindeschrauben angebracht, die geringfügige Einstellungen der Bauteile zueinander erlauben. Der Unterbau nimmt die übrige Konstruktion auf und kann je nach Einsatzort des Betriebsmittels in unterschiedlichster Art und Weise ausgeführt werden. Abbildung 56 zeigt den Unterbau mit einem vorbereiteten Anschluss für die Fußverstellung.

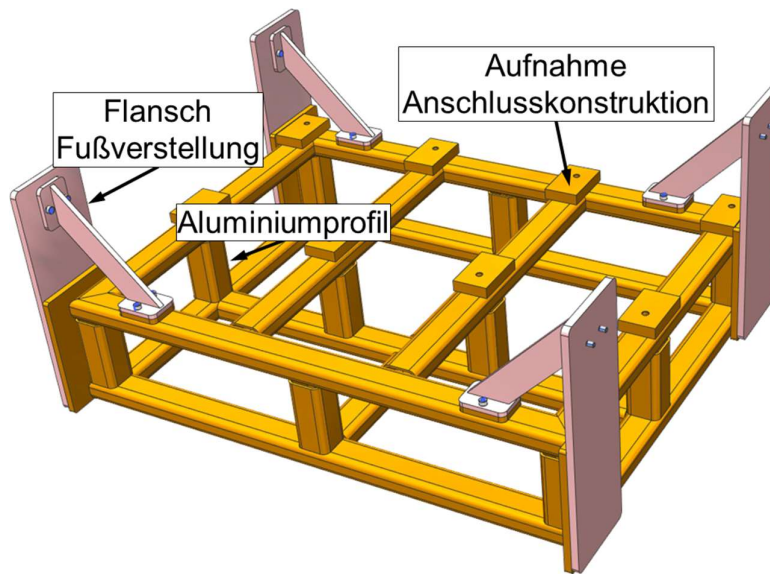


Abbildung 56 Unterbau

Die Konstruktion des Unterbaus ist so ausgeführt, dass der gemeinsame Schwerpunkt der X- und Z-Achse mittig liegt. Dadurch wird die Kippneigung des Betriebsmittels minimiert. Der Unterbau ist aus Aluminiumprofilen gefertigt und an den Funktionsflächen überfräst. Zusätzlich sind Aluprofile zur Versteifung im Unterbau angebracht. Die nachfolgende Abbildung 57 zeigt das realisierte Betriebsmittel in zwei unterschiedlichen Ansichten.

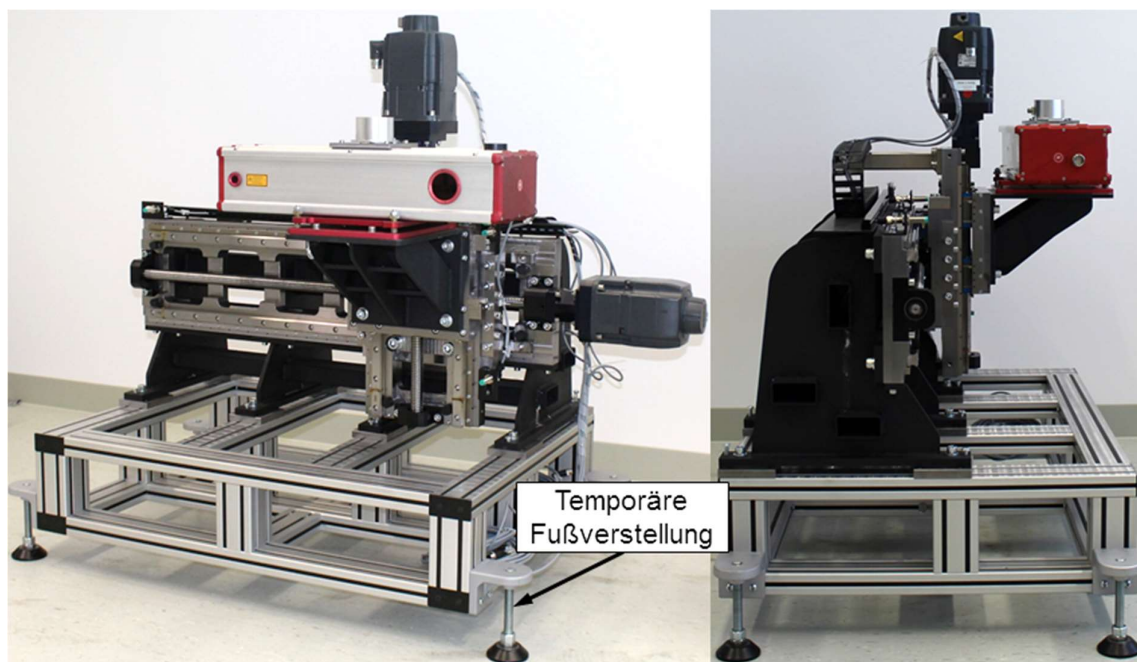


Abbildung 57 Betriebsmittel in unterschiedlichen Ansichten

Das Betriebsmittel wiegt 303 kg und kann auf einer Europalette transportiert werden.

Die Automatisierung des Betriebsmittels ist mit Komponenten der Firma Siemens realisiert. Die Komponenten sind derart ausgelegt, sodass zwei Betriebsmittel mit je zwei Synchronmotoren angesteuert werden können. Dabei kommen folgende Komponenten zum Einsatz:

- Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)
- Frequenzumrichter, Zwischenkreismodul und Double-Motor-Modul
- Synchronmotoren
- LAP Laser
- LAP Laser PROFIBUS-DP Interface Gateway
- PROFIBUS Kommunikationsmodul
- Human Machine Interface (HMI)
- W-LAN Router
- Raspberry Pi 3

Es werden zwei identische Synchronmotoren mit integrierten Multi-Turn-Drehgebern vom Typ SIMOTICS S 1FK7-CT eingesetzt. Die Synchronmotoren werden über den Frequenzumrichter S120 Double-Motor-Module und die SPS angetrieben sowie gesteuert. Die Programme sowie die Mess- und Regelabläufe sind auf der übergeordneten SPS vom Typ CPU 1511C-1 PN implementiert. Die Topologie der angeschlossenen Komponenten, bis auf die Positionsschalter, ist in Abbildung 58 gezeigt.

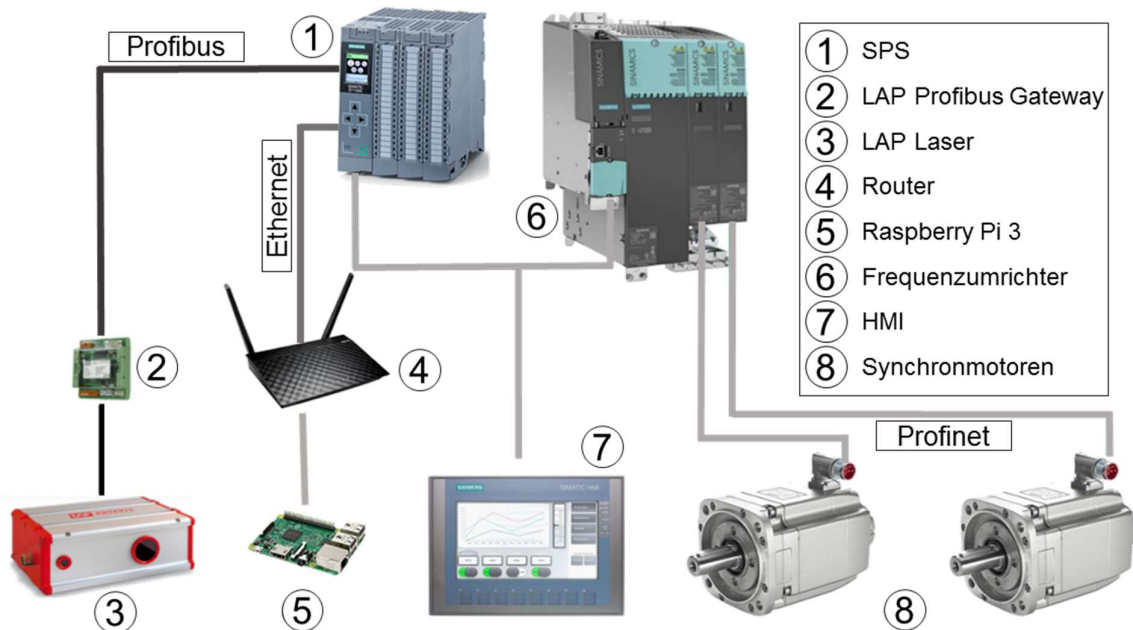


Abbildung 58 Topologie der Automatisierungstechnik [vgl. Bos18]

Die Kommunikation und Ansteuerung der Motoren sowie der Betrieb des Human Machine Interface erfolgt über Profinet. [Pro18-1] Präzise Positionierungsaufgaben erfordern kurze Zykluszeiten der Bussysteme. Um eine möglichst kurze Zykluszeit und damit eine schnelle Datenübertragung zu realisieren, wird das Isochronous-Real-Time (IRT) Protokoll auf dem Profinet-Bus verwendet. Dieses Protokoll erlaubt Zykluszeiten von bis zu 250 μ s. Der Lasertriangulationssensor verfügt über einen RS485-Netzwerk-Anschluss [Tel18], der es erlaubt die Messwerte des Lasertriangulationssensors direkt auszulesen. Die SPS übernimmt zusätzlich zur Positionsregelung auch die Auswertung der Messwerte und die Berechnung der Fahrwerkgeometriewinkel. Hierzu ist es notwendig, dass die SPS die Messwerte des Lasertriangulationssensors auslesen kann. Ein Gateway, das den Sensor mit dem SPS Kommunikationsmodul CM 1542-5 über Profibus [Pro18-2] verbindet, erfüllt diesen Zweck. Der W-LAN Router und der Raspberry Pi 3 [Ras18] dienen zur Messergebnisdarstellung auf einem größeren Bildschirm oder auf einem Smartphone und sind über Ethernet mit der SPS verbunden. Abbildung 59 zeigt die verbauten Komponenten im Schaltschrank.

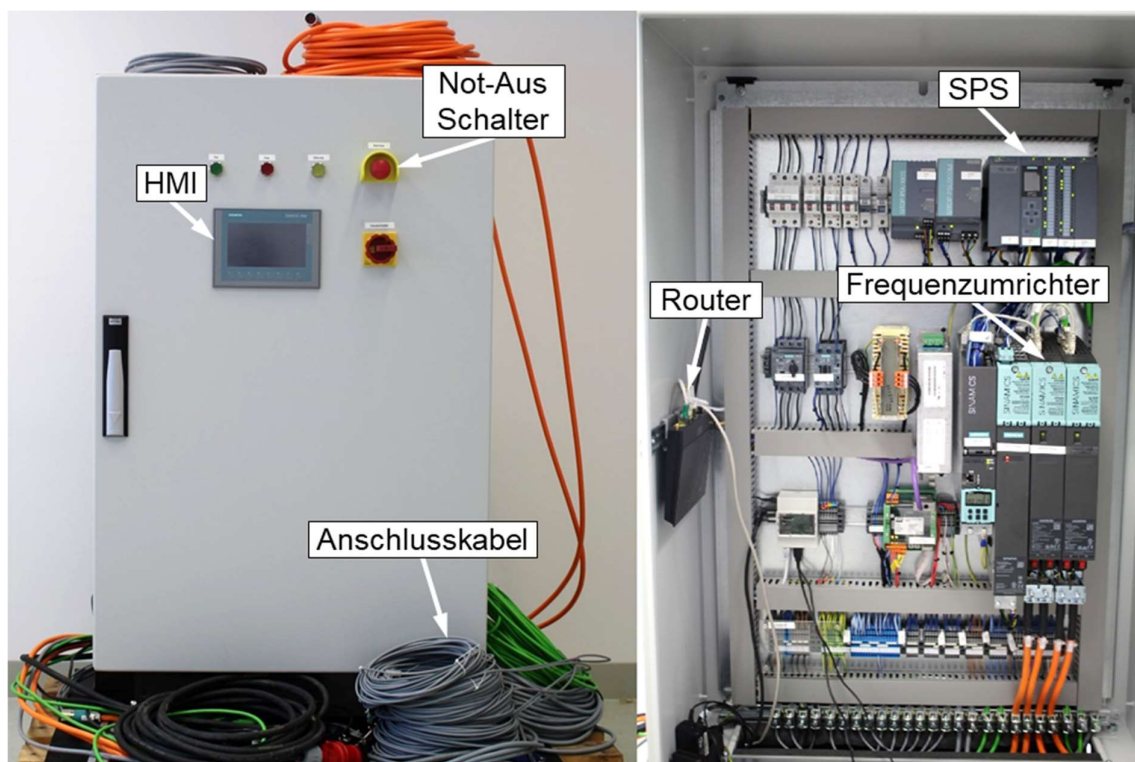


Abbildung 59 Schaltschrank

Eine schnelle und direkte Bedienung der Betriebsmittel ist über ein Human Machine Interface realisiert. Das Human Machine Interface ist auf der Vorderseite des Schaltschranks montiert und ermöglicht die Motorfreigabe, das Umschalten zwischen Hand- und Automatikbetrieb, das Auslesen und Quittieren von Störungsmeldungen

sowie weitere sensorspezifische Funktionen. Die Positionsschalter an beiden Betriebsmitteln funktionieren als Hardwareendschalter und Referenzschalter zum Abnullen der Betriebsmittelkoordinaten in X- und Z-Richtung. Der Schaltschrank wiegt mit allen verbauten Komponenten 149 kg und passt für Transportzwecke auf eine Europalette.

3.2.3 Definition von betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren

Die Technologierecherche sowie die Konstruktion des Betriebsmittels haben gezeigt, dass unterschiedliche betriebsmittelspezifische Einflüsse für eine präzise Messung der Fahrwerkgeometrie zu beachten sind. Zum einen muss der Messbereich des Lasertriangulationssensors betrachtet werden. Der Lasertriangulationssensor weist in der Messbereichsmitte die beste Linearität auf. In den Randbereichen wird die Linearität schlechter, sodass das Messergebnis negativ beeinflusst werden kann. Dies ist auf die Kalibrierung des integrierten Kamerachips und auf die Schiefstellung des Laseraustrittswinkels zurückzuführen. Die mechanische Bearbeitung und der Wärmeeintrag durch die Fügeprozesse bei der Herstellung des Betriebsmittels führen zu Toleranzen, die das Messergebnis durch eine Positionsabweichung des Messensors beeinflussen. Der mechanische Aufbau des Betriebsmittels sowie die Anbauteile und Führungselemente sind mit Form- und Lagetoleranzen behaftet. Die eingesetzten Linearführungen besitzen Toleranzen bezüglich ihrer Parallelität, die nicht mehr kompensiert werden können. Die mechanischen Toleranzen wirken sich in einem Positions- und Parallelitätsfehler des Messensors auf der X- und Z-Achse aus, indem der Messwert des Lasertriangulationssensors zwischen zwei beliebigen Positionen nicht konstant bleibt. Der mechanische Aufbau verfügt über keine Schwingungsentkopplung und ist auf Steifigkeit ausgelegt. Für den hier zu Grunde liegenden Anwendungsfall müssen Messgrößen im μm Bereich aufgelöst werden. Eine Schwingungsentkopplung ist daher nicht vorgesehen, da diese, durch den Verlust an Betriebsmittelsteifigkeit, ein Risiko für die Mess- und Wiederholgenauigkeit darstellt. Im produktionsnahen Umfeld muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Schwingungen und Vibrationen, aufgrund von Fahrzeug- und Maschinenbewegungen, auftreten. Der Einfluss von Schwingungen auf das Betriebsmittel wirkt sich auf den Lasermesswert, aufgrund der Übertragung der Schwingungen, ebenfalls aus. Zusammenfassend sind nachfolgend die betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren mit den Faktorstufen für die weitere Untersuchung in Tabelle 6 definiert.

Tabelle 6 betriebsmittelspezifische Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Faktorstufe1	Faktorstufe2	Faktorstufe3
Messbereich	Anfang	Ende	
Laserposition auf der X-Achse	Anfang	Mitte	Ende
Laserposition auf der Z-Achse	Anfang	Ende	
Schwingungen	ja	nein	

3.2.4 Kalibrierkonzept

Die Kalibrierung für die Betriebsmittel zur Inline Fahrwerkgeometrievermessung ist notwendig, um eine korrekte Messung zu gewährleisten. Das Kalibrierkonzept bezieht sich dabei auf eine Ausführung mit vier Betriebsmitteln für eine Fahrwerkgeometrievermessung der Vorder- und Hinterachse und gilt gleichermaßen beim Einsatz von nur zwei Betriebsmitteln für die Vermessung der Hinterachse. Ein Betriebsmittel wird als Referenz definiert und gibt das gemeinsame Koordinatensystem vor. Die anderen Betriebsmittel werden zum Referenzbetriebsmittel ausgerichtet. Für die Kalibrierung im gemeinsamen Koordinatensystem müssen die X-, Y- und Z-Koordinaten der Betriebsmittel genullt werden oder innerhalb der Automatisierungstechnik mit entsprechenden Korrekturwerten versehen werden. Die Korrekturwerte der X-, Y- und Z-Koordinaten eines jeden Betriebsmittels ergeben sich aus den Abständen der Betriebsmittel zueinander. Die Kalibrierung umfasst außerdem die Neigungsausrichtung der Betriebsmittel sowie des Lasertriangulationssensors. Die Betriebsmittel und Lasertriangulationssensoren werden parallel zum Horizont ausgerichtet. Abbildung 60 zeigt die Betriebsmittelsymmetrieachse und deren Ausrichtung sowie das gemeinsame Koordinatensystem.

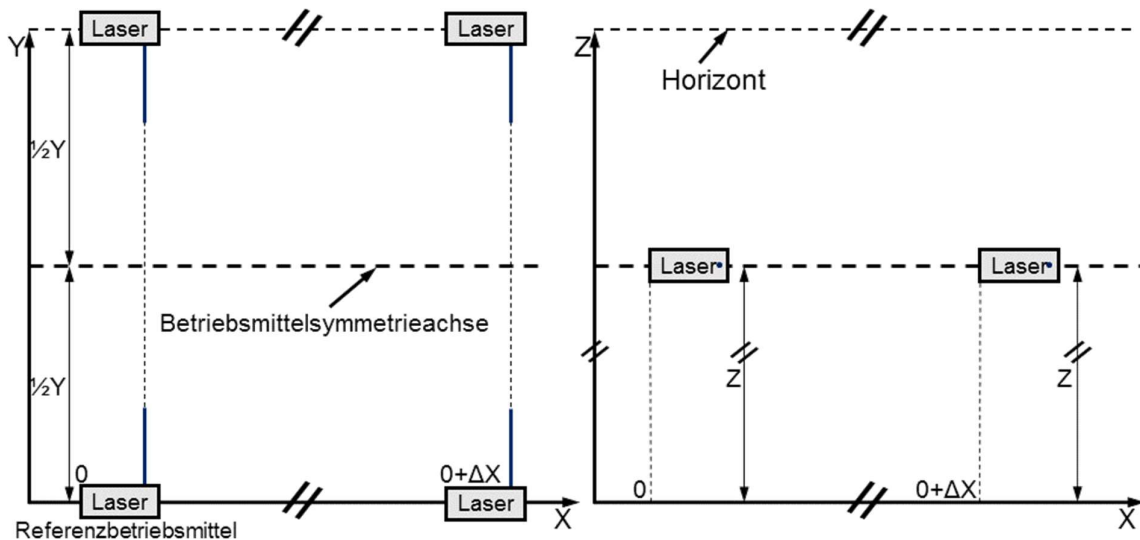


Abbildung 60 Kalibrierung der Betriebsmittel [vgl. Abe17]

Die Laserfahrwege in X-Richtung zueinander werden ermittelt und parallel eingestellt. Außerdem werden die Lasertriangulationssensoren auf eine gemeinsame Z-Koordinate genullt und die Laserfahrwege in Z-Richtung ermittelt sowie parallel justiert. Das Abnullen der gemeinsamen Z-Koordinate und die parallele Ausrichtung der Laserfahrwege werden über die Fußverstellung des mechanischen Aufbaus der Betriebsmittel realisiert. Final wird der Laseraustrittswinkel kalibriert. Der Laseraustrittswinkel muss senkrecht zum Fahrweg in X-Richtung erfolgen und

dabei genau im Laserstrahl des gegenüberliegenden Betriebsmittels enden. Die Kalibrierung erfolgt mit Hilfe eines halbdurchlässigen Materials, sodass beide Laserstrahlen auf einem gemeinsamen Koordinatengitter dargestellt werden können. Abbildung 61 zeigt das verwendete Prinzip für die Kalibrierung des Laseraustrittswinkels.

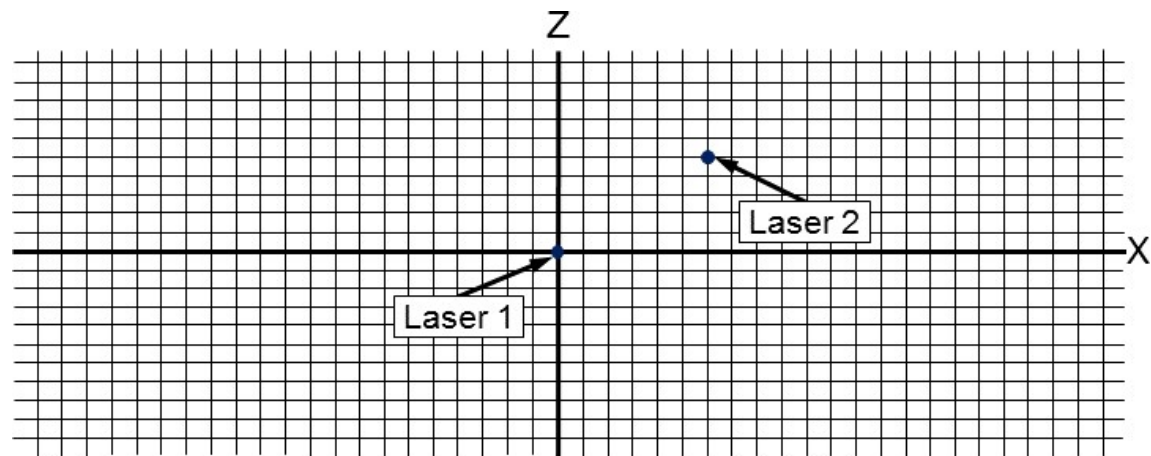


Abbildung 61 Kalibrierung des Laseraustrittswinkels [vgl. Abe17]

Der Laseraustrittswinkel wird über die Dreipunktlagerung der Lasertriangulationsensoren derart eingestellt, dass beide Laserstrahlen ineinander fallen. Die Kalibrierung des Laseraustrittswinkels erfolgt über den gesamten Messbereich des Lasertriangulationssensors. Die gesamte Kalibrierung der Betriebsmittel erfolgt mit dem Hilfsmesssystem Faro Laser Tracker.

3.3 Prozess

Die Inline Fahrwerkgeometrievermessung in der Fahrzeugmontage ist möglich, sobald der Fügeprozess zwischen dem Fahrwerk und der Karosserie in der Hochzeit stattgefunden hat. Dabei ist der Aufbauzustand des Fahrzeugs der limitierende Faktor für die Umsetzbarkeit der Fahrwerkgeometrievermessung. Eine Teilmessung der Fahrwerkgeometrie an der Hinterachse ist bereits nach der Hochzeit möglich. Eine Gesamtmessung der Fahrwerkgeometrie an Vorder- und Hinterachse erfordert zusätzlich ein verbauten Lenkrad, um den Lenkwinkel bestimmen zu können. Dadurch, dass das Fahrzeug nicht auf eigenen Rädern steht, wird der niveaubedingte sowie der elastokinematische Einfluss nicht direkt in den Messwerten abgebildet. Hieraus ergeben sich Restriktionen für den Prozess der Inline Fahrwerkgeometrievermessung, die im folgenden Verlauf adressiert werden.

3.3.1 Niveau- und Gewichtsprädiktionsalgorithmus

Der Niveau- und Gewichtsprädiktionsalgorithmus wird verwendet, um den Einfluss der Gummilagerungen unter statischer Radlast auf die Fahrwerkgeometrie durch Korrekturwerte zu kompensieren. Die ermittelten Korrekturwerte werden mit den gemessenen Werten verrechnet. Des Weiteren wird bei Fahrzeugen mit nicht aktiven Fahrwerken (Stahlfederung) das Zielniveau prognostiziert, um das Spur- und Sturzänderungsverhalten für die fahrfertige Fahrzeugendlage zu ermitteln. Fahrzeuge mit nicht aktiven Fahrwerken unterliegen unterschiedlichen Zielniveaus, wie beispielsweise ein tiefergelegtes Sportfahrwerk oder ein Fahrwerk mit erhöhter Bodenfreiheit. Das Zielniveau wird durch die Toleranzen der Federsteifigkeiten beeinflusst und muss berücksichtigt werden. Eine Kalibrierung oder Einstellung des Zielniveaus findet bei Fahrzeugen mit Stahlfederung nicht statt. Bei aktiven Fahrwerken (Luftfederung) ist die Niveauprädiktion nicht notwendig, da bei jedem Fahrzeug eine Kalibrierung des Zielniveaus stattfindet. Das Zielniveau entspricht dabei dem K0-Niveau und wird mit ausreichender Genauigkeit kalibriert. Für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung wurde die Mercedes-Benz S-Klasse als Produktobjekt verwendet. Diese Fahrzeugbaureihe wird ausschließlich mit aktiven Fahrwerken ausgeliefert. Eine detaillierte Betrachtung des Niveauprädiktionsalgorithmus findet deshalb nicht statt. Das Vorgehen für die Niveauprädiktion erfolgt analog dem Verfahren der Gewichtsprädiktion.

Der Gewichtsprädiktionsalgorithmus basiert auf einer empirischen Methode, die die Gewichtsmessung der laufenden Fahrzeugproduktion auswertet. Das Verfahren des Gewichtsprädiktionsalgorithmus bezieht sich auf [Tra17]. Die Gewichtsmessung findet auf dem Fahrwerkstand statt. Eine Fahrzeugbaureihe ist in Baumustern aufgeteilt. Ein Baumuster enthält Informationen über die Karosserievariante, dem verbauten Motor und Getriebe sowie über den Lenkertyp. Fahrzeuge mit identischem Baumuster unterscheiden sich nur in ihrer Sonderausstattung. Für jedes Baumuster wird ein Grundgewicht ermittelt, welches dem Fahrzeuggewicht ohne zusätzliche Sonderausstattung entspricht. Die Fahrzeugbaumuster und ihre Grundgewichte bilden eine Datenbank des Gewichtsprädiktionsalgorithmus. Eine weitere Datenbank bilden die Gewichtsdaten der Sonderausstattungen. Die Datenbanken werden durch die Analyse der Baumuster und deren verbauter Sonderausstattung in Kombination mit den gemessenen Radlasten befüllt. Dabei wird eine systemseitig erzeugte Sonderausstattungsliste für jedes Fahrzeug verwendet und nach unterschiedlichen und gemeinsam verbauten Sonderausstattungen innerhalb eines Fahrzeugbaumusters analysiert. Es wird das Gewicht einer Sonderausstattung ermittelt, indem bis auf eine Sonderausstattung identisch ausgestattete Fahrzeuge verglichen werden. Das Differenzgewicht wird genau der Sonderausstattung, die als Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Fahrzeugen dient, zugeordnet.

Das Gesamtgewicht und die einzelnen Radlasten eines Fahrzeugs werden prognostiziert, indem die Grundgewichte des Baumusters und die Gewichte der enthaltenen Sonderausstattungen addiert werden. Der Ablauf der Gewichtsprädiktion ist in Abbildung 62 schematisch dargestellt.

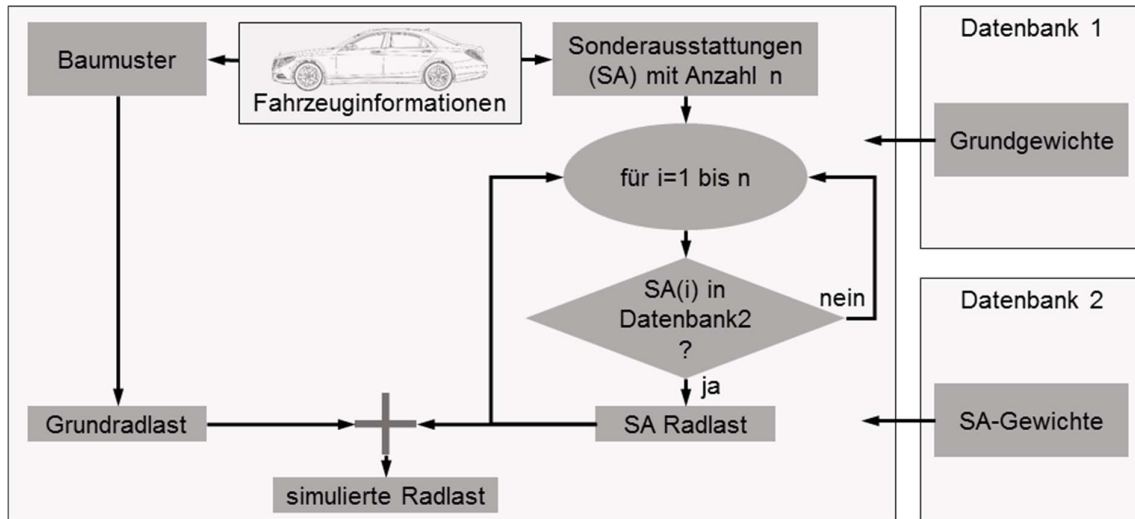


Abbildung 62 Verfahren für den Gewichtsprädiktionsalgorithmus [vgl. Tra17]

Die Ergebnisse der Gewichtssimulation werden in Abbildung 63 mit dem realen Fahrzeuggewicht verglichen. Hierzu wird eine Differenz gebildet, indem das simulierte Fahrzeuggewicht vom realen Fahrzeuggewicht abgezogen wird.

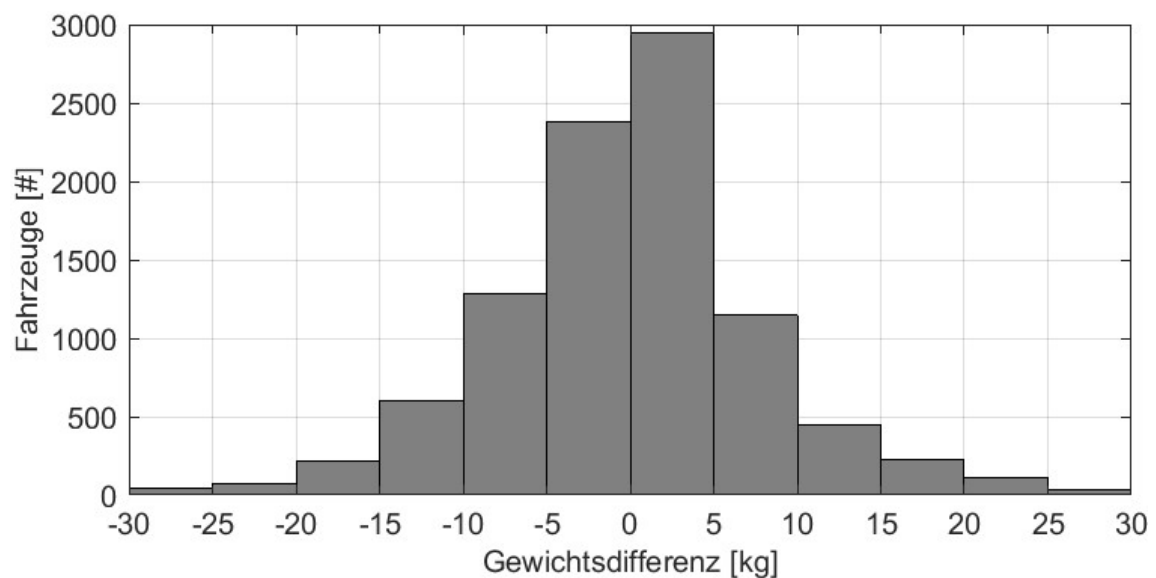


Abbildung 63 Differenzen zwischen simuliertem und realem Gewicht [vgl. Tra17]

Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass der Gewichtsprädiktionsalgorithmus akzeptable Ergebnisse liefert. Die größeren Abweichungen (>30 kg) des simulierten Gewichts im Vergleich zum realen Fahrzeuggewicht sind auf besondere Sonderausstattungs-wünsche, Manufakturfahrzeuge und Fahrzeuge mit Sonderschutz zurückzuführen. Mit Hilfe des simulierten Gewichts können die Korrekturwerte für die elastokinematische Fahrwerkgeometrieänderung ermittelt werden. Das schematische Vorgehen ist im Flussdiagramm der Abbildung 64 gezeigt.

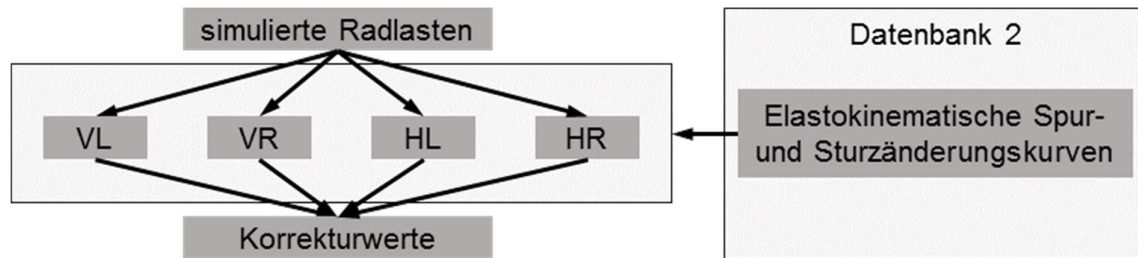


Abbildung 64 Verfahren zur Berechnung der elastokinematischen Korrekturwerte [vgl. Tra17]

Die simulierten Radlasten greifen auf eine Datenbank zu, die die elastokinematischen Spur- und Sturzänderungskurven enthält. Die elastokinematischen Spur- und Sturzänderungskurven wurden an realen Fahrzeugen mit einem aktiven Fahrwerk ermittelt. Abbildung 65 zeigt Detailaufnahmen der Versuchsdurchführung.

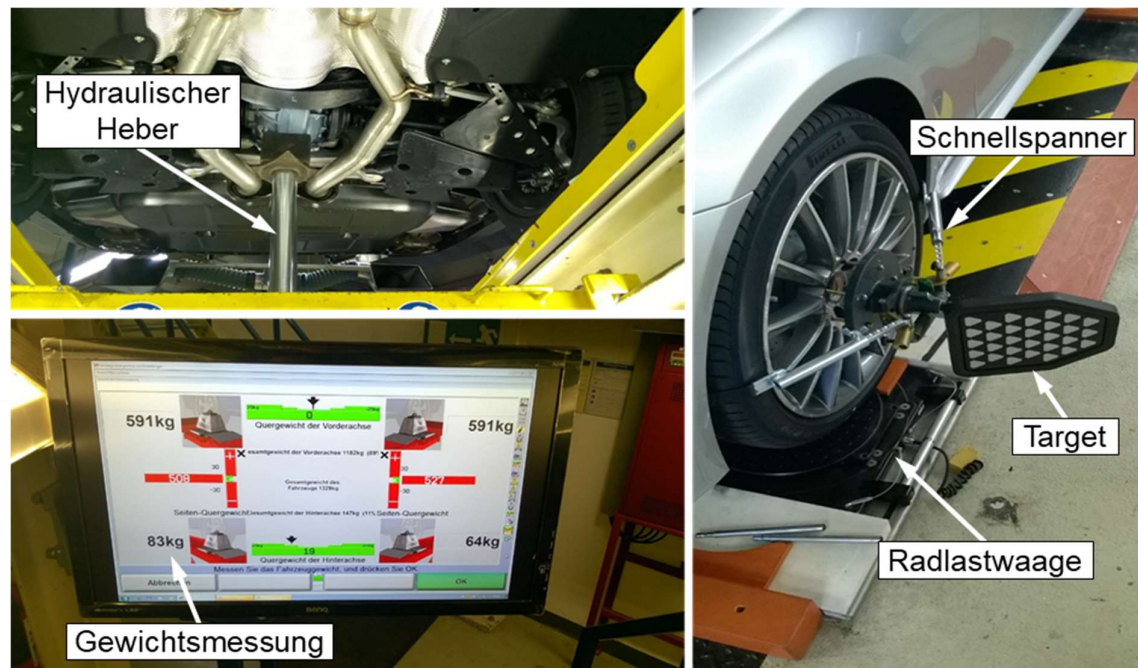


Abbildung 65 Ermittlung elastokinematischer Spur- und Sturzänderungskurven [vgl. Tra17]

Für die Versuchsdurchführung wurden Fahrzeuge auf einer Fahrwerkvermessungsanlage mit integrierten Radlastwaagen positioniert. Die Fahrzeuge wurden anschließend an einer Fahrzeugachse kontinuierlich mit Gewichten belastet. Die Gewichte sind symmetrisch im Kofferraum bzw. für die Versuchsdurchführung an der Vorderachse im Fahrer- und Beifahrerfußraum angeordnet. Die Echtzeitmessung des Fahrwerks erlaubt es, die Fahrwerkgeometrieveränderung aufgrund der erhöhten Radlast zu dokumentieren. Da es sich um Fahrzeuge mit aktivem Fahrwerk handelt konnte das K0-Niveau, trotz Beladung, konstant gehalten werden. Somit sind die ermittelten Spur- und Sturzänderungskurven, um das niveaubehängige Änderungsverhalten bereinigt. Ein hydraulischer Heber in der Grube der Fahrwerksmessanlage erlaubt es, den elastokinematischen Einfluss bei Entlastung einer Fahrzeugachse zu ermitteln. Abbildung 66 zeigt die Versuchsergebnisse für das Spuränderungsverhalten unter statischer Radlast.

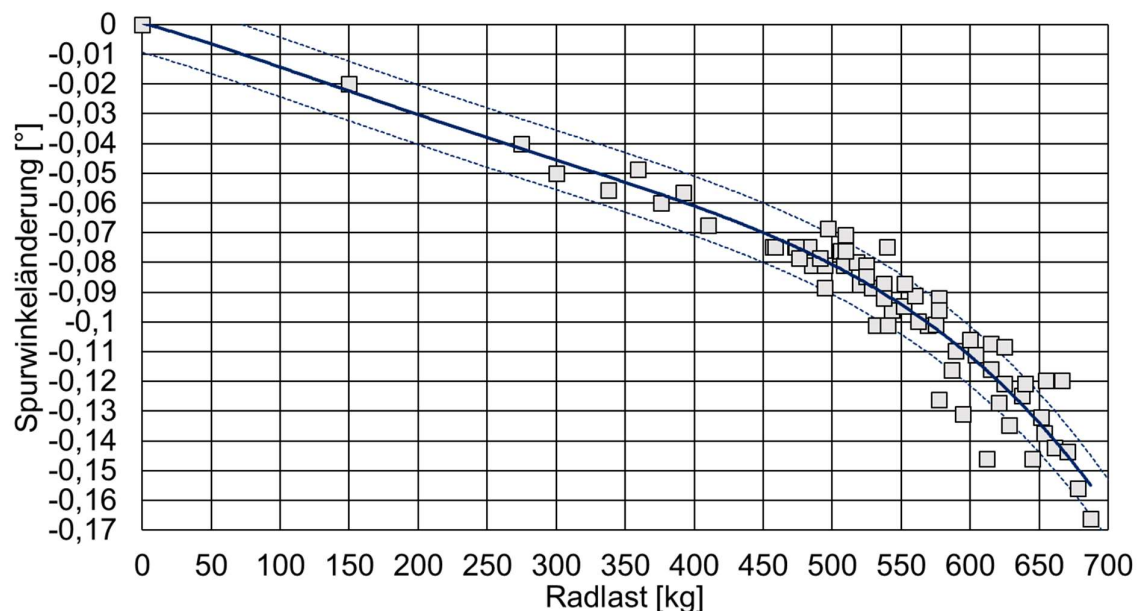


Abbildung 66 elastokinematisches Spuränderungsverhalten [vgl. Tra17]

Die Häufung der Messpunkte im Bereich 450 kg – 675 kg Radlast ist auf die kleinere Abstufung der Zusatzbeladung zurückzuführen. Dieser Radlastbereich entspricht dem Radlastband der laufenden Fahrzeugproduktion. Das Spuränderungsverhalten zeigt auf, dass der Spurwinkel mit zunehmender Radlast kleiner wird bzw. sich negativ in Richtung Nachspur ändert. Das Spuränderungsverhalten ist abhängig vom verwendeten Achskonzept und kann bei einer anderen Achsvariante, beispielsweise einer Schwertlenkerachse, eine andere Ausprägung darstellen. Die Hüllkurven zeigen den Toleranzbereich von $\pm 0,016^\circ$. Der Toleranzbereich folgt aus der Qualität der prognostizierten Gewichte sowie den ermittelten Werten für das Spuränderungs-

verhalten. Mit der prognostizierten Radlast kann über die Formel der Spuränderungskurve der entsprechende Korrekturwert im belasteten Zustand ermittelt werden. Abbildung 67 zeigt das elastokinematische Sturzänderungsverhalten, welches gleichzeitig zum Spuränderungsverhalten bestimmt wurde.

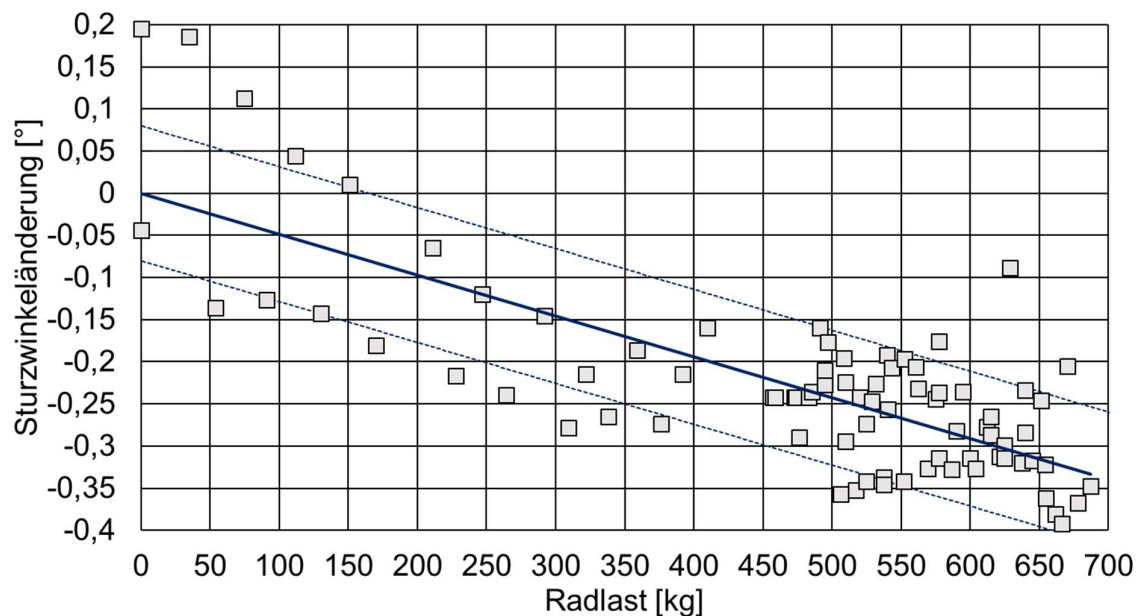


Abbildung 67 elastokinematisches Sturzänderungsverhalten [vgl. Tra17]

Das elastokinematische Sturzänderungsverhalten zeigt einen linearen Verlauf auf. Mit zunehmender Radlast wird der Sturzwinkel kleiner. Dies bedeutet, dass sich ein größerer negativer Sturzwinkel einstellt. Der Korrekturwert wird, wie beim Spuränderungsverhalten, über die simulierter Radlast und der entsprechenden Sturzänderungsformel ermittelt. Der Einfluss der Radlast auf den Sturzwinkel ist relativ gesehen niedriger als der Einfluss der Radlast auf den Spurwinkel. Der Sturzwinkel wird deutlich stärker über das Fahrzeugniveau beeinflusst. [Mer16] Dieses Verhalten ist auf das Achskonzept einer Mehrlenkerhinterachse bei der Mercedes-Benz S-Klasse zurückzuführen.

3.3.2 Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse

Die Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse beinhaltet produkt-, prozess- und betriebsmittelspezifische Faktoren, die die Fahrwerkgeometrievermessung beeinflussen. Die auftretenden Form- und Lagetoleranzen werden umgerechnet und als Winkelfehler bei der Spur- und Sturzwinkelmessung ausgegeben.

Die experimentellen Voruntersuchungen haben gezeigt, dass produktseitig das Messobjekt sowie die elastokinematischen Einflüsse wichtige Faktoren bei der Fahrwerkgeometrievermessung darstellen. Der Radflansch wird im Wesentlichen

durch den Einfluss des Planlaufs und dem daraus resultierenden Taumelwinkel beeinflusst. Die raue und wellige Messoberfläche spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Abbildung 68 zeigt den Radflansch im Detail sowie die blau markierte Messoberfläche am Zentrierabsatz.

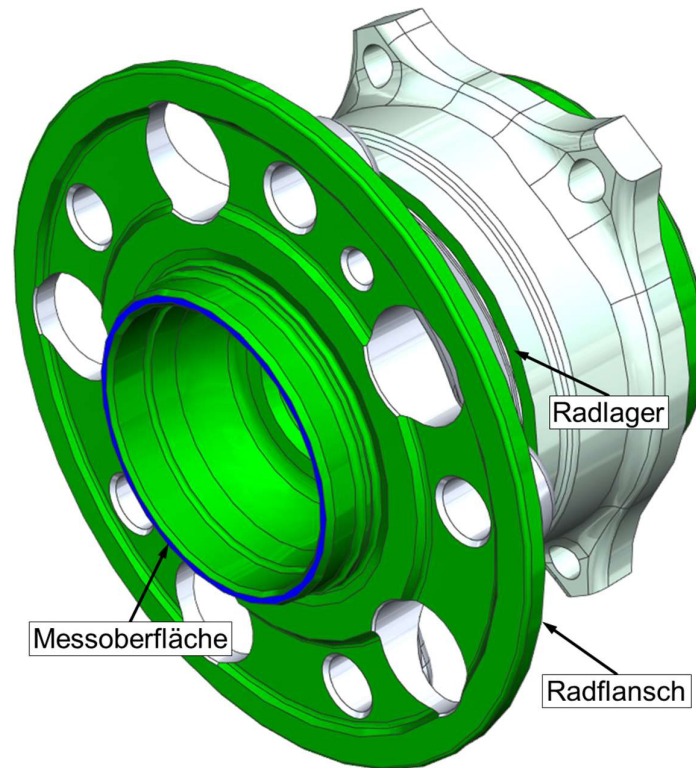


Abbildung 68 Radflansch

Der Planlauf des Radflansches ist mit 30 μm (s. Tabelle 3) angegeben. Daraus folgt, dass das Toleranzband $\pm 0,015 \text{ mm}$ beträgt. Die nachfolgende Berechnung beschreibt die Auswirkung des Toleranzbandes auf die Fahrwerkswinkel des Radflansches bei einem Durchmesser des Zentrierabsatzes von 66,5 mm. Da die Auslenkung des Messobjekts durch die Fahrwerkgeometriewinkel im Vergleich zum Durchmesser des Messobjekts sehr klein sind, kann zur Vereinfachung der Berechnung der Tangens verwendet werden.

$$\tan \alpha_{Plan} = \frac{0,015 \text{ mm}}{66,5 \text{ mm}} \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$\alpha_{Plan} = 0,013^\circ$$

α_{Plan} : entstehender Winkel durch die Planlauftoleranz

Der theoretische Messfehler, der durch den Planlauf des Radflansches entsteht, beträgt $\pm 0,013^\circ$.

Ein weiterer produktseitiger Toleranzbeitrag entsteht durch die elastokinematischen Einflüsse der Gummilagerung unter statischer Radlast. Die Fahrwerkgeometriemessung findet im ausgefederten Zustand und ohne Radlast statt. Dies bedeutet, dass die gemessenen Werte auf die fahrfertige Lage im Zielniveau sowie unter Radlast umgerechnet werden müssen. Abbildung 69 zeigt beispielhaft die Radaufhängung mit Lenkern und Gummilagern einer Mercedes-Benz S-Klasse an der Hinterachse.

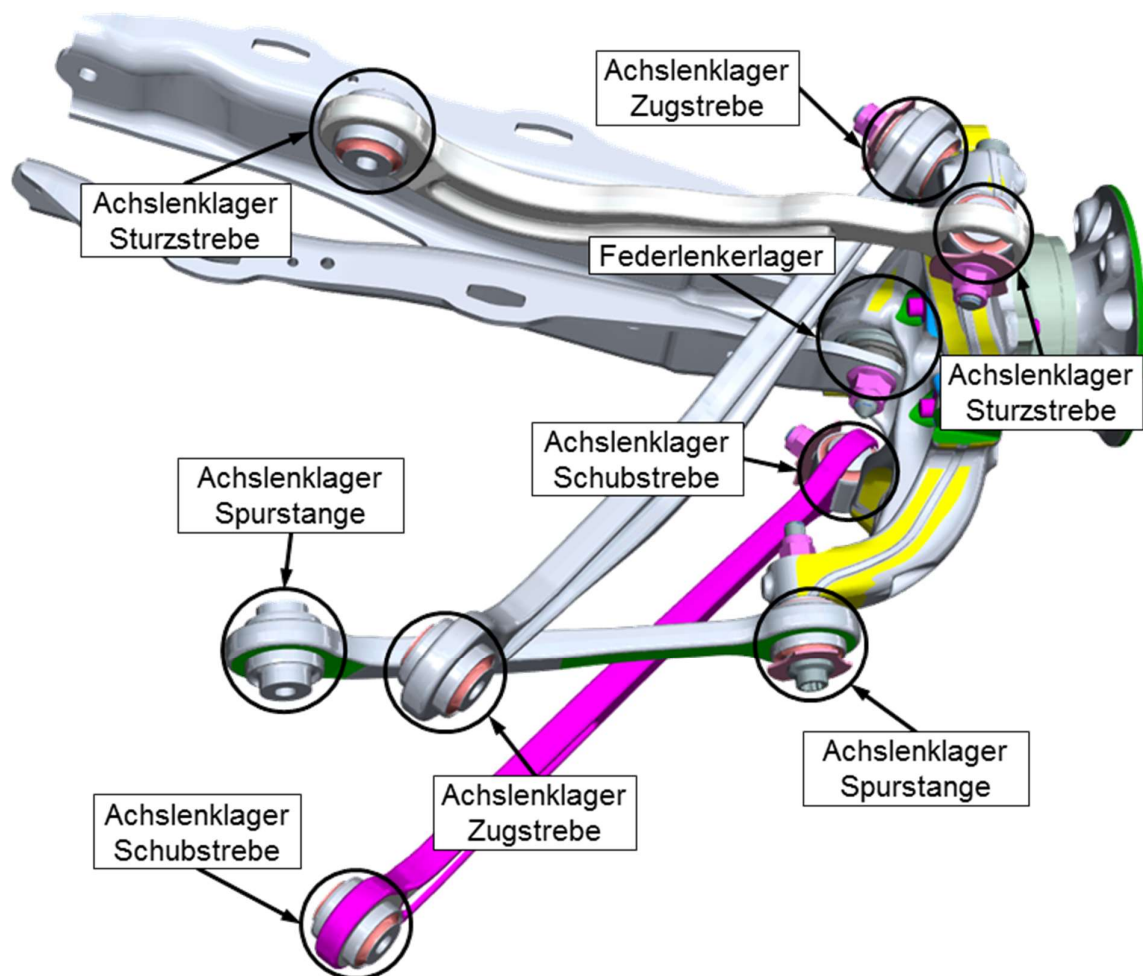


Abbildung 69 Elastokinematik durch Gummilagerung in der Radaufhängung

Ein weiterer Eintrag für die Toleranzberechnung entsteht durch den Prozess der Niveau- und Gewichtsprädiktion, da der Algorithmus mit Fehlern behaftet ist. Zum einen wird das Gewicht jedes einzelnen Fahrzeugs nicht exakt bestimmt (s. Abbildung 63). Außerdem unterliegen die Gummilagerungen ihren eigenen Toleranzen, die sich in unterschiedlichen Lagersteifigkeiten bemerkbar machen. Insgesamt ergeben die

Toleranzfaktoren der Niveau- und Gewichtsprädiktion sowie der Elastokinematik einen theoretischen Messfehler von $\pm 0,016^\circ$. Der Messfehler basiert auf den Hüllkurven des Spuränderungsverhalten über der Radlast unter Berücksichtigung des Gewichtsprädiktionsfehlers (s. Abbildung 66).

Betriebsmittelseitig tragen der Lasertriangulationssensor sowie die Linearführungen einen Beitrag zum Messfehler ein. Abbildung 70 zeigt den eingesetzten Lasertriangulationssensor der Firma LAP Laser GmbH.

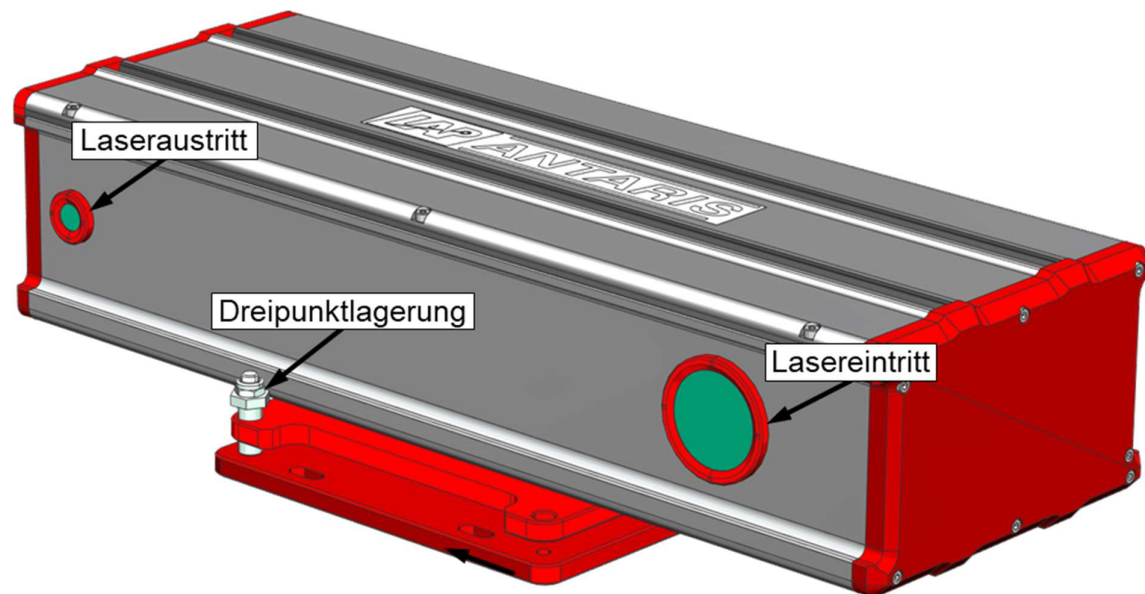


Abbildung 70 Lasertriangulationssensor

Die Messunsicherheit des Lasertriangulationssensors entsteht durch interne Bauteiltoleranzen sowie durch die Qualität der Linearisierung des Kamerachips. Der verwendete Lasertriangulationssensor weist laut Kalibrierung eine Messunsicherheit von $12 \mu\text{m}$ auf. [Lap16] Dies entspricht einem Toleranzband von $\pm 0,006 \text{ mm}$.

$$\tan \alpha_{\text{Laser}} = \frac{0,006 \text{ mm}}{66,5 \text{ mm}} \quad \text{Gl. 3.2}$$

$$\alpha_{\text{Laser}} = 0,005^\circ$$

α_{Laser} : entstehender Winkel durch den Laser

Der theoretische Messfehler, der durch die Linearität und die Messunsicherheit des Lasertriangulationssensors entsteht, beträgt +/- 0,005°.

Der Einfluss durch die Konstruktion des Betriebsmittels entsteht im Wesentlichen durch die Laufparallelität der Linearführungen. Die Fertigungstoleranzen der Grundplatte, auf der die Linearführungen montiert sind, werden durch die Steifigkeit der Führungsschienen und das Andrücken nahezu vollständig eliminiert. Abbildung 71 zeigt die eingesetzten Linearführungen sowie den Querschnitt mit markierten relevanten Parallelitäten.

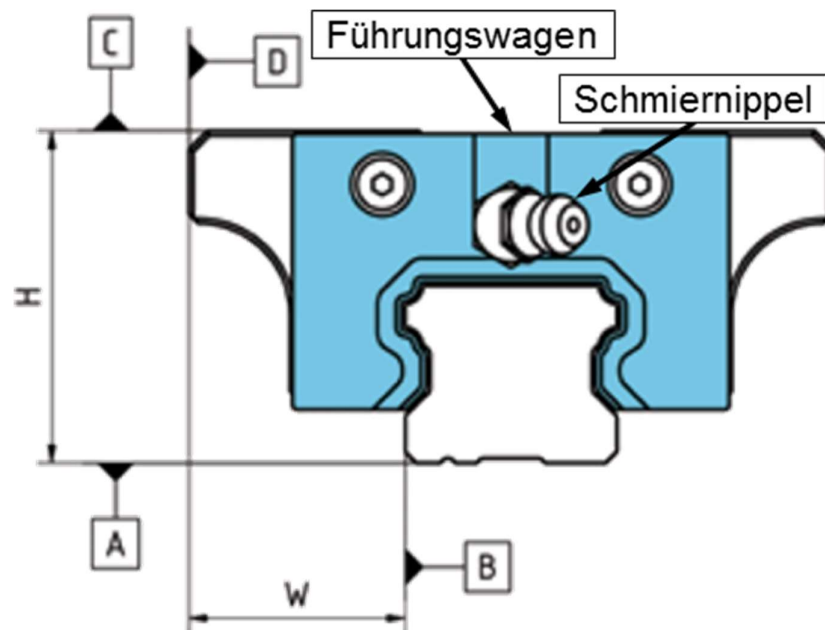


Abbildung 71 Querschnitt einer Linearführung [Ntn15]

Die horizontale Parallelität (A zu C) bei den eingesetzten Linearführungen ist mit 4 µm angegeben. Die vertikale Parallelität (B zu D) beträgt 5 µm. In Summe ergibt sich für die Laufparallelität der Linearführungen ein Wert von 9 µm. Dies entspricht einem Toleranzband bezüglich der Messgenauigkeit der Fahrwerkgeometrievermessung von +/- 0,0045 mm.

$$\tan \alpha_{Linear} = \frac{0,0045 \text{ mm}}{66,5 \text{ mm}} \quad \text{Gl. 3.3}$$

$$\alpha_{Linear} = 0,004^\circ$$

α_{Linear} : entstehender Winkel durch die Linearführungen

Der theoretische Messfehler, der durch die Parallelität der Linearführungen entsteht, beträgt $\pm 0,004^\circ$.

Tabelle 7 stellt eine Zusammenfassung der Einzeltoleranzen für die Messgenauigkeit und die Bewertungstoleranz der Fahrwerkgeometrievermessung bezüglich dem Produkt, dem Prozess sowie dem Betriebsmittel dar.

Tabelle 7 Zusammenfassung und Summe der Einzeltoleranzen

Radflansch	Elastokinematik	Laser	Linearführungen
$\pm 0,013^\circ$	$\pm 0,016^\circ$	$\pm 0,005^\circ$	$\pm 0,004^\circ$
		Messgenauigkeit: $\sum \pm 0,009^\circ$	
Bewertungstoleranz: $\sum \pm 0,038^\circ$			

Die vorgestellten Toleranzen beziehen sich auf den maximal eintretenden Fehler, der den schlimmsten anzunehmenden Fall beim Produkt, Prozess und Betriebsmittel darstellt. Die Messgenauigkeit eines Fahrwerkstandes von $\pm 0,01^\circ$ für die Fahrwerkgeometrievermessung wird mit $\pm 0,009^\circ$ (Toleranz Laser + Toleranz Linearführungen) auch unter schlechtesten Bedingungen erreicht. Die Summe aller Einzeltoleranzen beträgt $\pm 0,038^\circ$. Dies bedeutet, dass die Fahrwerkgeometrie eines Fahrzeugs durch die neuartige berührungslose Inline Fahrwerkvermessung auf maximal $\pm 0,038^\circ$ genau bestimmt werden kann. Dies stellt gleichzeitig die Bewertungstoleranz dar.

3.3.3 Prozessbeschreibung für den Montagefließ- und Montagetaktbetrieb

Der neuartige Ansatz zur Durchführung von Kalibrierumfängen durch die Inline Fahrwerkgeometrievermessung sieht vor die Fahrwerkgeometrie in der Montagelinie zu vermessen, um anschließend Fahrerassistenzsysteme zu kalibrieren. Dies führt dazu, dass die Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen auf dem Fahrwerkstand nicht mehr durchgeführt werden muss.

Die Prozessbeschreibung für den Montagefließ- und den Montagetaktbetrieb sind im Wesentlichen identisch. Hauptsächlich werden die beiden Prozesse darin unterschieden, dass im Montagetaktbetrieb die Betriebsmittel zur Fahrwerkgeometrievermessung und zur Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme mit der Geschwindigkeit des Montagebandes synchronisiert werden müssen. Der weitere Ablauf der Messung und Kalibrierung entspricht dem Montagetaktbetrieb. Abbildung 72 zeigt die Möglichkeiten des Prozesses.

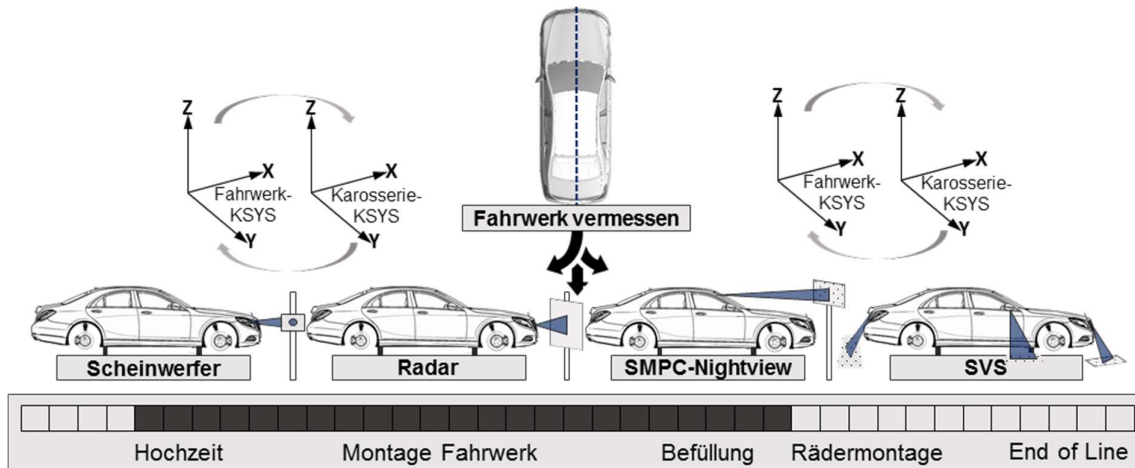


Abbildung 72 Prozessdarstellung

Für die Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen muss die Fahrwerkgeometrie (geometrische Fahrachse) bekannt sein. Sobald das Fahrwerk vermessen wurde, kann die Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme stattfinden. Dabei kann die Reihenfolge der Inbetriebnahme flexibel gewählt werden. Als mögliche Orte für die Fahrwerkgeometrievermessung und Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme eignet sich der Bereich nach der Hochzeit bis hin zur Rädermontage. Für die Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme muss der Aufbauzustand des Fahrzeugs entsprechen weit fortgeschritten sein. Das Fahrzeug muss diagnosefähig und elektrisch kontaktierbar sein. Ab dem Zeitpunkt der Rädermontage kann die Fahrwerkgeometrievermessung nicht mehr durchgeführt werden, da das Messobjekt nicht mehr sichtbar ist. Die Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme kann auch nach der Rädermontage noch durchgeführt werden. Hierzu muss bei der Fahrwerkgeometrievermessung das Koordinatensystem des Fahrwerks mit der geometrischen Fahrachse an das Koordinatensystem der Karosserie angeheftet werden. Dieser Vorgang erfolgt durch eine zusätzlich installierte Messtechnik im Montageband. Dadurch kann in beliebigen Folgetakten die Fahrwerkgeometrie über die Karosserie erneut abgerufen und eine Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme durchgeführt werden.

Am Beispiel einer Produktionshalle mit 3 Fahrwerkständen und einer Ausbringung von 35 Fahrzeugen pro Stunde im 2-Schichtbetrieb wird das mögliche Potential der Inline Fahrwerkgeometrievermessung und Kalibrierung dargestellt. Die Taktzeit auf dem Fahrwerkstand ist mit 180 Sekunden ohne Ein- und Ausfahren angesetzt. Es werden nur die zeitbestimmenden Prozessschritte des Fahrwerkstandes dargestellt. Abbildung 73 zeigt das neue Taktzeitdiagramm im Vergleich zur Gesamtzeit für den Fahrwerkstand.

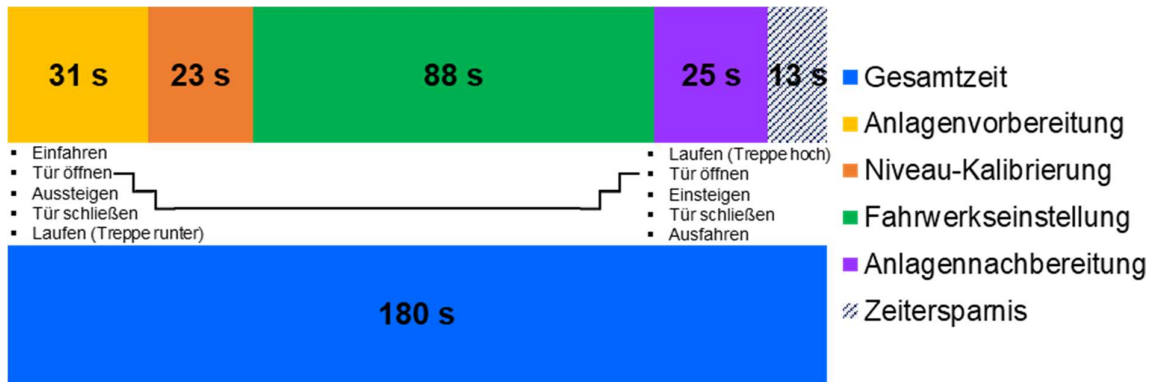


Abbildung 73 neues Taktzeitdiagramm für den Fahrwerkstand

Durch die vorgezogene Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme wird eine Zeitersparnis von 13 Sekunden auf jedem Fahrwerkstand erreicht. Dies ist auf den Entfall der Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme zurückzuführen. Außerdem ist in ca. 1/3 der Fälle die Scheinwerfereinstellung langsamer als die Fahrwerkeinstellung. Dieses Potential wird ebenfalls durch eine Vorverlagerung in die Montagelinie ausgeschöpft. Ferner ist es möglich den Fahrwerkstand mit nur noch einem Werker zu betreiben. Für die Inline Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme wird ein Werker zur Scheinwerfereinstellung benötigt. Dem gegenüber entfällt je ein Werker pro Fahrwerkstand, da der Werker der das Fahrzeug einfährt nur noch die Fahrwerkeinstellung durchzuführen hat. Bei einer fehlerhaften Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme in der Montagelinie kann die Kalibrierung auf dem Fahrwerkstand wiederholt werden, da die entsprechenden Betriebsmittel vorhanden sind.

4 Entwurf und Ausarbeitung der Inline Fahrwerkgeometrievermessung

Dieses Kapitel behandelt die Automatisierungstechnik des Betriebsmittels sowie die Entwicklung eines geeigneten Mess- und Auswerteverfahrens. Das Verfahren ist notwendig, da das Fahrzeug im Prozess nicht auf eigenen Rädern steht.

4.1 Betriebsmittelinbetriebnahme und Anlagendigitalisierung

Für den Transport des Betriebsmittels können die Anschlusskabel am Betriebsmittel demontiert werden. Die Anschlusskabel verbleiben zu Transportzwecken am Schaltschrank fest verbunden. Zur Inbetriebnahme müssen die Anschlusskabel durch die Schleppkette durchgeführt werden und mit den entsprechenden Komponenten verbunden werden. Alle Anschlusskabel sind eindeutig beschriftet, um eine Fehlkontaktierung zu vermeiden. Die Spannungsversorgung des Betriebsmittels erfolgt über den Hauptanschluss mit 400 Volt. Der Ausgabemonitor, der Raspberry PI sowie der W-LAN Router werden über eine Steckdose mit einer Spannung von 230 Volt versorgt. Der Einschaltvorgang erfolgt am Schaltschrank über den Hauptschalter. Nachdem die Software hochgefahren ist, wird die Motorfreigabe erteilt und beide Betriebsmittel referenziert. Beim Referenzieren fahren die Betriebsmittel in die Referenzschalter und Nullen die X- sowie die Z-Koordinate. Die Programmsoftware verfügt über einen Hand- und einen Automatikbetrieb. Abbildung 74 zeigt das HMI (Human Machine Interface) im Handbetrieb.

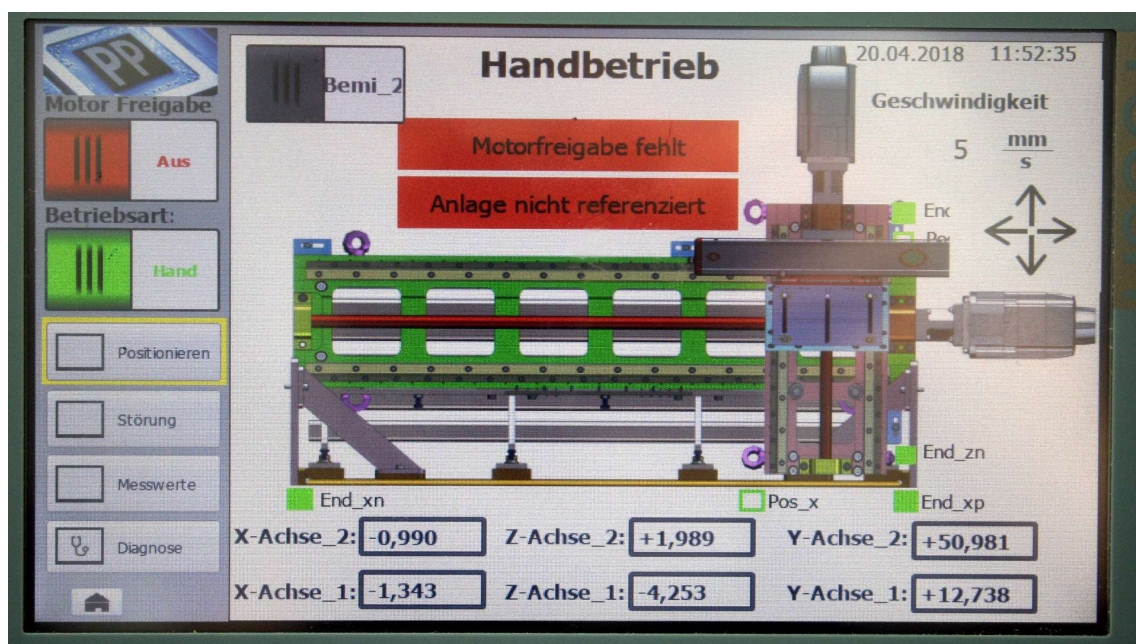


Abbildung 74 Handbetrieb

Im Handbetrieb kann mit einem Joystick jedes Betriebsmittel individuell verfahren werden. Über eine Auswahloption wird das manuell zu verfahrenende Betriebsmittel ausgewählt. Die Bewegungsabläufe des Betriebsmittels sind als Live-Animation in die Anzeige des HMI integriert. Abbildung 75 zeigt den Automatikbetrieb.

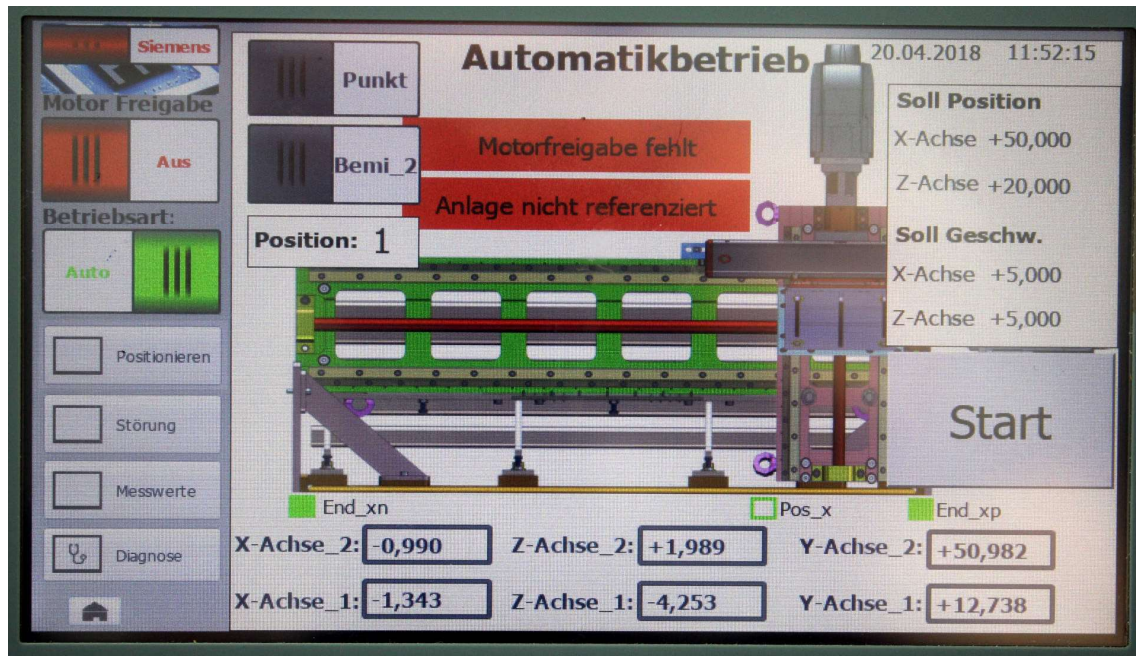


Abbildung 75 Automatikbetrieb

Im Automatikbetrieb können unter anderem Punkte über die Eingabe von Koordinaten und Sollgeschwindigkeiten angefahren werden. Über die Startschaltfläche und die Betriebsmittelauswahl wird das gewünschte Betriebsmittel auf das eingestellte Koordinatenpaar gefahren. Der zweite Modus des Automatikbetriebs beschreibt die eigentliche Fahrwerkgeometrievermessung. Nach Auswahl des Messprogramms wird über einen Betätigungsschalter auf der Frontseite des Schaltschranks die Fahrwerkgeometrievermessung gestartet. Sobald die Messung beendet ist, erscheinen die Messergebnisse auf dem Ausgabemonitor. Die Topologie zur Visualisierung der Messergebnisse ist über einen W-LAN Router, einem Raspberry Pi 3 und einem Ausgabemonitor, der wahlweise durch ein W-LAN-fähiges Endgerät ersetzt werden kann, realisiert. Die Messergebnisse werden als Variablen von der Automatisierungssoftware in eine HTML-Datei geschrieben und auf einem Webserver der speicherprogrammierbaren Steuerung abgelegt. Der Webserver wird von der Automatisierungssoftware zyklisch durchlaufen und aktualisiert dabei die Variablen. Die Messergebnisse werden dargestellt, indem der Webserver über einen internetfähigen Browser aufgerufen wird. Abbildung 76 zeigt die Darstellung der Messergebnisse auf der Internetseite.

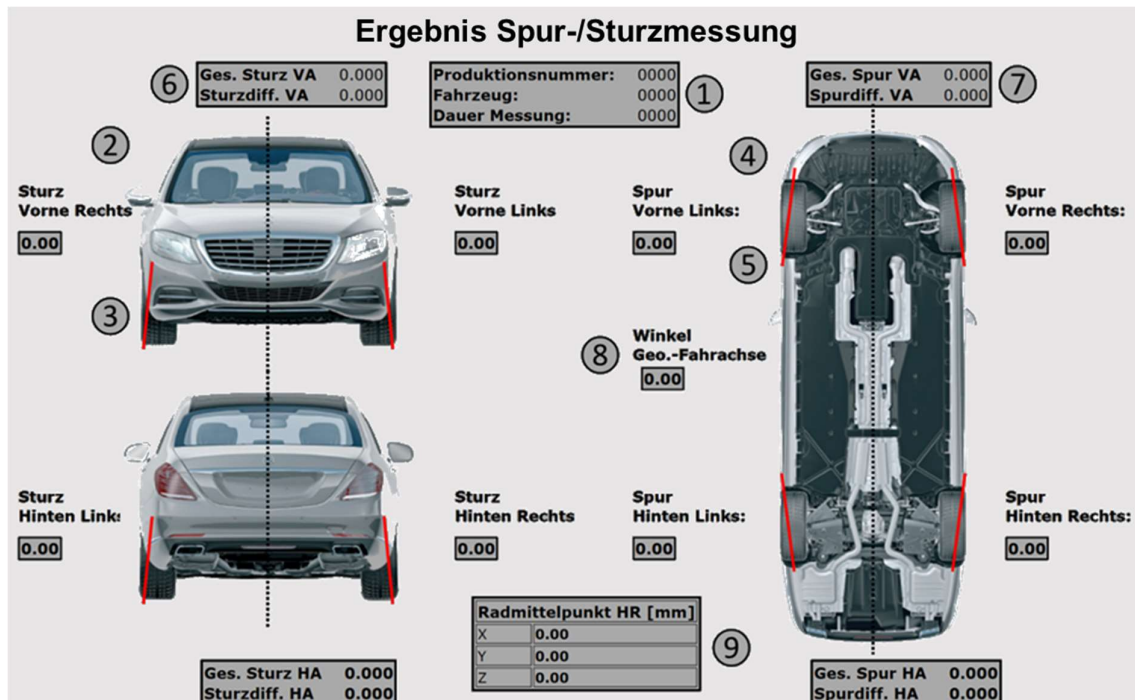


Abbildung 76 Darstellung der Messergebnisse auf einem Webserver [vgl. Gra18]

Die Messergebnisdarstellung enthält Informationen über die Messdauer, die Produktionsnummer sowie über das Fahrzeugbaumuster (1). Der Wert der Sturzwinkel in Grad (2) und die grafische Anzeige von positivem und negativem Sturz werden ebenfalls dargestellt (3). Den Wert der Spurwinkel in Grad (4) und die grafische Darstellung von Vor- und Nachspur (5) werden auf der rechten Seite angezeigt. Zudem ist die Summe der Einzelsturz- (6) und Einzelspurwinkel (7) sowie der Wert der geometrischen Fahrachse (8) enthalten. Eine Tabelle gibt die ermittelten Radmittelpunkte (9) aus.

4.2 Modellprädiktive Regelung des Betriebsmittels

Die Inhalte bezüglich der modellprädiktiven Regelung beziehen sich auf [Eie17]. Die modellprädiktive Regelung beschreibt ein Regelungskonzept, dass für lineare und nichtlineare Systeme angewendet wird. [Völ16] Ein dynamisches Modell prognostiziert das zukünftige Streckenverhalten und optimiert die aktuellen Stellgrößen. Die modellprädiktive Regelung zeichnet sich vor allem durch die hohe Regelgüte im Vergleich zu klassischen Reglern aus. Abbildung 77 zeigt schematisch die Funktionsweise des modellprädiktiven Reglers am Beispiel einer Bewegung des Betriebsmittels auf der Z-Achse.

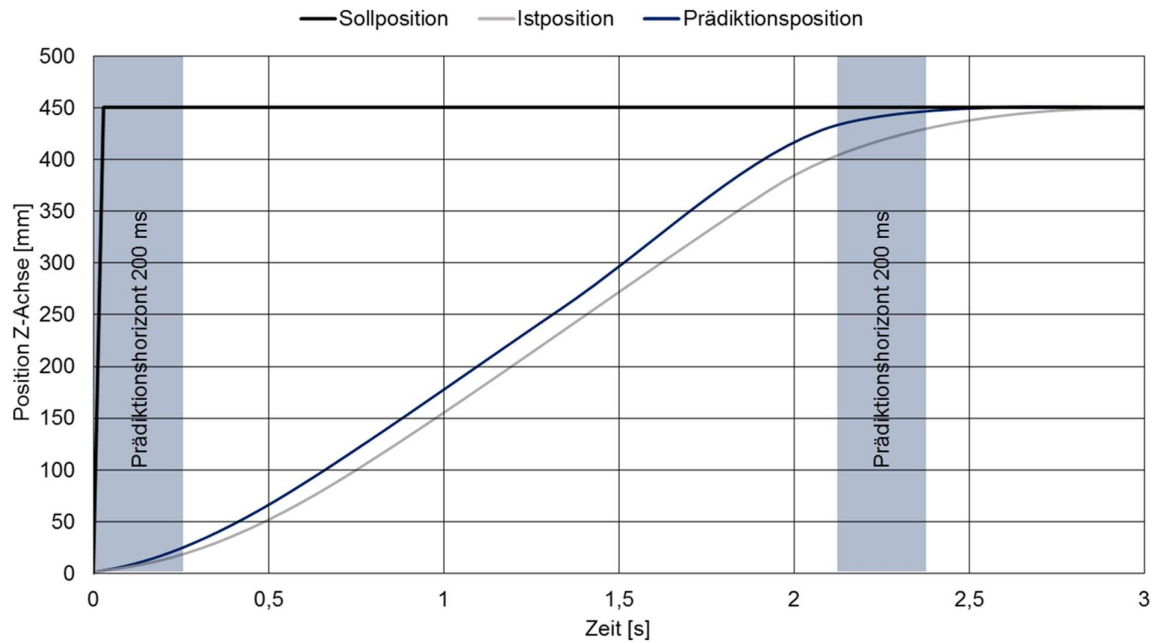


Abbildung 77 Funktionsweise des modellprädiktiven Reglers [vgl. Eie17]

In diesem Beispiel soll das Betriebsmittel auf die Position 450 mm der Z-Achse fahren. Der Regler berechnet im zuvor definierten Prädiktionshorizont die Prädiktionsposition des Betriebsmittels und vergleicht sie mit der Istposition. Dadurch kann beispielsweise der Bremsvorgang gezielter eingeleitet werden, da die Sollposition 200 ms früher durch den Prädiktionshorizont erkannt wird. Das Betriebsmittel erreicht durch eine gezielte Bremsung die Sollposition früher und wird exakter auf der Sollkoordinate positioniert. Die Massenträgheiten des Betriebsmittels sind im modellprädiktiven Regler parametrisiert, sodass eine Bremsung mit und gegen die Schwerkraft unterschieden werden kann. Abbildung 78 stellt den zeitlichen Verlauf einer Bewegung des Betriebsmittels auf der horizontalen X-Achse dar.

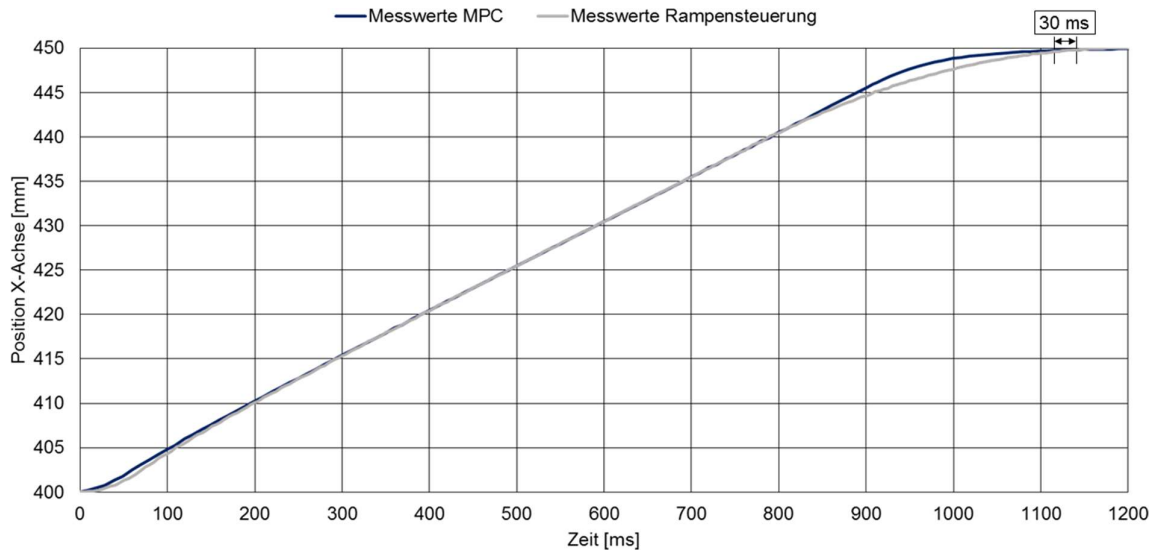


Abbildung 78 Zeitverlauf einer Bewegung auf der X-Achse [vgl. Eie17]

Im zeitlichen Verlauf werden der modellprädiktive Regler und eine konventionelle Rampensteuerung verglichen. Dabei erreicht der modellprädiktive Regler die Sollposition 30 ms schneller. Eine Optimierung der Rampensteuerung durch eine kürzere Abbremszeit erhöht die Gefahr, dass das Betriebsmittel den Sollwert überfährt. Abbildung 79 zeigt den zeitlichen Verlauf bei einer vertikalen Fahrt auf der Z-Achse nach unten.

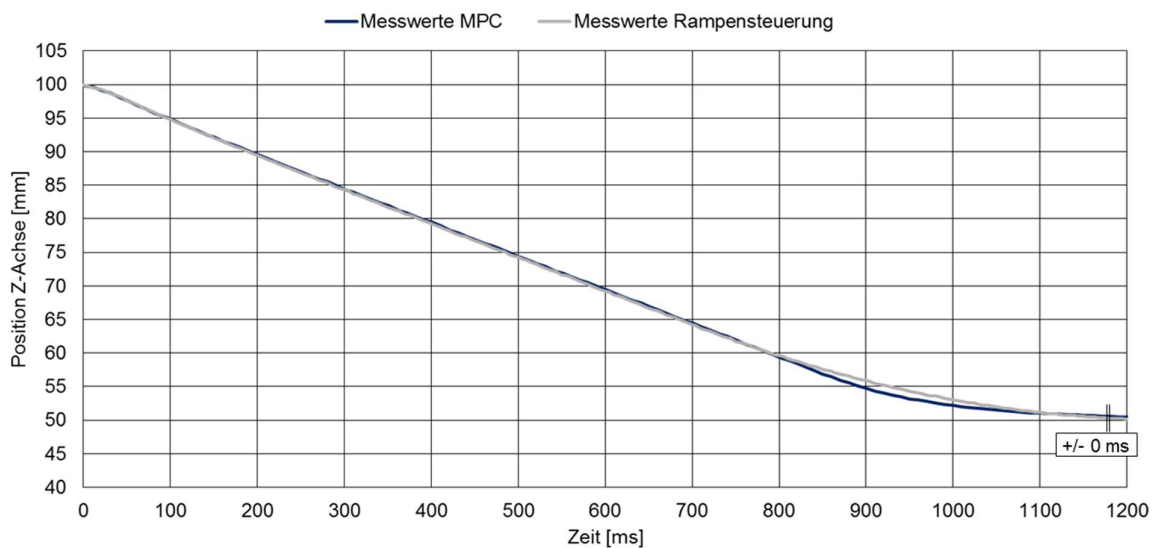


Abbildung 79 Zeitverlauf einer Bewegung auf der Z-Achse nach unten [vgl. Eie17]

In diesem Fall wirkt die Schwerkraft in die gleiche Richtung wie die Bewegung des Betriebsmittels. Die Rampensteuerung wurde in den Versuchen auf dieses Szenario ausgelegt. Beide Regler erreichen die Sollposition zum gleichen Zeitpunkt. Der Bremsvorgang wird bei der Rampensteuerung 50 ms früher begonnen als bei der modellprädiktiven Regelung. Nachfolgend zeigt die Abbildung 80 die vertikale Fahrt entlang der Z-Achse des Betriebsmittels nach oben. In diesem Fall wirkt die Schwerkraft entgegen der Fahrtrichtung.

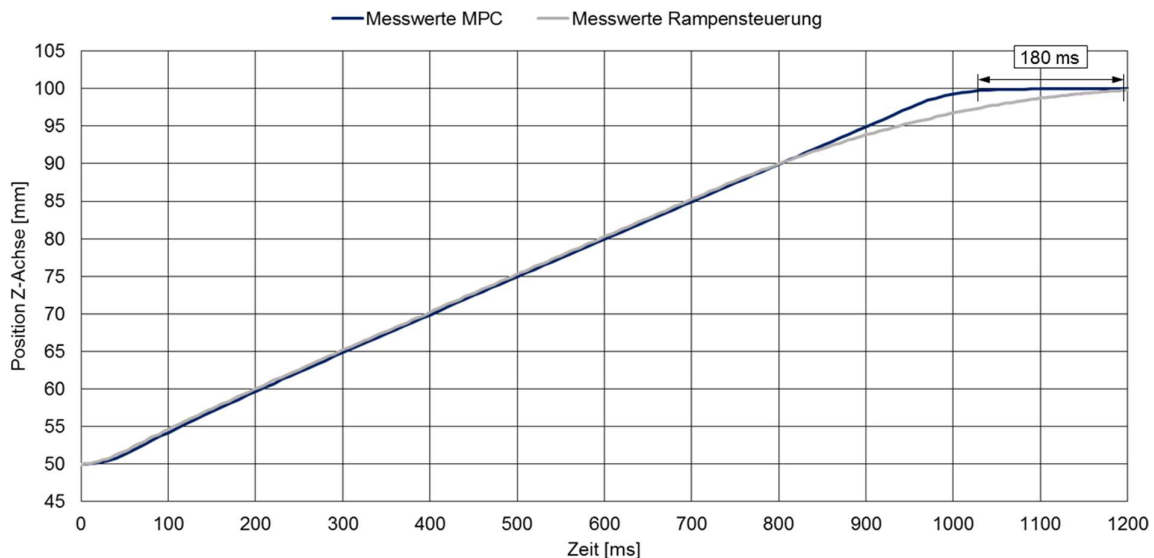


Abbildung 80 Zeitverlauf einer Bewegung auf der Z-Achse nach oben [vgl. Eie17]

Der modellprädiktive Regler erreicht die Sollposition 180 ms früher, da die Rampensteuerung auf die vertikale Bewegung nach unten parametrisiert wurde. Der modellprädiktive Regler ist in der Lage, die Schwerkraft zu berücksichtigen und leitet den Bremsvorgang entsprechend später ein als die Rampensteuerung. Bei einer Vielzahl von zu messenden Punkten am Messobjekt ergibt sich durch den modellprädiktiven Regler eine Zeitersparnis beim Messvorgang im Vergleich zur konventionellen Rampensteuerung.

4.3 Modell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung

In üblichen Fahrwerkgeometrievermessungsanlagen wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug sowie das Betriebsmittel parallel zum Horizont ausgerichtet sind. Bei konventionellen Fahrwerkgeometrievermessungsanlagen für den Werkstattgebrauch befindet sich das Fahrzeug auf einer Hebebühne. Weder die Anlage noch das Fahrzeug sind in der Lage eine Schiefstellung zu erkennen bzw. korrekt zu

kompensieren, da die Anlagenmesstechnik nicht über die entsprechenden Bewegungsfreiheitsgrade verfügt. Dies gilt ebenfalls für den Fahrwerkstand, der in der Fahrzeugproduktion eingesetzt wird. Ist eine Schiefstellung zwischen Fahrzeugfahrbahn- und Betriebsmittelebene gegeben, kommt es zu systematischen Fehlern bei der Messung. Im nicht realistischen Extremfall, das Fahrzeug steht um 90° zum Horizont geneigt, wird der Sturzwinkel anstelle des Spurwinkels gemessen und umgekehrt. Abbildung 81 veranschaulicht diesen Fall.

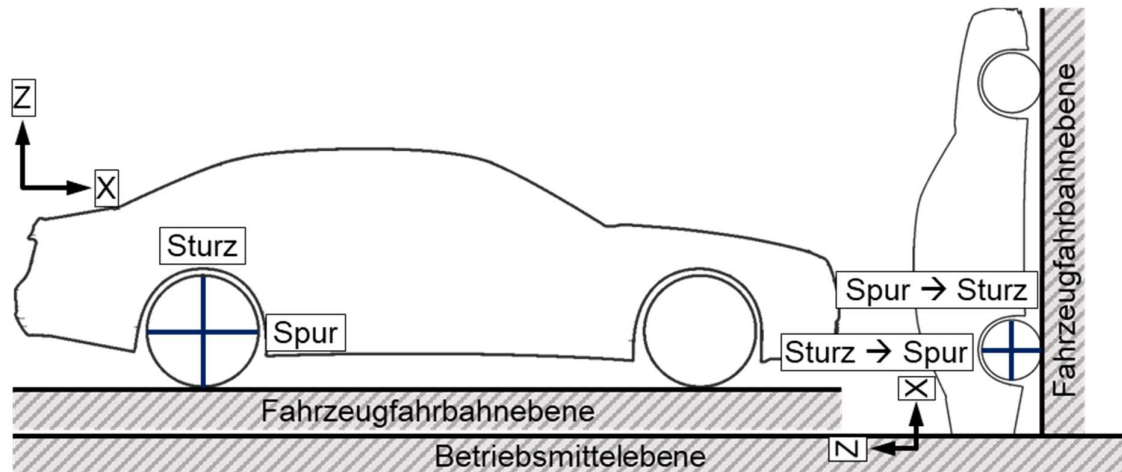


Abbildung 81 Fahrzeugneigung ergibt unterschiedliche Fahrwerkswinkel

Die Abbildung zeigt das Fahrzeug in einer Lage bei der die Betriebsmittelebene parallel zur Fahrzeugfahrbahnebene ausgerichtet ist. Die Fahrzeugfahrbahnebene ist über die vier Radaufstandspunkte des Fahrzeugs definiert. Spur- und Sturzwinkel werden korrekt gemessen. Das Fahrzeug daneben zeigt den Extremfall, wenn die Fahrzeugfahrbahnebene gegenüber der Betriebsmittelebene um 90° geneigt ist. Das Betriebsmittel misst in diesem Extremfall den Sturzwinkel des Fahrzeugs und gibt diesen als Spurwinkel aus. Der gemessene Spurwinkel des Fahrzeugs wird als Sturzwinkel ausgegeben. Bereits bei 1° Schiefelage des Fahrzeugs zum Horizont unter der Annahme, dass das Betriebsmittel parallel zum Horizont ausgerichtet ist, wird der Spurwinkel in Konstruktionsnulllage um $0,033^\circ$ falsch gemessen. Der Wert bezieht sich dabei auf eine Mercedes-Benz S-Klasse BR222 mit einem Radstand von 3165 mm und gemäß Prüfvorschrift eingestellten Spur- und Sturzwinkeln an der Hinterachse. Abbildung 82 verdeutlicht die Winkelfehlstellung in der X-Z Ansicht des Betriebsmittels.

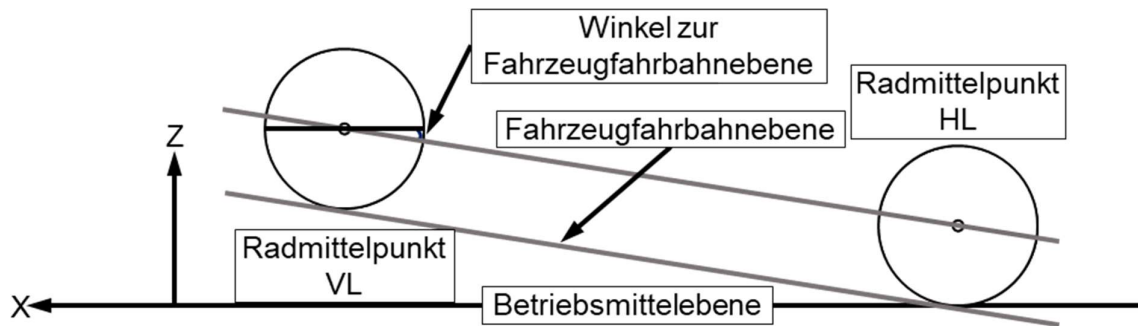


Abbildung 82 Ebenendarstellung der Winkelfehlstellung

Das Modell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung ist in der Lage beliebige Neigungen und Fahrzeugschiefstellungen zu erkennen und eine entsprechend korrekte Messung zu gewährleisten. Dabei können die Rotation um die Fahrzeug Y-Achse, die Rotationen um die Fahrzeug X-Achse sowie die Rotationen um die Fahrzeug Z-Achse kompensiert werden. Für die Modellbildung wird der Spurwinkel als Schnittwinkel zwischen zwei Vektoren wie folgt definiert [Kim08].

$$\varphi: \alpha(g, e_1) = \arccos\left(\frac{g * e_1}{|g| * |e_1|}\right) \quad \text{Gl. 4.1}$$

- φ: Spurwinkel
- g: Schnittgerade zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und der Raddrehebene
- e₁: Verbindungsvektor der Achsmittelpunkte der Vorder- und Hinterachse

Abbildung 83 stellt die Definition am Fahrzeugunterboden anschaulich dar.

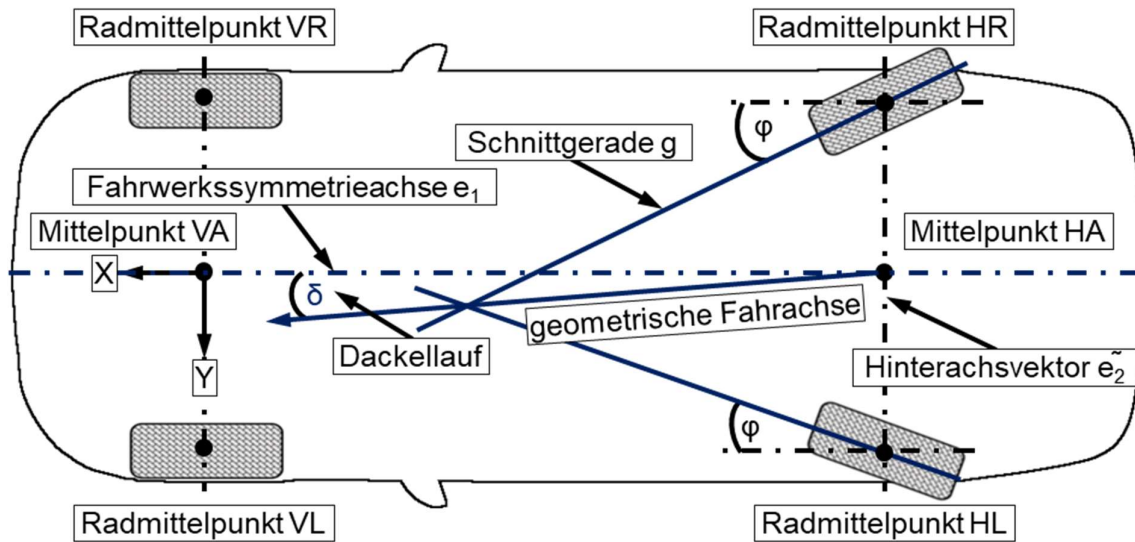


Abbildung 83 Vektordarstellung der Fahrwerkgeometrie

Der mathematisch zuvor definierte Zusammenhang ist nur in einer Orthonormalbasis anwendbar. Abbildung 83 zeigt eine Orthonormalbasis zwischen e_1 , \tilde{e}_2 und einem dritten senkrechten Vektor e_3 . Dies ist jedoch nicht immer der Fall. Das Modell erstellt diese Orthonormalbasis, sodass die oben genannte Definition anwendbar ist. Hierzu wird der Hinterachsvektor \tilde{e}_2 orthogonal zu e_1 und einem beliebigen senkrechten Vektor e_3 gestellt. Diese Anwendung hat keinen Einfluss auf den Spurwinkel, da der Spurwinkel laut Definition nur zwischen g und e_1 bestimmt wird. Des Weiteren gilt, dass die Fahrwerkssymmetrieachse bzw. die Fahrwerkssymmetrieebene senkrecht zur Fahrzeugfahrbahnebene verläuft und die Verbindungsstrecke der Achsmittelpunkte enthält. Außerdem wird vorausgesetzt, dass die Verbindungsstrecke der Achsmittelpunkte linear abhängig zu e_1 , nach Konstruktion des Koordinatensystems e_1, \tilde{e}_2, e_3 ist. Insbesondere ist die Fahrwerkssymmetrieebene genau $\text{span}(e_1, e_3)$. Wobei span die lineare Hülle von e_1 und e_3 bildet und somit eine Ebene darstellt. Zunächst werden die Koordinaten aller Radmittelpunkte mit dem Betriebsmittel im Betriebsmittelkoordinatensystem bestimmt. Die Koordinaten der Radmittelpunkte werden verwendet um die Mittelpunkte der Vorderachse und der Hinterachse zu bestimmen. Die Koordinaten der Achsmittelpunkte werden mit den nachfolgenden Formeln berechnet.

$$HM = \frac{1}{2}HL + \frac{1}{2}HR \quad \text{Gl. 4.2}$$

- HM: Koordinaten des Mittelpunktes an der Hinterachse
- HL: Koordinaten des Radmittelpunktes hinten links
- HR: Koordinaten des Radmittelpunktes hinten rechts

$$VM = \frac{1}{2}VL + \frac{1}{2}VR$$

Gl. 4.3

- VM: Koordinaten des Mittelpunktes an der Vorderachse
 VL: Koordinaten des Radmittelpunktes vorne links
 VR: Koordinaten des Radmittelpunktes vorne rechts

Abbildung 84 stellt die Rad- und Achsmittelpunkte grafisch dar.

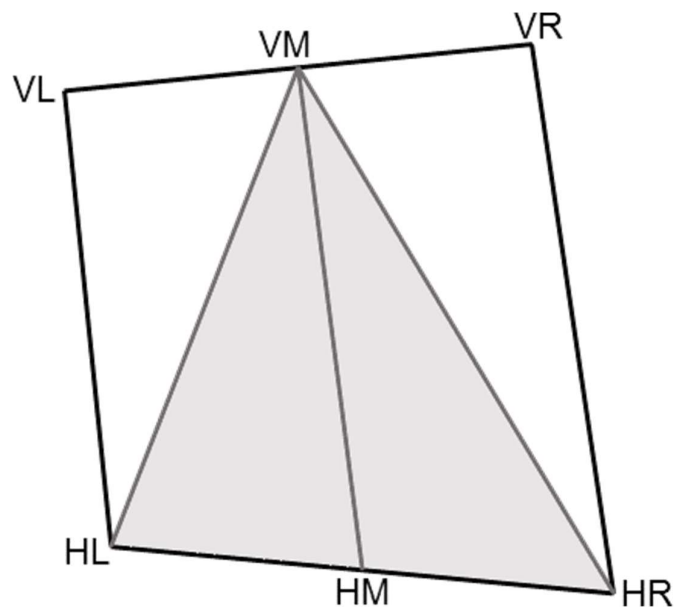


Abbildung 84 Ebenendarstellung der Rad- und Achsmittelpunkte

Das Aufstellen der Orthonormalbasis (e_1, e_2, e_3) erfolgt mit den zuvor bestimmten Achsmittelpunkten durch die nachfolgenden Formeln.

$$e_1 = \frac{VM - HM}{|VM - HM|}$$

Gl. 4.4

- e_1 : Verbindungsvektor der Achsmittelpunkte der Vorder- und Hinterachse
 VM: Koordinaten des Mittelpunktes an der Vorderachse
 HM: Koordinaten des Mittelpunktes an der Hinterachse

$$\tilde{e}_2 = \frac{HL - HM}{|HL - HM|} \quad \text{Gl. 4.5}$$

- \tilde{e}_2 : Hinterachsvektor
 HL: Koordinaten des Radmittelpunktes hinten links
 HM: Koordinaten des Mittelpunktes an der Hinterachse

Analog dazu erfolgt die Berechnung für \tilde{e}_2 der Vorderachse. Der Hinterachsvektor e_2 wird über das Gram-Schmidtsche Orthonormierungsverfahren bestimmt [Kar15].

$$e_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \langle e_1 | \tilde{e}_2 \rangle^2}} * \tilde{e}_2 - \sqrt{\frac{\langle e_1 | \tilde{e}_2 \rangle^2}{1 - \langle e_1 | \tilde{e}_2 \rangle^2}} * e_1 \quad \text{Gl. 4.6}$$

- e_2 : orthogonaler Hinterachsvektor
 e_1 : Verbindungsvektor der Achsmittelpunkte der Vorder- und Hinterachse
 \tilde{e}_2 : Hinterachsvektor

Der dritte senkrechte Vektor wird über ein Kreuzprodukt ermittelt [Jän05].

$$e_3 = (e_1 \times e_2) \quad \text{Gl. 4.7}$$

- e_3 : dritter senkrechter Vektor der Orthonormalbasis
 e_1 : Verbindungsvektor der Achsmittelpunkte der Vorder- und Hinterachse
 e_2 : orthogonaler Hinterachsvektor

Die Orthonormalbasis, der Spurwinkel, die Messpunkte RF_1 und RF_2 sowie alle Vektoren sind in Abbildung 85 dargestellt.

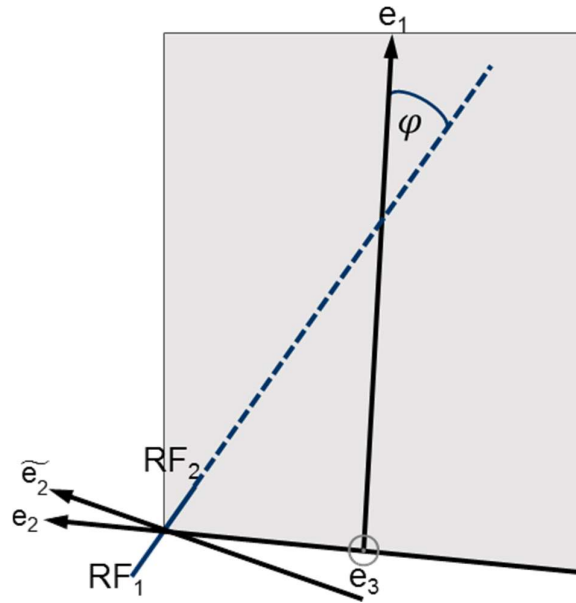


Abbildung 85 Orthonormalbasis für die Fahrwerkgeometrievermessung

Das Betriebsmittelkoordinatensystem wird im Radmittelpunkt zentriert, um die Punkte der Verbindungsstrecke RF_1 und RF_2 zu messen. Dabei bewegt sich jedes Betriebsmittel radindividuell entsprechend der vorangegangenen Koordinatensystemzentrierung. Dies hat zur Folge, dass jedes Messobjekt einen anderen Messverlauf zugewiesen bekommt. Nur im Idealfall, wenn die Fahrzeugfahrbahnebene zur Betriebsmittelebene parallel steht, würden alle Messobjekte den identischen Messverlauf zugewiesen bekommen.

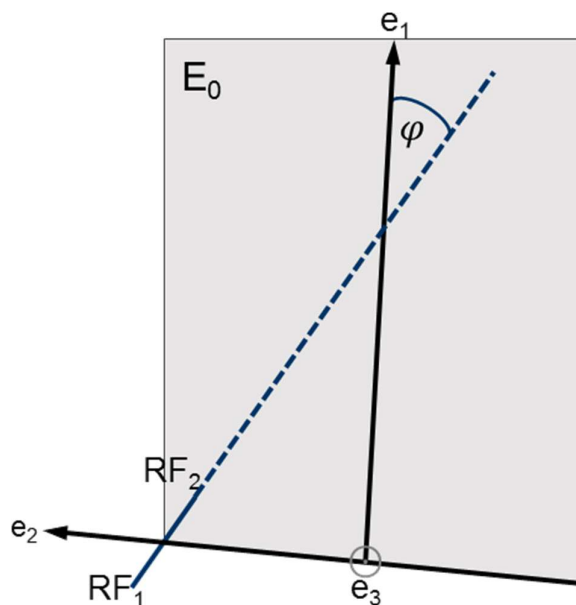


Abbildung 86 Orthonormalbasis des Laserverfahrweges

Der Lasertriangulationssensor bewegt sich nun auf der errechneten Ebene $E_0 = HL + \text{span}(e_1, e_2)$. Nach dieser Konstruktion geht die Verbindungsstrecke zwischen RF_1 und RF_2 durch den Radmittelpunkt, der den Ursprung des Koordinatensystems e_1, e_2, e_3 bildet, und liegt insbesondere in der Ebene $\text{span}(e_1, e_2)$. Dabei wird die Ebene E_0 mit der Ebene E_{XZ} des Betriebsmittels geschnitten. Diese Schnittgerade beschreibt den Fahrweg des Betriebsmittels, um eine korrekte Spurmessung durchzuführen. Analog dazu erfolgen die Ebenenschnitte mit den Radmittelpunkten HR, VL und VR.

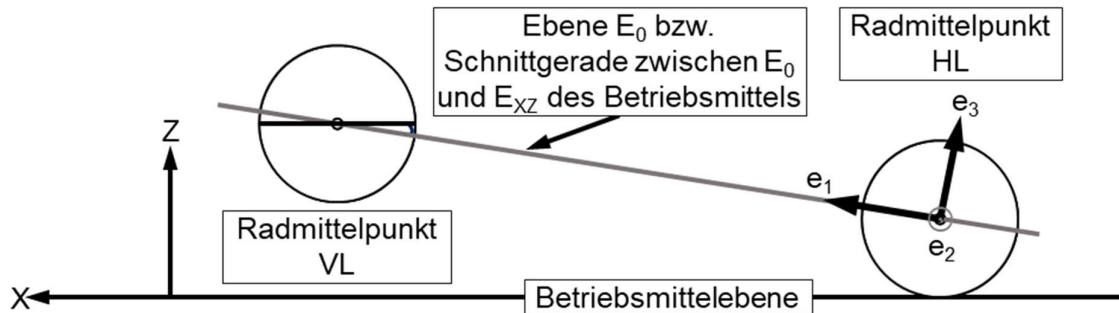


Abbildung 87 Seitenansicht mit dem Ebenenschnitt des Laserfahrweges

Weitere Verbindungsstrecken ober- und unterhalb des Radmittelpunktes können durch Parallelverschiebung entlang e_3 gemessen werden. Durch die Parallelverschiebung entlang e_3 wird die Spurmessung korrekt durchgeführt und es existiert kein Sturzeinfluss. Für die Berechnung der Koordinaten der Messpunkte RF_1 und RF_2 wird der Schnittwinkel zwischen der Fahrzeugfahrbahnebene und der Betriebsmittelebene ermittelt. Abbildung 88 veranschaulicht die Vektoren und Ebenen zur Koordinatenberechnung der Messpunkte.

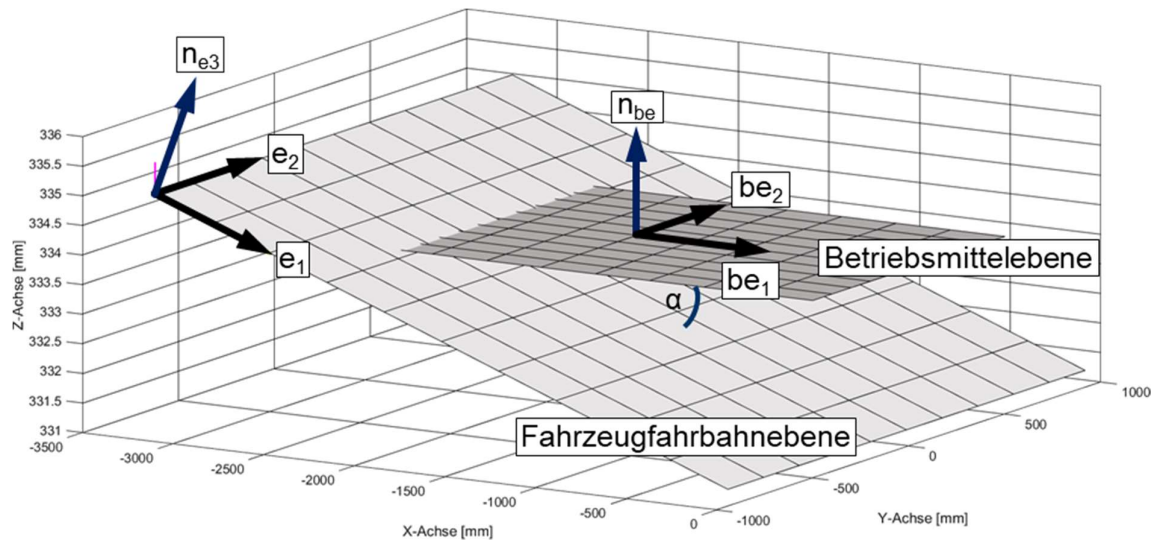


Abbildung 88 Ebenenschnitt für die Koordinatenberechnung [vgl. Bos18]

Der Schnittwinkel zwischen der Fahrzeugfahrbahnebene und der Betriebsmittelebene wird durch die nachfolgende Formel berechnet.

$$\alpha_{Schnitt} = \arccos\left(\frac{n_{e3} * n_{be}}{|n_{e3}| * |n_{be}|}\right) \quad \text{Gl. 4.8}$$

$\alpha_{Schnitt}$: Schnittwinkel zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und Betriebsmittelebene

n_{e3} : Normalenvektor der Fahrzeugfahrbahnebene

n_{be} : Normalenvektor der Betriebsmittelebene

Mit dem Schnittwinkel α werden die Koordinaten der einzelnen Messpunkte bestimmt. Abbildung 89 stellt die Berechnung der Koordinaten der Messpunkte grafisch dar.

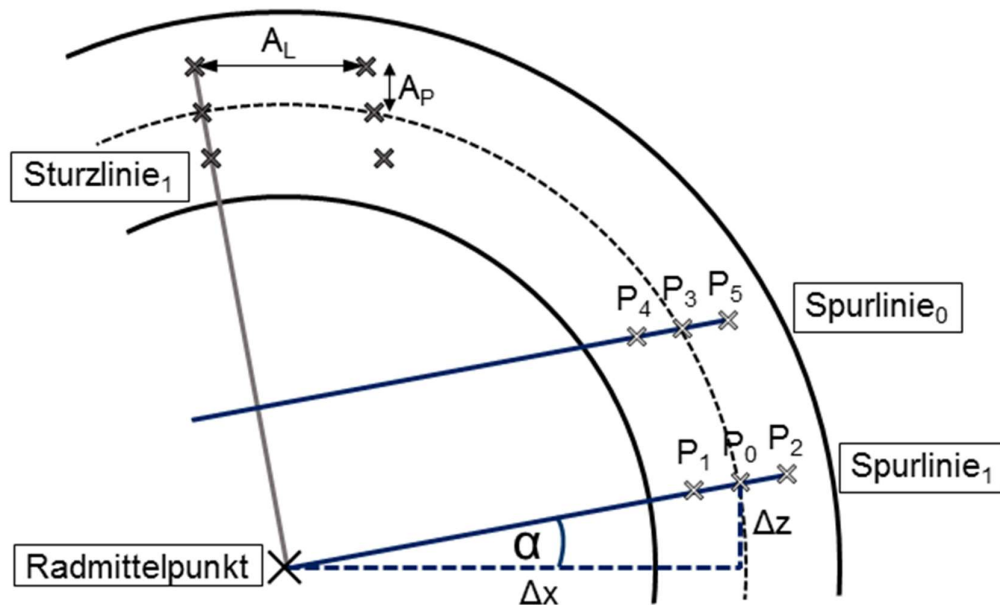


Abbildung 89 Koordinatenberechnung der Messpunkte am Zentrierabsatz [vgl. Bos18]

Die Messpunkte P₀ bis P₅ werden für die Spurwinkelmessung verwendet. Die Messpunkte P₀ bis P₂, welche dem Punkt RF₂ auf der Geraden g entsprechen, bilden mit den Messpunkten auf der gegenüberliegenden Seite des Zentrierabsatzes, entsprechend dem Punkt RF₁, den Spurwinkel der Spurlinie₁. Die X und Z Koordinaten der Messpunkte im Betriebsmittelkoordinatensystem, ausgehend vom Radmittelpunkt, werden über den mittleren Radius des Zentrierabsatzes mit den nachfolgenden Gleichungen berechnet.

$$\Delta x_{Spur1} = \cos(\alpha_{Schnitt}) * r_M \quad \text{Gl. 4.9}$$

Δx_{Spur1} : Abstand des Messpunktes in X-Richtung

$\alpha_{Schnitt}$: Schnittwinkel zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und Betriebsmittelebene

r_M : mittlerer Radius des Zentrierabsatzes

$$\Delta z_{Spur1} = \sin(\alpha_{Schnitt}) * r_M \quad \text{Gl. 4.10}$$

Δz_{Spur1} : Abstand des Messpunktes in Z-Richtung

$\alpha_{Schnitt}$: Schnittwinkel zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und Betriebsmittelebene

r_M : mittlerer Radius des Zentrierabsatzes

Es ist eine Fallunterscheidung für die Z-Koordinate notwendig, da sich der Radmittelpunkt an der Hinterachse ober- bzw. unterhalb des Radmittelpunktes an der Vorderachse befinden kann. Für die Koordinaten des Messpunktes P_0 ergeben sich folgende Gleichungen.

$$P_0(x) = RM(x) + \Delta x_{Spur1} \quad \text{Gl. 4.11}$$

$P_0(x)$: X-Koordinate des Messpunktes P_0
 $RM(x)$: X-Koordinate des Radmittelpunktes
 Δx_{Spur1} : Abstand des Messpunktes P_0 in X-Richtung

$$a) P_0(z) = RM(z) - \Delta z_{Spur1} \quad \text{wenn } HR(z) > VR(z) \quad \text{Gl. 4.12}$$

$$b) P_0(z) = RM(z) + \Delta z_{Spur1} \quad \text{wenn } HR(z) < VR(z) \quad \text{Gl. 4.13}$$

$P_0(z)$: Z-Koordinate des Messpunktes P_0
 $RM(z)$: Z-Koordinate des Radmittelpunktes
 Δz_{Spur1} : Abstand des Messpunktes P_0 in Z-Richtung
 $HR(z)$: Z-Koordinate des Radmittelpunktes hinten rechts
 $VR(z)$: Z-Koordinate des Radmittelpunktes vorne rechts

Im weiteren Verlauf wird die Annahme getroffen, dass der Radmittelpunkt an der Vorderachse tiefer liegt als der Radmittelpunkt an der Hinterachse, sodass keine Fallunterscheidung für den Messpunkt P_1 sowie für die Spurlinie₀ durchgeführt wird. Die Koordinatenbestimmung von P_0 erlaubt es, die Koordinaten der weiteren Messpunkte P_1 und P_2 der Spurlinie₁ über eine zusätzliche Variable A_P zu berechnen. Der Wert der Variable kann frei gewählt werden. Als Maximalwert kann die Breite der Messzone des Zentrierabsatzes definiert werden. Wird der Wert 0 gewählt, so sind die Messpunkte in ihrer X-Koordinate identisch.

$$P_1(x) = P_0(x) - A_p \quad \text{Gl. 4.14}$$

$P_1(x)$: X-Koordinate des Messpunktes P_1

$P_0(x)$: X-Koordinate des Messpunktes P_0

A_p : Punktabstand der Messpunkte

$$P_1(z) = RM(z) + \tan\alpha_{\text{Schnitt}} * (\Delta x_{\text{Spur1}} - A_p) \quad \text{Gl. 4.15}$$

$P_1(z)$: Z-Koordinate des Messpunktes P_1

$RM(z)$: Z-Koordinate des Radmittelpunktes

α_{Schnitt} : Schnittwinkel zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und Betriebsmittelebene

Δx_{Spur1} : Abstand des Messpunktes P_0 in X-Richtung

A_p : Punktabstand der Messpunkte

Die Berechnung der Koordinaten für den Messpunkt P_2 erfolgt nach demselben Prinzip wie die Berechnung der Koordinaten des Messpunktes P_1 . Die Koordinaten der Messpunkte auf der Spurlinie₀ werden durch eine weitere Variable A_L ergänzt und über eine Geometriebetrachtung nach dem Satz des Pythagoras berechnet. [Sch95] Die Variable A_L beschreibt den Linienabstand der Messpunkte und kann als Maximalwert den Außenradius des Zentrierabsatzes annehmen. Eine erneute Fallunterscheidung bezüglich der Z-Koordinaten der Radmittelpunkte wird nicht durchgeführt, da weiterhin die Annahme besteht, dass der Radmittelpunkt der Vorderachse tiefer liegt als der Radmittelpunkt der Hinterachse.

$$\Delta x_{\text{Spur0}} = \sqrt{r_M^2 - (A_L + \Delta z_{\text{Spur1}})^2} \quad \text{Gl. 4.16}$$

Δx_{Spur0} : Abstand des Messpunktes P_3 in X-Richtung

r_M : mittlerer Radius des Zentrierabsatzes

A_L : Linienabstand der Messpunkte

Δz_{Spur1} : Abstand des Messpunktes P_0 in Z-Richtung

Die Koordinaten des Messpunktes P_3 auf der Spurlinie₀ werden im Anschluss mit den nachfolgenden Formeln berechnet.

$$P_3(x) = RM(x) + \Delta x_{Spur0} \quad \text{Gl. 4.17}$$

- $P_3(x)$: X-Koordinate des Messpunktes P_3
 $RM(x)$: X-Koordinate des Radmittelpunktes
 Δx_{Spur0} : Abstand des Messpunktes P_3 in X-Richtung

$$P_3(z) = P_0(z) + A_L \quad \text{Gl. 4.18}$$

- $P_3(z)$: Z-Koordinate des Messpunktes P_3
 $P_0(z)$: Z-Koordinate des Messpunktes P_0
 A_L : Linienabstand der Messpunkte

Die Koordinatenberechnung der Messpunkte P_4 und P_5 sowie aller Messpunkte auf der Spurlinie₂ werden in entsprechend angepasster Vorgehensweise durchgeführt. Die Messpunkte der drei Sturzlinien werden über eine Drehung um 90° bezüglich der Spurlinien ermittelt. Nachdem die Messwerte an den Koordinaten der Messpunkte durch das Betriebsmittel erfasst wurden, können die Fahrwerkgeometriewinkel berechnet werden. Der Spurwinkel ergibt sich aus dem Winkel, der sich zwischen der Geraden g , welche RF_1 und RF_2 enthält, und e_1 einstellt. Durch Wahl des Koordinatensystems e_1, e_2, e_3 und da e_1 und g in $\text{span}(e_1, e_2)$ liegen, kann der Spurwinkel gemäß Gl. 4.1 berechnet werden. Ob Vorspur oder Nachspur vorliegt, wird mit den nachfolgenden Formeln bestimmt.

$$\text{Vorspur: } -\text{sgn}\langle g|e_2 \rangle < 0 \quad \text{Gl. 4.19}$$

$$\text{Nachspur: } -\text{sgn}\langle g|e_2 \rangle > 0 \quad \text{Gl. 4.20}$$

- g : Schnittgerade zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und der Raddrehebene
 e_2 : orthogonaler Hinterachsvektor

Zusammengefasst ergibt sich für den Einzelspurwinkel die nachfolgende mathematische Formel.

$$\varphi = -\text{sgn}\langle g|e_2 \rangle * \arccos(\langle g|e_1 \rangle) \quad \text{Gl. 4.21}$$

- φ : Spurwinkel
- g : Schnittgerade zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und der Raddrehebene
- e_2 : orthogonaler Hinterachsvektor
- e_1 : Verbindungsvektor der Achsmittelpunkte der Vorder- und Hinterachse

Die Formeln gelten ebenfalls für den Sturzwinkel mit den entsprechenden Schnittgeraden und dem Richtungsvektor e_3 . Das Modell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung trifft die Annahme, dass die vier Radmittelpunkte in einer Ebene liegen. Bei der Bestimmung der Radmittelpunkte durch die Messung am realen Fahrzeug kommt es zu Messfehlern, sodass die Radmittelpunkte nicht in einer Ebene liegen. Dies führt dazu, dass der Schnitt zwischen dem Vektor e_1 und der Geraden g keinen Spurwinkel liefert, da beide windschief zueinander liegen. Um einen Spurwinkel zu berechnen, wird anstatt des Schnitts zwischen zwei Geraden der Schnitt zwischen zwei Ebenen herangezogen. Die hierzu notwendigen Rechenoperationen beziehen sich auf [Bos18]. Hierzu werden zwei Ebenen E_{HM} und E_{HR} gebildet. Die Ebene E_{HM} wird im Achsmittelpunkt HM mit den Richtungsvektoren e_1 und e_3 aufgespannt. Die Ebene E_{HR} setzt sich aus dem Aufpunkt HR , dem Richtungsvektoren e_3 und der Gerade $g(RF_1, RF_2)$ zusammen. Abbildung 90 zeigt die zuvor definierten Ebenen in überzeichneter Form.

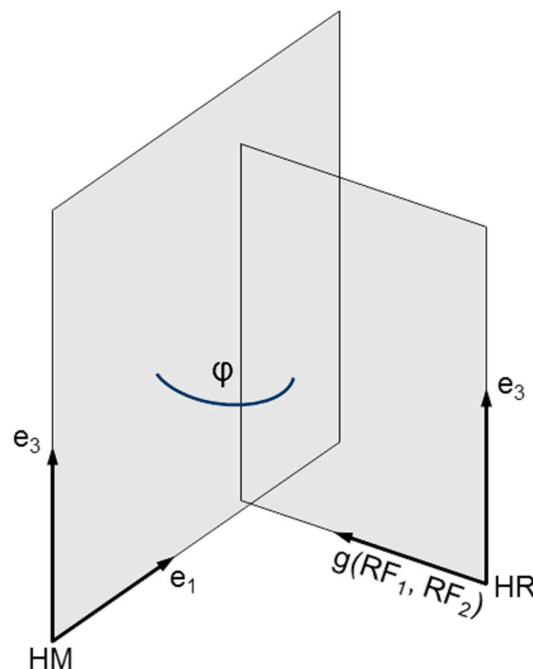


Abbildung 90 Ebenen für die Berechnung des Spurwinkels [vgl. Bos18]

Die Berechnung des Spurwinkels erfolgt über die Normalenvektoren der Ebenen.

$$n_{HM} = e_3 \times e_1 \quad \text{Gl. 4.22}$$

- n_{HM} : Normalenvektor der Fahrwerksymmetrieebene
 e_3 : dritter senkrechter Vektor der Orthonormalbasis
 e_1 : Verbindungsvektor der Achsmittelpunkte der Vorder- und Hinterachse

$$n_{HR} = e_3 \times g \quad \text{Gl. 4.23}$$

- n_{HR} : Normalenvektor der Spurebene hinten rechts
 e_3 : dritter senkrechter Vektor der Orthonormalbasis
 g : Schnittgerade zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und der Raddrehebene

Dabei ist der Spurwinkel der Schnittwinkel der beiden Normalenvektoren.

$$\varphi = \arccos \left(\frac{n_{HM} \cdot n_{HR}}{|n_{HM}| \cdot |n_{HR}|} \right) \quad \text{Gl. 4.24}$$

- φ : Spurwinkel
 n_{HM} : Normalenvektor der Fahrwerksymmetrieebene
 n_{HR} : Normalenvektor der Spurebene hinten rechts

Analog hierzu erfolgt die Berechnung des Sturzwinkels. Dabei ist der Sturzwinkel γ der Schnittwinkel der Ebenen E_{HM} und E_{HR} . Die Ebene E_{HM} ist identisch mit der Ebene für die Berechnung des Spurwinkels. Die Ebene E_{HR} wird im Falle der Sturzwinkelberechnung über die Richtungsvektoren e_1 und $h(RF_3, RF_4)$ gebildet, wobei $h(RF_3, RF_4)$ die Verbindungsstrecke der Messpunkte für den Sturzwinkel enthält. Abbildung 91 zeigt die Darstellung der Sturzwinkelberechnung.

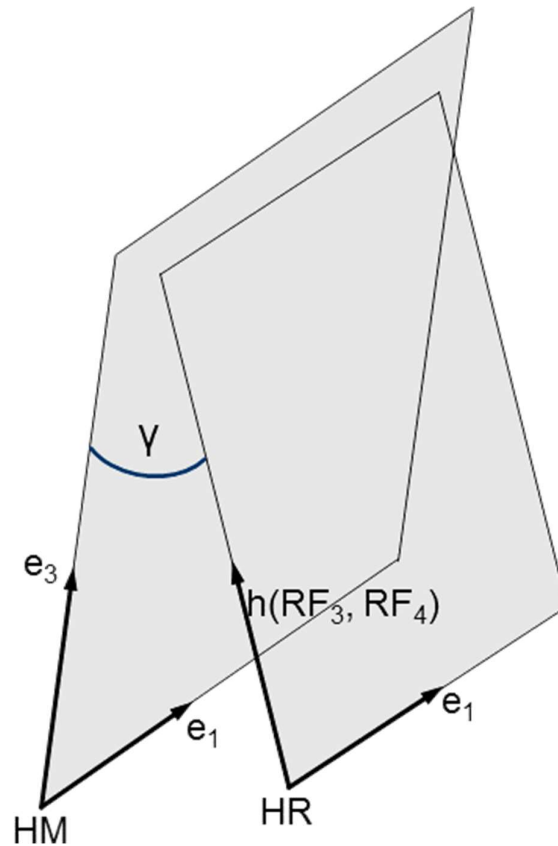


Abbildung 91 Ebenen für die Berechnung des Sturzwinkels [vgl. Bos18]

Für den Sturzwinkel ergeben sich somit die nachfolgenden Gleichungen.

$$n_{HR} = e_3 \times h \quad \text{Gl. 4.25}$$

n_{HR} : Normalenvektor der Sturzebene hinten rechts

e_3 : dritter senkrechter Vektor der Orthonormalbasis

h : Schnittgerade zwischen der Fahrzeugfahrbahn- und der Raddrehebene

$$\gamma = \arccos\left(\frac{n_{HM} \cdot n_{HR}}{|n_{HM}| \cdot |n_{HR}|}\right) \quad \text{Gl. 4.26}$$

γ : Sturzwinkel

n_{HM} : Normalenvektor der Fahrwerksymmetrieebene

n_{HR} : Normalenvektor der Sturzebene hinten rechts

4.4 Messobjektdetektion und Automatisierung des Messverfahrens

Die Messobjektdetektion und Automatisierung des Messverfahrens gliedert sich in drei Teilaufgaben. Diese sind in Abbildung 92 als Messobjektdetektion, Radmittelpunktbestimmung und Spur- bzw. Sturzwinkelmessung mit den Bewegungen des Laserpunktes dargestellt.



Abbildung 92 Messaufgaben bei der Inline Fahrwerkgeometrievermessung

Zunächst muss das Messobjekt, der Zentrierabsatz des Radflansches, detektiert werden. Anhand der Abmessungen des Zentrierabsatzes wird unterschieden, ob der Lasertriangulationssensor einen Messwert liefert oder nicht. Die Abmessungen des Zentrierabsatzes sowie die Messzone sind in Abbildung 93 dargestellt.

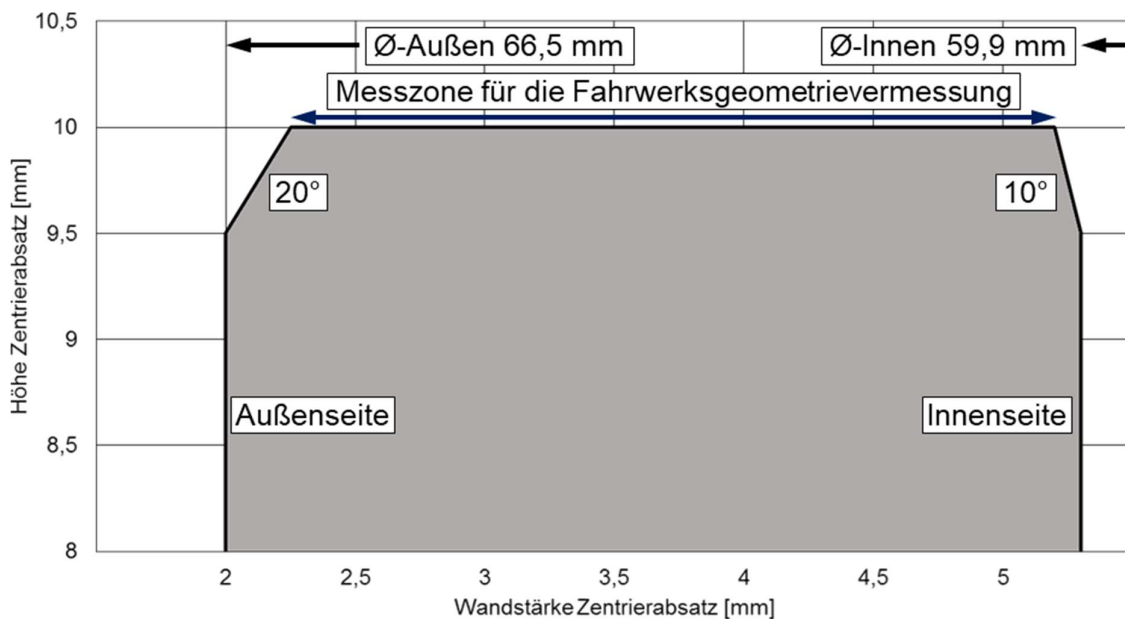


Abbildung 93 Abmessungen und Messzone des Zentrierabsatzes [vgl. Bos18]

Bei der Messung der Fahrwerkgeometrie auf dem Zentrierabsatz des Radflansches bewirken die Phasen auf der Flanschen- bzw. Flanschaußenseite einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Die aufgenommenen Messwerte dürfen sich nur innerhalb der Messzone befinden. Der Lasertriangulationssensor wird zunächst horizontal verfahren. Die erste steigende Messflanke markiert die Außenwand des Zentrierabsatzes. Sobald der Lasertriangulationssensor Werte einer Messflanke liefert, werden die Koordinaten der Betriebsmittelposition abgegriffen. Liefert der Lasertriangulationssensor nach einer steigenden Flanke weitere Messwerte befindet sich der Laserpunkt auf der Messzone des Zentrierabsatzes des Radflansches. Eine fallende Messflanke wird detektiert, indem die Messwerte außerhalb des Messbereichs des Lasertriangulationssensors liegen. Die Innenseite des Zentrierabsatzes wird durch eine fallende Flanke nach der ersten steigenden Flanke erkannt. Nachdem vier Messflanken in der horizontalen Bewegung erkannt wurden, bewegt sich das Betriebsmittel auf den Mittelpunkt der errechneten Kreissehne. Eine weitere vertikale Bewegung mit Detektion der Messflanken ist nötig, um die Position des Laserpunktes über oder unter dem Radmittelpunkt zu bestimmen. Anschließend wird ein vorläufiger Radmittelpunkt berechnet. Abbildung 94 zeigt die Konstruktion des vorläufigen Radmittelpunktes während der Messobjektdetektion.

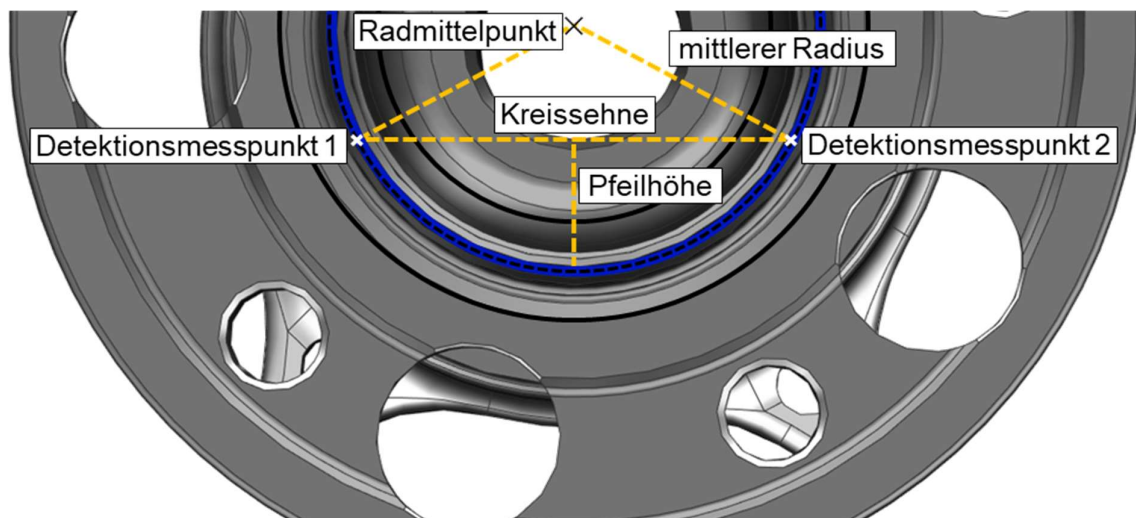


Abbildung 94 Konstruktion des vorläufigen Radmittelpunktes [vgl. Bos18]

Nachdem das Messobjekt detektiert wurde, wird der exakte Radmittelpunkt bestimmt. Hierzu wird in einem Sternmuster die Innenseite des Zentrierabsatzes angefahren und die Messflanken erneut detektiert. Die Startpunkte für die Sternfahrt werden über den vorläufigen Radmittelpunkt berechnet. Dieser Vorgang wird mit einer geringeren Geschwindigkeit als die Messobjektdetektion durchgeführt, um die Präzision der Koordinaten des Radmittelpunktes zu erhöhen. Abbildung 95 zeigt diesen Abschnitt der Fahrwerkgeometrievermessung im Detail.

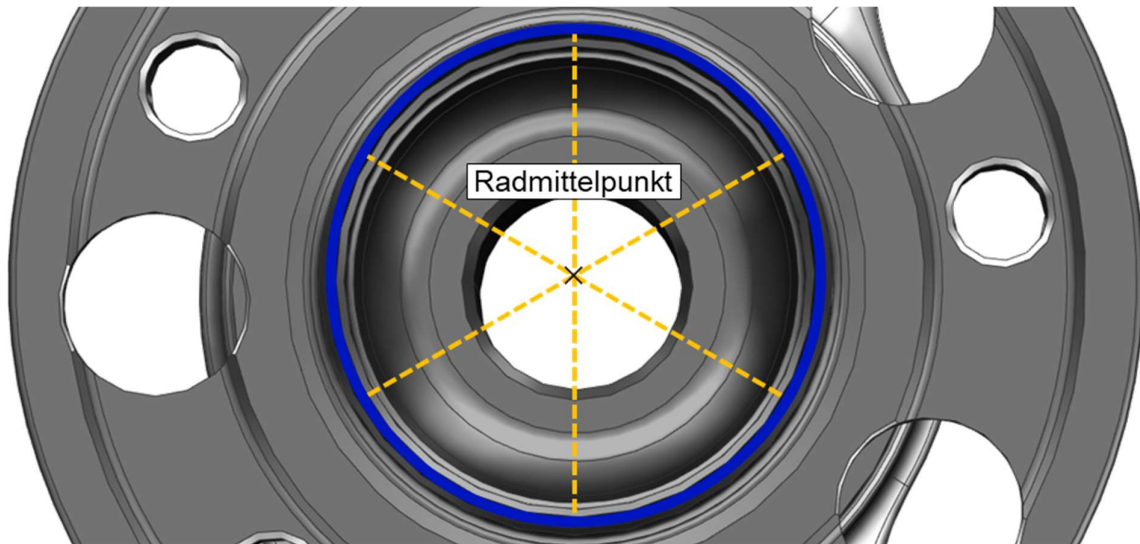


Abbildung 95 Messung und Konstruktion des exakten Radmittelpunktes [vgl. Bos18]

Für die exakte Berechnung des Radmittelpunktes kann die allgemeine Kreisgleichung nicht angewendet werden, da der Radflansch in der X-Z-Ebene des Betriebsmittels als Ellipse abgebildet wird. Für die Bestimmung des exakten Radmittelpunktes wird daher das Gauß-Helmert-Modell eingesetzt, welches eine Ausgleichsrechnung durchführt. [Ker18, Bos18] Im Anschluss werden auf Basis des Modells zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung der Schnittwinkel der Fahrzeugfahrbahnebene mit der Betriebsmittelebene sowie die Koordinaten der zu messenden Punkte für die Spur- und Sturzwinkelmessung bestimmt. Abbildung 96 zeigt das Ergebnis der Messpunktberechnung anhand der abzufahrenden Messlinien in überzeichneter Form.

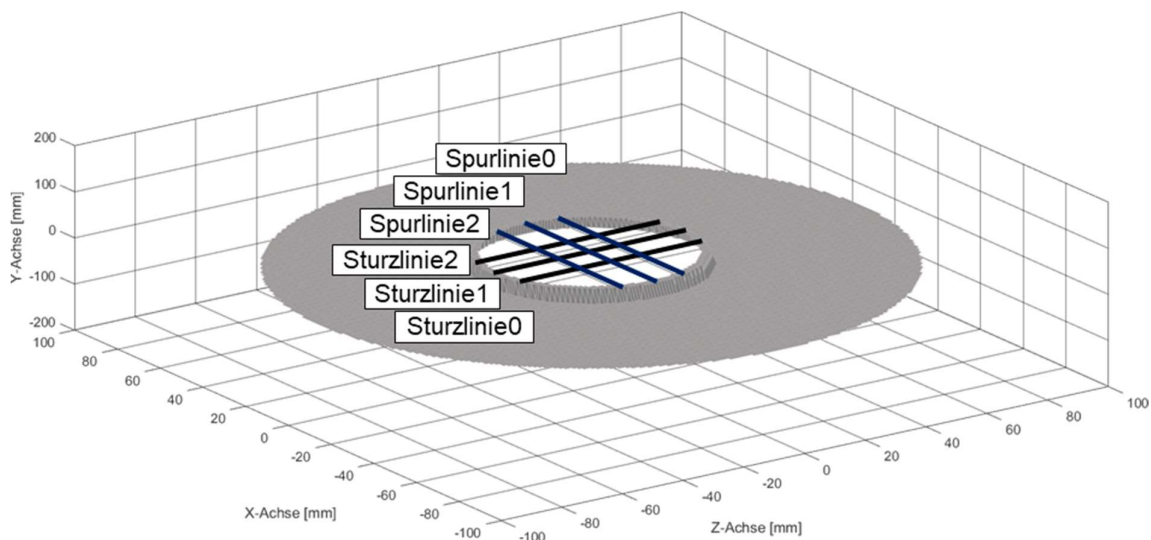


Abbildung 96 Messlinien auf dem Zentrierabsatz [vgl. Bos18]

Das Betriebsmittel fährt anschließend die berechneten Koordinaten ab und nimmt die Messwerte auf. Die Messlinien mit den Messpunkten für die Spurwinkelberechnung verlaufen parallel zur Fahrzeugfahrbahnebene. Die Messlinien für die Bestimmung des Sturzwinkels verlaufen senkrecht zu den Spurlinien. Für die Spur- und Sturzwinkelmessung werden je 18 Messpunkte, welche gleichmäßig auf den drei Messlinien mit je sechs Messpunkten verteilt sind, aufgenommen. Die ersten beiden Messwerte des Lasertriangulationssensors werden verworfen, um die Stabilität der Messung zu erhöhen. Aus den übrigen Messwerten wird ein Mittelwert je Messpunkt gebildet. Die drei Messpunkte auf einer Seite einer Spur- oder Sturzlinie werden wieder gemittelt, um den Einfluss der Formtoleranzen durch das Feindreihen zu minimieren. Die aufgenommenen und gemittelten Messwerte werden im letzten Berechnungsteil des Modells verarbeitet und final als Spur- und Sturzwinkel ausgegeben. Der Spurwinkel ergibt sich aus dem Mittelwert der berechneten Spurwinkel je Spurlinie. Analog dazu findet die Mittelwertbildung für den Sturzwinkel statt.

5 Versuchsaufbau und Messplan

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Validierung der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung vorgestellt und in einem Messplan zusammengefasst. Zur Anwendungen kommen die in der Planungs- und Konzeptionsphase definierten produkt- und betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren. Für die zuvor ermittelten Einflussfaktoren und Faktorstufen werden geeignete Lösungen zur Umsetzung dargestellt.

5.1 Design of Experiments für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung

Das Design of Experiments (DOE) beschreibt eine detaillierte Versuchsplanung mit systematisch zugeordneten Einflussfaktoren, um Produkte und Prozesse zu untersuchen. Die gezielte Einstellung der Einflussfaktoren durch Faktorstufen ermöglicht eine gezielte Versuchsdurchführung unter Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren. Ist davon auszugehen, dass beim untersuchten Einflussfaktor Linearität herrscht, so werden nur zwei Faktorstufen angewendet. Herrscht keine Linearität werden mindestens drei Einstellungen für die Faktorstufen gewählt. Beim vollfaktoriellen Versuchsplan werden alle Faktoren variiert, sodass alle Kombinationsmöglichkeiten erfasst werden. Dies hat den Nachteil, dass viele Versuche aufgrund der Anzahl der Faktoren und deren Faktoreinstellungen durchgeführt werden müssen. [Her03] Der größte Vorteil von vollfaktoriellen Versuchsplänen liegt darin, dass das System vollumfänglich untersucht wird. Der Aufbau eines Design of Experiments erfolgt nach einem vordefinierten Schema. Im ersten Schritt werden das zu untersuchende Problem und die Zielsetzung mitsamt den Rahmenbedingungen definiert. Anschließend werden experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt. Die experimentellen Voruntersuchungen dienen der Ermittlung von Einflussfaktoren, Zielgrößen, Zusammenhängen, Effekten und Wechselwirkung. Der durchzuführende Versuchsplan wird durch die Festlegung der Zielgrößen, der Einflussfaktoren, der Faktorstufen und der Anzahl an Wiederholungen definiert. In diesem Schritt wird auch der Versuchsplan erstellt und die Datenerfassung vorbereitet. Die Versuche werden nach einem Plan mit einer festgelegten Anzahl an Wiederholungen durchgeführt. Dabei werden auftretende Rahmenbedingungen protokolliert und der Einfluss von Störgrößen minimiert. Kann der Einfluss von Störgrößen und Besonderheiten nicht minimiert werden müssen die auftretenden Störgrößen gemessen und festgehalten werden. Abschließend findet nach der Durchführung des Versuchsplans eine Auswertung und Verifizierung statt. [Sig16]

5.1.1 Vollfaktorieller Versuchsplan Produkt

Der vollfaktorielle Versuchsplan für die Produktuntersuchung wird anhand des zuvor vorgestellten Schemas aufgestellt. Der neue Ansatz zur berührungslosen Inline

Fahrwerkgeometrievermessung setzt voraus, dass die Fahrwerkgeometrie ohne Radumschlag und Radlast sowie im voll ausgefederten Zustand des Fahrzeugs erfolgen soll. Die Fahrwerkgeometrievermessung ohne Radumschlag ist zulässig, da ein anderes Messobjekt (Radflansch) mit geringen Planlauf toleranzen gewählt wird. Das Ziel des vollfaktoriellen Versuchsplanes ist es die Wirkungen der Einflussfaktoren einer Fahrzeugachse auf die Fahrwerkgeometrie zu ermitteln, um eine korrekte Vermessung der Fahrwerkgeometrie zu gewährleisten. Die Durchführung der Versuche findet an einer bereits voreingestellten Versuchsachse im Labor und an einer verbauten Hinterachse im Fahrzeug statt. Die experimentellen Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Faktoren Federkraft, Federweg, Radumschlag und die Messoberfläche einen Einfluss auf die Fahrwerkgeometrievermessung ausüben. Die Zielgröße des vollfaktoriellen Versuchsplans für das Produkt ist der gemessene Spurwinkel. Die Messaufgabe zur Ermittlung des Spurwinkels ist, aufgrund der betragsmäßig kleineren Winkel, anspruchsvoller als die Ermittlung des Sturzwinkels, sodass für diesen vollfaktoriellen Versuchsplan der Spurwinkel als einzige Zielgröße definiert wird. Die experimentellen Produktvoruntersuchungen haben außerdem gezeigt, dass Effekte und Wechselwirkungen zwischen der Federkraft, dem Federweg und den Fahrwerkgeometriewinkeln existieren. Die Faktorstufen der Einflussfaktoren werden wie folgt festgelegt. Es wird mit und ohne Federkraft gemessen. Die Fahrwerkgeometrie wird bei Federwegen von -110 mm, -80 mm, K0-Niveau und +80 mm gemessen. Der Radumschlag wird durch Drehung des Radflansches realisiert. Dabei werden die Radflanschpositionen 0°, 120° und 240° betrachtet. Der Einfluss der Messoberfläche wird durch die Faktorstufen rau und glatt beschrieben. Die Versuche werden insgesamt dreimal wiederholt. Der Versuchsplan wird mit dem Softwareprogramm MiniTab [Min18] erstellt, wobei die Datenerfassung über Listen erfolgt. Die Versuche werden in einem Labor sowie in einer Versuchswerkstatt mit einer Hebebühne durchgeführt. Die Auswertung und Verifizierung erfolgt an anderer Stelle. Tabelle 8 zeigt den durchzuführenden vollfaktoriellen Versuchsplan für die Produktuntersuchungen.

Tabelle 8 vollfaktorieller Versuchsplan für das Produkt

Reihenfolge	Federkraft	Federweg	Position Radflansch	Messfläche
1	ja	-110 mm	0°	glatt
2	ja	-110 mm	0°	rau
3	ja	-110 mm	120°	glatt
4	ja	-110 mm	120°	rau
5	ja	-110 mm	240°	glatt
6	ja	-110 mm	240°	rau
7	ja	-80 mm	0°	glatt
8	ja	-80 mm	0°	rau
9	ja	-80 mm	120°	glatt

10	ja	-80 mm	120°	rau
11	ja	-80 mm	240°	glatt
12	ja	-80 mm	240°	rau
13	ja	K0	0°	glatt
14	ja	K0	0°	rau
15	ja	K0	120°	glatt
16	ja	K0	120°	rau
17	ja	K0	240°	glatt
18	ja	K0	240°	rau
19	ja	+80 mm	0°	glatt
20	ja	+80 mm	0°	rau
21	ja	+80 mm	120°	glatt
22	ja	+80 mm	120°	rau
23	ja	+80 mm	240°	glatt
24	ja	+80 mm	240°	rau
25	nein	-110 mm	0°	glatt
26	nein	-110 mm	0°	rau
27	nein	-110 mm	120°	glatt
28	nein	-110 mm	120°	rau
29	nein	-110 mm	240°	glatt
30	nein	-110 mm	240°	rau
31	nein	-80 mm	0°	glatt
32	nein	-80 mm	0°	rau
33	nein	-80 mm	120°	glatt
34	nein	-80 mm	120°	rau
35	nein	-80 mm	240°	glatt
36	nein	-80 mm	240°	rau
37	nein	K0	0°	glatt
38	nein	K0	0°	rau
39	nein	K0	120°	glatt
40	nein	K0	120°	rau
41	nein	K0	240°	glatt
42	nein	K0	240°	rau
43	nein	+80 mm	0°	glatt
44	nein	+80 mm	0°	rau
45	nein	+80 mm	120°	glatt
46	nein	+80 mm	120°	rau
47	nein	+80 mm	240°	glatt
48	nein	+80 mm	240°	rau

5.1.2 Vollfaktorieller Versuchsplan Betriebsmittel

Der vollfaktorielle Versuchsplan für die Betriebsmitteluntersuchung wird ebenfalls anhand des zuvor vorgestellten Schemas festgelegt. Bei der Messung der Fahrwerkgeometrie durch das neuartige Betriebsmittel werden aufgrund der Form- und Lagetoleranzen sowie durch äußere Faktoren die Messwerte beeinflusst. Mit Fehlern behaftete Messwerte führen zu einer qualitativ schlechten Fahrwerkgeometrievermessung. Das Ziel des vollfaktoriellen Versuchsplanes ist es den Nachweis zu erbringen, dass das Betriebsmittel in allen Situationen die geforderten Toleranzen einhält. Die Durchführung der Versuche findet mit nur einem Betriebsmittel statt. Als Messobjekt dient ein experimenteller Aufbau in einem Labor. Die Technologierecherche und die Konstruktion des Betriebsmittels haben gezeigt, dass die Faktoren Messbereich, Betriebsmittelposition auf der X-Achse, Betriebsmittelposition auf der Z-Achse und Schwingungen die Messwerte beeinflussen. Die Zielgröße des vollfaktoriellen Versuchsplans für das Betriebsmittel ist der Messwert des Lasertriangulationssensors, da die Winkel der Fahrwerkgeometrie auf Basis der Messwerte berechnet werden. Die Technologierecherche hat außerdem gezeigt, dass Effekte und Wechselwirkungen aufgrund der Linearität des Lasertriangulationssensors existieren, die die Messgenauigkeit entlang des Messbereichs beeinflussen. Die Einstellung der Faktorstufen wird wie folgt festgelegt. Es wird der Anfang und das Ende des Messbereichs betrachtet, da die Linearität an den Randbereichen die größten Fehler verursacht. Das Betriebsmittel wird entlang der X-Achse am Anfang, in der Mitte und am Ende für die Versuchsdurchführung positioniert. Die Positionierung des Betriebsmittels auf der Z-Achse findet nur am Anfang und am Ende statt, da die Z-Achse des Betriebsmittels kürzer ist als die X-Achse. Die Messungen werden unter dem Einfluss von Schwingungen sowie im beruhigten Zustand durchgeführt. Die Versuche werden insgesamt dreimal wiederholt. Der Versuchsplan wird ebenfalls mit dem Softwareprogramm MiniTab [Min18] erstellt, wobei die Datenerfassung über Listen erfolgt. Die Versuche werden in einer Versuchswerkstatt durchgeführt. Die Auswertung und Verifizierung erfolgt an anderer Stelle. Tabelle 9 zeigt den durchzuführenden vollfaktoriellen Versuchsplan für die Betriebsmitteluntersuchungen.

Tabelle 9 vollfaktorieller Versuchsplan für das Betriebsmittel

Reihenfolge	Messbereich	Position X	Position Z	Schwingung
1	MBanfang	Xanfang	Zanfang	ja
2	MBanfang	Xanfang	Zanfang	nein
3	MBanfang	Xanfang	Zende	ja
4	MBanfang	Xanfang	Zende	nein
5	MBanfang	Xmitte	Zanfang	ja
6	MBanfang	Xmitte	Zanfang	nein

7	MBanfang	Xmitte	Zende	ja
8	MBanfang	Xmitte	Zende	nein
9	MBanfang	Xende	Zanfang	ja
10	MBanfang	Xende	Zanfang	nein
11	MBanfang	Xende	Zende	ja
12	MBanfang	Xende	Zende	nein
13	MBende	Xanfang	Zanfang	ja
14	MBende	Xanfang	Zanfang	nein
15	MBende	Xanfang	Zende	ja
16	MBende	Xanfang	Zende	nein
17	MBende	Xmitte	Zanfang	ja
18	MBende	Xmitte	Zanfang	nein
19	MBende	Xmitte	Zende	ja
20	MBende	Xmitte	Zende	nein
21	MBende	Xende	Zanfang	ja
22	MBende	Xende	Zanfang	nein
23	MBende	Xende	Zende	ja
24	MBende	Xende	Zende	nein

5.2 Umsetzung der produkt- und betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren

Für die Durchführung der Versuchspläne müssen die produkt- und betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren technisch umgesetzt werden. Die Durchführung beider Versuchspläne wird durch das Hilfsmesssystem Faro Laser Tracker unterstützt. Um die Faktorstufe der nicht vorhandenen Federkraft umzusetzen, findet die Versuchsdurchführung an einer ausgebauten Hinterachse auf einem Gestell statt. An der Hinterachse sind weder eine Stahl- noch eine Luftfederung montiert, sodass die Fahrwerkgeometrie ohne Federkraft vermessen werden kann. Über eine Gewindespindel wird der benötigte Federweg eingestellt. Abbildung 97 zeigt die Hinterachse einer Mercedes-Benz S-Klasse auf einem Gestell.

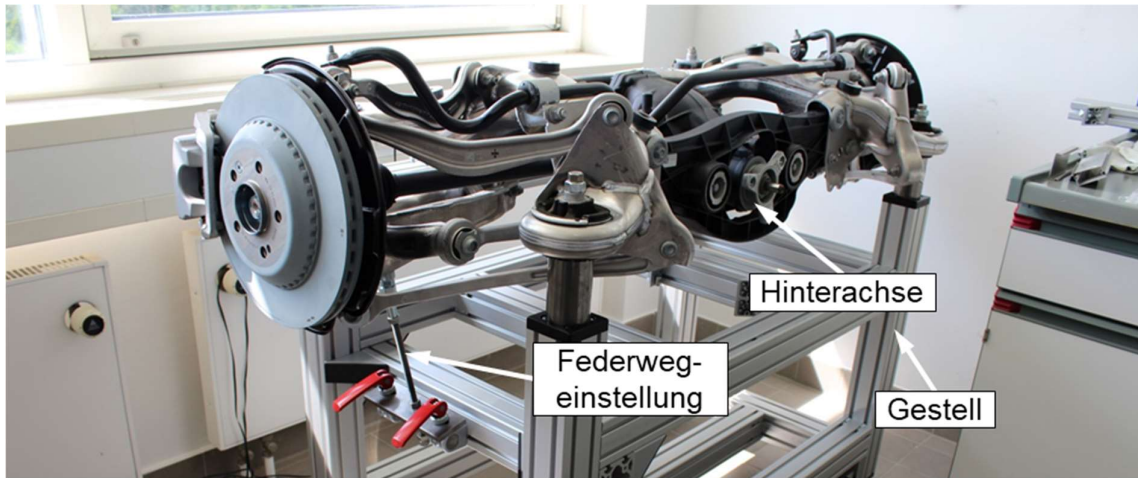


Abbildung 97 Versuchssachse auf einem Gestell

Die Versuchsdurchführung unter Federkraft wird so realisiert, indem an einer im Fahrzeug verbauten Hinterachse gemessen wird. Dadurch kann der Einfluss der Federkraft auf die Fahrwerkgeometrie bestimmt werden. Das Fahrzeug ist dabei an der Hinterachse auf schwimmend gelagerten Drehtellern platziert, um Verspannung im Fahrwerk zu vermeiden. Abbildung 98 zeigt das Fahrzeug mit dem Betriebsmittel zur berührungslosen Fahrwerkgeometrievermessung unter Federkraft.

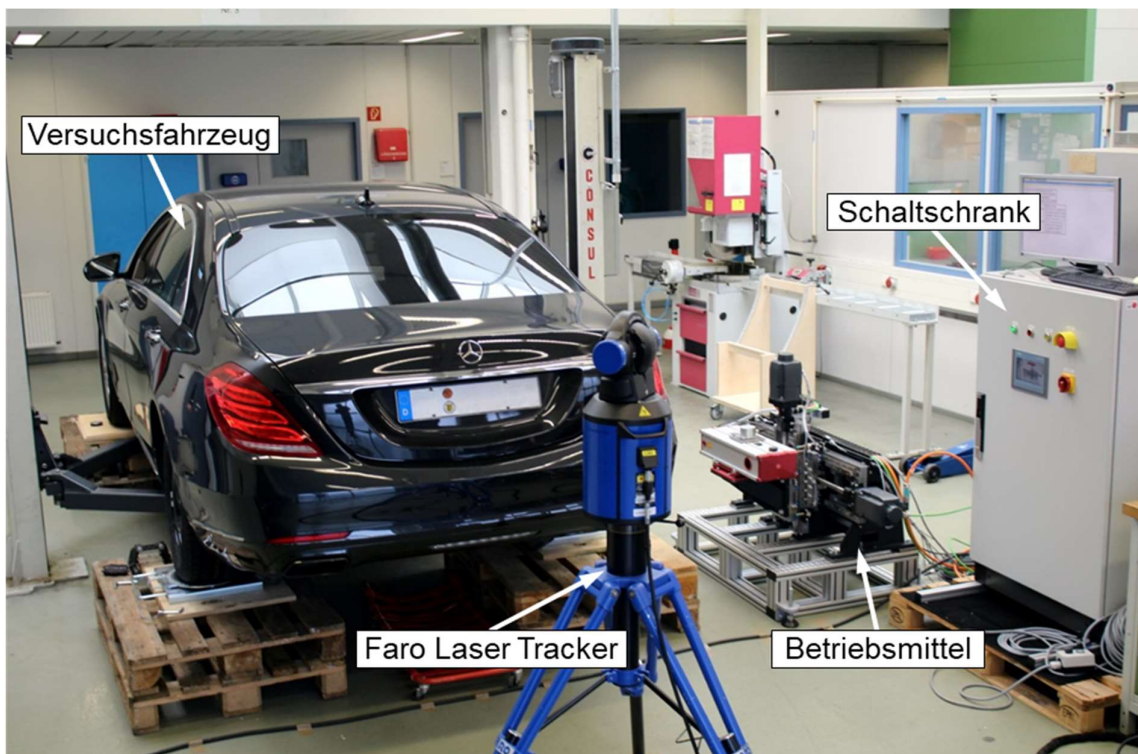


Abbildung 98 Fahrwerkvermessung mit Federkraft

Der Faktor Federweg mit den Faktorstufen -110 mm, -80 mm, K0 und +80 mm wird bei der Messung ohne Federkraft an der Versuchsachse auf dem Gestell im Labor durchgeführt. Hierzu ist an der Versuchsachse eine Gewindestange mit einem Kugelgelenk am Federlenker montiert. Die Gewindestange ist mit dem Gestell über eine gelagerte Auflageplatte verbunden. Die Drehung der Gewindestange bewirkt eine Auf- und Abwärtsbewegung des Federlenkers, wodurch der entsprechende Federweg eingestellt wird. Über die Gewindestange wird sowohl die Einfederung als auch die Ausfederung eingestellt. Zur korrekten Einstellung des Federwegs werden die entsprechenden Winkel der Antriebswelle berechnet. Mit einem Inklinometermessgerät kann der Winkel der Antriebswelle gemessen werden. [Rom18] Dies erlaubt eine Einstellung des Federwegs ohne die Anbindung der Hinterachse zur Karosserie. Abbildung 99 zeigt den Mechanismus zur Verstellung des Federwegs bei der Fahrwerkvermessung ohne Federkraft.

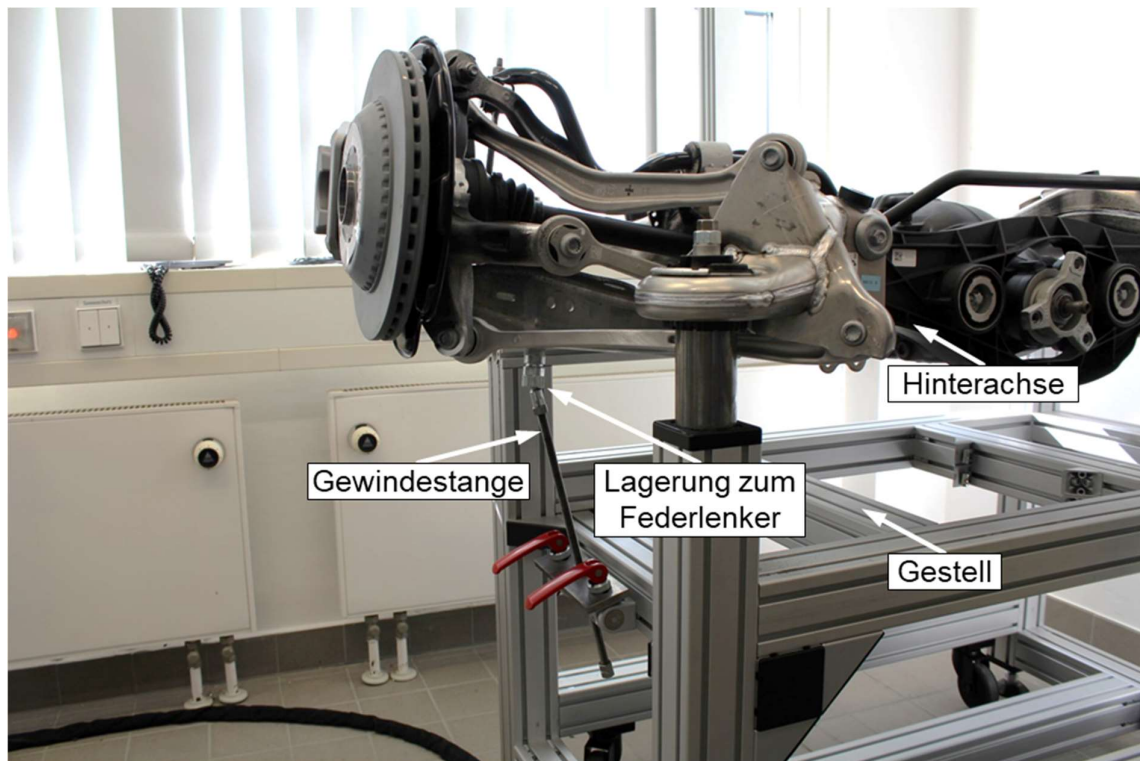


Abbildung 99 Eingestellte Einfederung der Versuchsachse

Die Einfederung bei der Fahrwerkvermessung unter Federkraft wird über die Diagnoseschnittstelle des Fahrzeugs durchgeführt. Dadurch ist es möglich die Einfederung von +80 mm zu erreichen. Zur Überprüfung der eingestellten Werte über die Diagnoseschnittstelle wird der Antriebswellenwinkel mit einem Inklinometermessgerät gemessen. Die Ausfederung unter Federkraft wird mit einer Hebebühne realisiert. Hierzu wird das Fahrzeug kontinuierlich angehoben bis sich der

entsprechende Antriebswellenwinkel einstellt. Der Motor ist abgeschaltet, um eine automatische Niveauregulierung zu vermeiden. Abbildung 100 zeigt die Umsetzung mit einer Hebebühne und dem Versuchsfahrzeug.



Abbildung 100 Hebebühne zur Einstellung der Ausfederung unter Federkraft

Der Radumschlag wird durch eine Rotation des Radflansches realisiert. Die Fahrwerkgeometrievermessung findet dadurch unter drei verschiedenen Rotationswinkeln bzw. an drei unterschiedlichen Positionen des Zentrierabsatzes des Radflansches statt. Die Umsetzung ist über eine Scheibe mit aufgedruckter Skala in Grad umgesetzt. Die Winkelscheibe ist auf der Bremsscheibe und auf der Felge fixiert.

Dadurch ist es möglich immer die gleichen Positionen des Radflansches zu erreichen. Durch Rotation der Bremscheibe oder der Felge werden die Positionen des Radflansches eingestellt. Zusätzlich ist ein Magnet vorbereitend für den Einflussfaktor der Messoberfläche auf der Antriebswelle angebracht. Abbildung 101 zeigt die Winkelscheibe exemplarisch auf einer Bremscheibe fixiert.

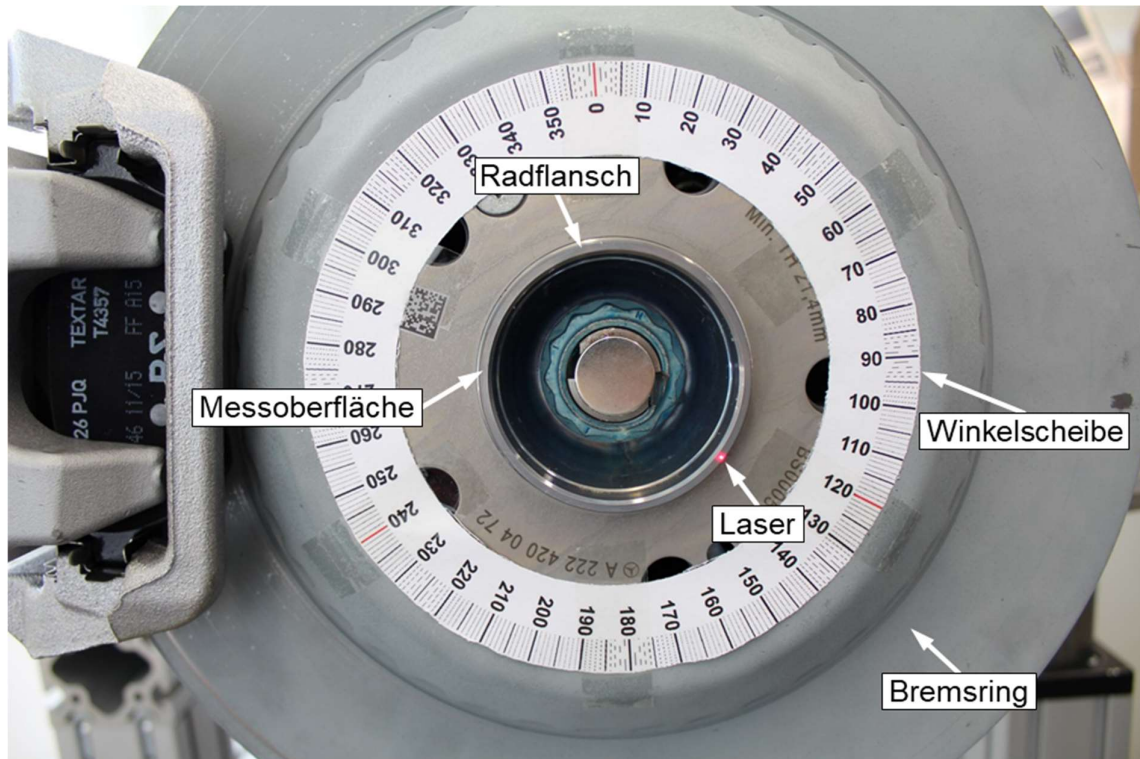


Abbildung 101 Winkelscheibe zur Positionsbestimmung des Messobjekts

Die Faktorstufe rau des Einflussfaktors Messoberfläche entspricht der feingedrehten Oberfläche des Zentrierabsatzes. Die Faktorstufe glatt wird durch eine magnetisch fixierte Metallscheibe umgesetzt. Die Metallscheibe ist geschliffen, um die Parallelität zwischen der Messseite und der Anlagenseite auf dem Zentrierabsatz zu erreichen. Auf der Messseite ist ein Kreisring angerissen, der den Innendurchmesser des Zentrierabsatzes widerspiegelt. Der Außendurchmesser der Metallscheibe entspricht dem Außendurchmesser des Zentrierabsatzes des Radflansches. Abbildung 102 zeigt die Metallscheibe für die Faktorstufe Messoberfläche.

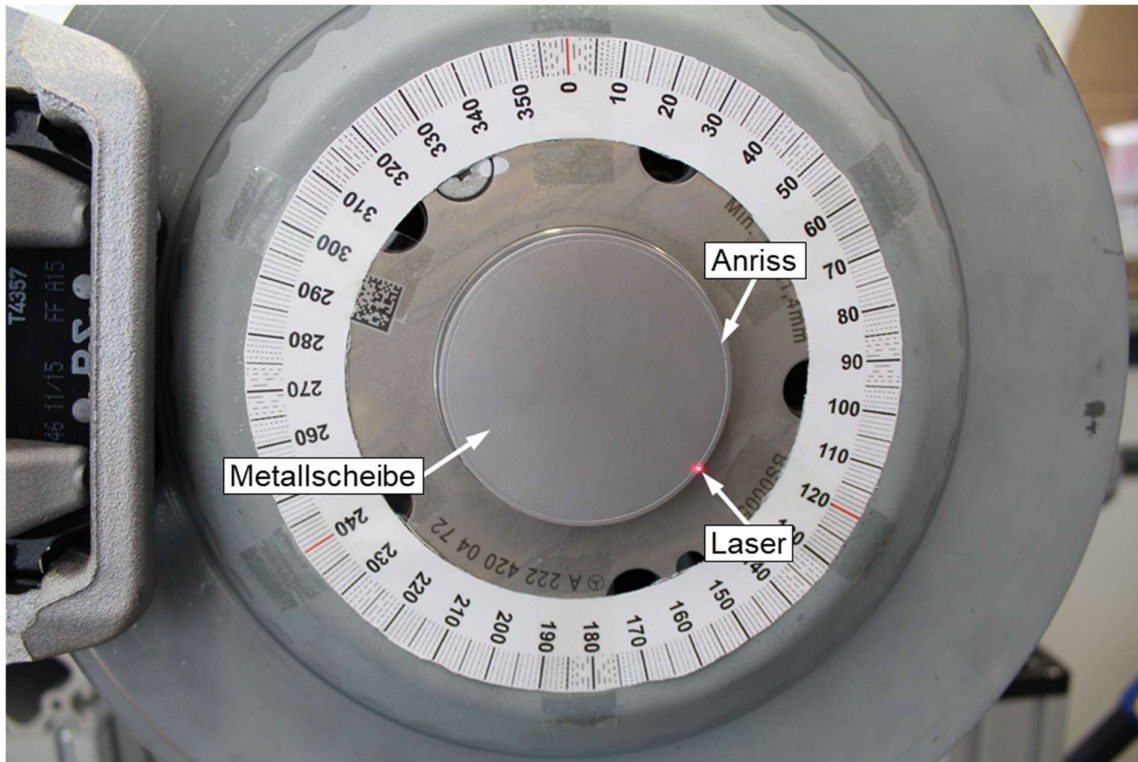


Abbildung 102 Metallscheibe zur Umsetzung der glatten Messoberfläche

Bei der betriebsmittelspezifischen Durchführung des Versuchsplans wird nicht auf einer Hinterachse gemessen, da als Ausgangsgröße der Lasermesswert definiert wurde. Der Lasertriangulationssensor misst auf sechs Metallplatten die entsprechend den Einflussfaktoren der X- und Z-Koordinaten auf einem Gestell angebracht sind. Die Metallplatten sind mit einer Dreipunktlagerung am Gestell montiert. Die Neigung des Gestells kann über eine Fußverstellung justiert werden. Über die Dreipunktlagerung können die Metallplatten für den Faktor Messbereich des Lasertriangulationssensors auf den Messbereichsanfang und das Messbereichsende eingestellt werden. Außerdem werden die sechs Metallplatten bezüglich ihrer Parallelität zueinander ausgerichtet. Hierbei kommt das Hilfsmesssystem Faro Laser Tracker zum Einsatz. Abbildung 103 zeigt den Versuchsaufbau für die Durchführung des vollfaktoriellen Versuchsplans des Betriebsmittels.

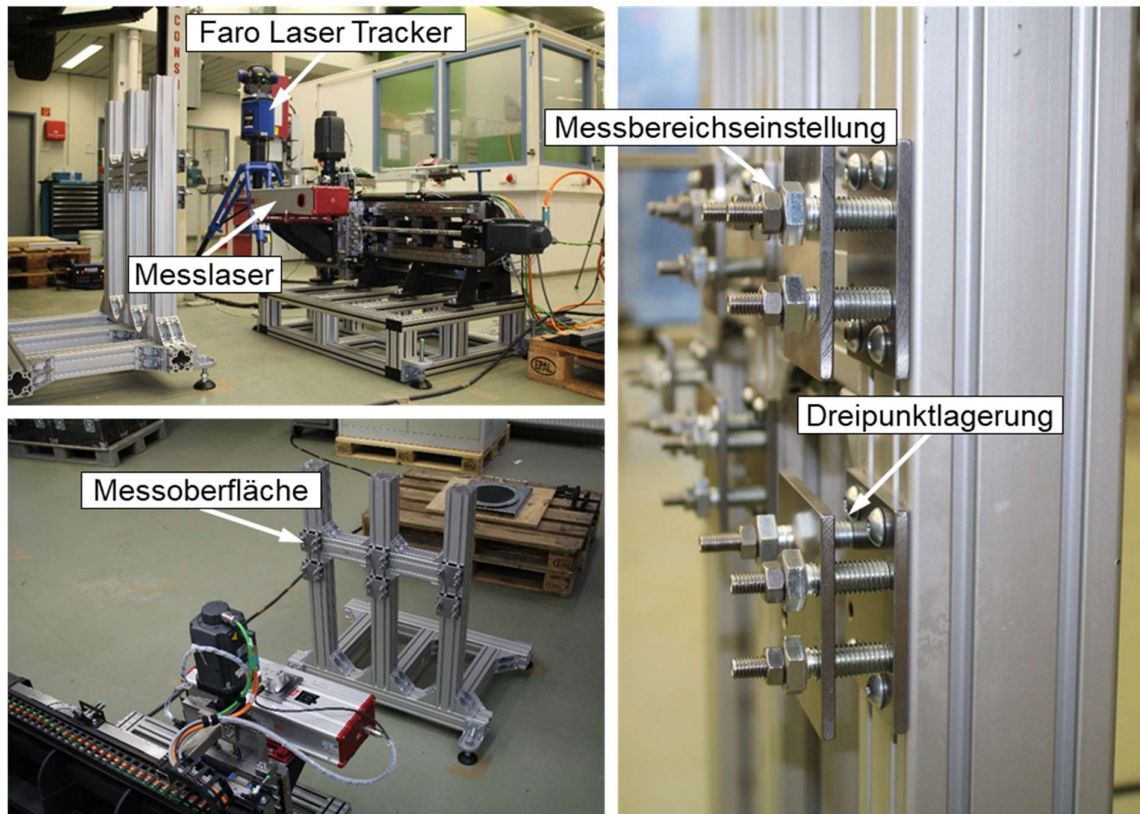


Abbildung 103 Versuchsaufbau für den Versuchsplan des Betriebsmittels

Die Positionen auf der X- und Z-Achse werden durch das Verfahren des Betriebsmittels realisiert. Die Koordinaten der Positionen werden direkt über die Automatisierungstechnik eingegeben, dadurch ist eine exakte und wiederholgenaue Positionierung jederzeit möglich. Der Einflussfaktor Schwingungen wird über einen am Unterbau des Betriebsmittels angeflanschten Elektromotor mit einer Unwucht umgesetzt.

6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und Validierung

Die zuvor vorgestellte Methodik zur Validierung und der Messplan werden in diesem Kapitel angewendet. Dabei werden die produktspezifischen Einflussfaktoren, gefolgt von den betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren, getrennt voneinander untersucht. Auf Basis der erzielten Ergebnisse erfolgt im Anschluss eine Validierung der gesamten Technologie unter realen Bedingungen in einem größeren Betriebsversuch im Werk.

6.1 Ergebnisse der Produktuntersuchungen

Der erste Teil der Produktuntersuchungen beschäftigt sich mit den Messergebnissen der Fahrwerkgeometrievermessung an einer Hinterachse ohne Federkraftbelastung. In diesem Teil der Messungen sind die Versuche mit dem Lasertriangulationssensor, welcher auf einem Messgestell montiert ist, ausgeführt, da zu diesem Zeitpunkt das Betriebsmittel noch nicht verfügbar war. Die Position des Lasertriangulationssensors sowie die Bestimmung der Radmittelpunkte erfolgen durch das Hilfsmesssystem. Bei den durchgeführten Versuchen ohne das Betriebsmittel treten erhöhte Messfehler bei der Spurwinkelmessung, aufgrund der unpräzisen Linearführungen und der Durchbiegung des Gestells sowie der Messtoleranz des Hilfsmesssystems, auf. Der Aufbau für die Versuchsdurchführung ist in Abbildung 104 dargestellt.

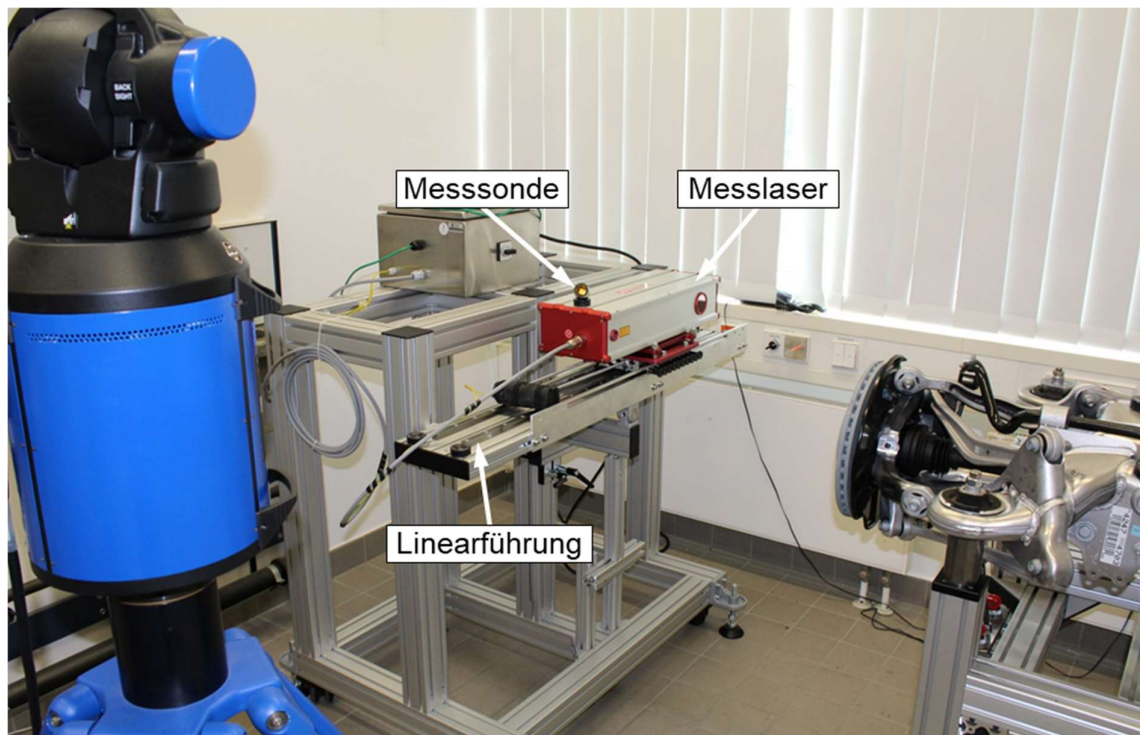


Abbildung 104 Versuchsdurchführung DOE ohne Federkraft

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse des Versuchsplans für die Fahrwerkgeometrievermessung ohne Federkraft aufgezeigt. Der aufgeführte Spurwinkel stellt den Mittelwert aus drei Versuchsläufen dar.

Tabelle 10 Ergebnisse für das DOE Produkt ohne Federkraft

Reihenfolge	Federkraft	Federweg	Pos. Radflansch	Messfläche	Spurwinkel
25	nein	-110 mm	0°	glatt	-0,081°
26	nein	-110 mm	0°	rau	-0,121°
27	nein	-110 mm	120°	glatt	-0,066°
28	nein	-110 mm	120°	rau	-0,091°
29	nein	-110 mm	240°	glatt	-0,085°
30	nein	-110 mm	240°	rau	-0,065°
31	nein	-80 mm	0°	glatt	0,057°
32	nein	-80 mm	0°	rau	0,028°
33	nein	-80 mm	120°	glatt	0,025°
34	nein	-80 mm	120°	rau	0,049°
35	nein	-80 mm	240°	glatt	0,053°
36	nein	-80 mm	240°	rau	0,041°
37	nein	K0	0°	glatt	0,247°
38	nein	K0	0°	rau	0,266°
39	nein	K0	120°	glatt	0,246°
40	nein	K0	120°	rau	0,255°
41	nein	K0	240°	glatt	0,274°
42	nein	K0	240°	rau	0,244°
43	nein	+80 mm	0°	glatt	0,421°
44	nein	+80 mm	0°	rau	0,435°
45	nein	+80 mm	120°	glatt	0,429°
46	nein	+80 mm	120°	rau	0,426°
47	nein	+80 mm	240°	glatt	0,434°
48	nein	+80 mm	240°	rau	0,418°

Die Ergebnisse zeigen deutlich das Änderungsverhalten des Spurwinkels über dem Fahrzeugniveau auf. Ausgehend von einer Fahrzeugausfederung, bei der der Spurwinkel Nachspur anzeigt, nimmt der Spurwinkel in Richtung Vorspur mit zunehmender Einfederung zu. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten der Prüfvorschrift des Fahrwerks. Der Einfluss der Position des Radflansches sowie der Einfluss der Messoberfläche führen zu einem maximalen Fehler von +/- 0,016° bei der Versuchsdurchführung mit 80 mm Ausfederung. Die übrigen Federwegkonfigurationen weisen einen geringeren Messfehler auf. Dabei wurde Versuchsnummer 26 nicht

weiter betrachtet. Versuchsnummer 26 ist mit einem größeren Fehler im Vergleich zu den umliegenden Versuchen mit gleicher Konfiguration des Federwegs behaftet, der nicht weiter nachvollzogen werden kann. Der maximal auftretende Messfehler liegt unterhalb dem Wert der Messgenauigkeitsanalyse von $\pm 0,018^\circ$ (Toleranz Radflansch und Toleranz Laser), trotz der Messungenauigkeit des Hilfsmesssystems und dem vergleichsweise unpräzisen Aufbau der Linearführungen sowie der Durchbiegung des Messgestells. Der Wert basiert auf der Summe der Messgenauigkeit des Lasertriangulationssensors sowie dem Planlauf des Zentrierabsatzes des Radflansches. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die Messoberfläche einen größeren Messfehler auf das Messergebnis ausübt als die Position des Radflansches bzw. der Radumschlag. Da der Planlauf des Zentrierabsatzes des Radflansches sowie die Form- und Lagertoleranzen der Messoberfläche konstant und unabhängig von der Einfederung sind, ist dieses Verhalten auf eine unpräzise Fertigung der Metallscheibe, trotz Spezifikation der Toleranzen, für die Faktorstufen der Messoberfläche zurückzuführen. Die Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse hat gezeigt, dass der Einfluss der Position des Radflansches auf das Messergebnis größer ist als der Einfluss der Messoberfläche. Die Versuchsdurchführung unter Federkraft wird ohne den Einfluss der Messoberfläche durchgeführt, um diese Annahme zu bestätigen.

Der zweite Teil der Produktuntersuchungen stellt die Messergebnisse der Fahrwerkgeometrievermessung an einer Hinterachse mit Federkraftbelastung vor. Für die Versuchsdurchführung wird das konstruierte Betriebsmittel eingesetzt, sodass die Messungenauigkeiten, die durch das Messgestell verursacht wurden, nicht mehr auftreten. Zur Messung der Radmittelpunkte sowie zur Ausrichtung des Betriebsmittels wurde wieder das Hilfsmesssystem Faro Laser Tracker eingesetzt. Die Versuchsdurchführung unter Federkraft ist in Abbildung 105 dargestellt.

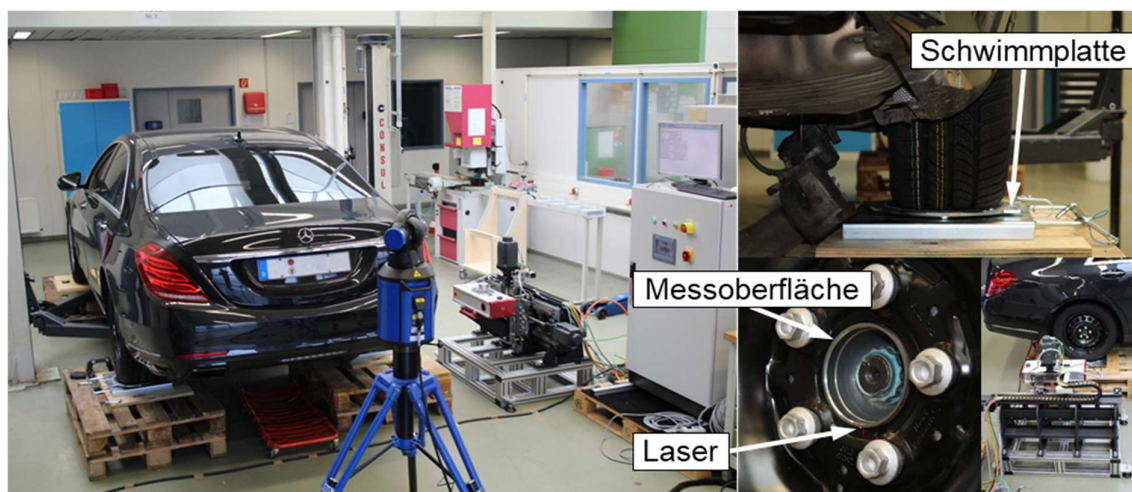


Abbildung 105 Versuchsdurchführung DOE mit Federkraft

Für die Versuche unter Federkraft ist das Fahrzeug mit Stahlfelgen ausgerüstet, da eine Messung mit Aluminiumfelgen, aufgrund der Einpresstiefe und der Felgenzentrierbohrung, nicht möglich ist. Die Felgenzentrierbohrung unterbricht den zurückreflektierten Laserstrahl, sodass keine Messwerte aufgenommen werden. Die Montage der im Vergleich zur Aluminiumfelge kleineren Stahlfelge erfordert die Demontage des Bremssattels. Alle Lagerelemente der Hinterachse im Versuchsfahrzeug wurden durch neue Ersatzteile vor den Versuchen ausgetauscht. Tabelle 11 stellt die Ergebnisse des Versuchsplans für die Fahrwerkgeometriemessung mit Federkraft dar. Der aufgeführte Spurwinkel stellt ebenfalls den Mittelwert aus drei Versuchsläufen dar.

Tabelle 11 Ergebnisse für das DOE Produkt mit Federkraft

Reihenfolge	Federkraft	Federweg	Pos. Radflansch	Spurwinkel
1	ja	-110 mm	0°	-0,216°
2	ja	-110 mm	120°	-0,206°
3	ja	-110 mm	240°	-0,246°
4	ja	-80 mm	0°	-0,176°
5	ja	-80 mm	120°	-0,205°
6	ja	-80 mm	240°	-0,219°
7	ja	K0	0°	-0,020°
8	ja	K0	120°	-0,023°
9	ja	K0	240°	-0,037°
10	ja	+80 mm	0°	0,258°
11	ja	+80 mm	120°	0,267°
12	ja	+80 mm	240°	0,244°

Die Ergebnisse zeigen ebenfalls das erwartete Änderungsverhalten des Spurwinkels über dem Fahrzeugniveau gemäß der Prüfvorschrift Fahrwerk auf. Mit zunehmender Fahrzeugeinfederung verändert sich der Spurwinkel kommend von einer Nachspur in eine Vorspur. Der Einfluss der Position des Radflansches führt zu einem maximalen Messfehler von +/- 0,021° bei der Konfiguration mit 80 mm Ausfederung ohne Betrachtung der Messgenauigkeit des Hilfsmesssystems sowie der Messoberfläche. Die übrigen Federwegkonfigurationen weisen einen geringeren Messfehler auf. Die Versuche unter dem Einfluss der Federkraft haben die Annahme bestätigt, dass der Einfluss des Planlaufs des Zentrierabsatzes größer ist als der Einfluss der Messoberfläche. Der maximal auftretende Messfehler bei der Versuchsdurchführung liegt unterhalb dem Wert der Messgenauigkeitsanalyse von +/- 0,022°, welcher auf der Summe der Messgenauigkeiten des Lasertriangulationsensors, dem Planlauf des Zentrierabsatzes und den Toleranzen des Betriebsmittels basiert. Der Einfluss der Elastokinematik wird über einen Vergleich der

Spurwinkelmessung mit und ohne Federkraft deutlich. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen mit und ohne Federkraft herstellen zu können, ist ein Abgleich der Grundvorspureinstellungen beider Achsen notwendig. Die Hinterachse im Laboraufbau für die Versuche ohne Federkraft ist im Achsmontagewerk mit einer Vorspureinstellung hinten rechts von $0,16^\circ$ ausgeliefert worden. Die im Versuchsfahrzeug verbaute Hinterachse ist auf einer Fahrwerkvermessungsanlage zu Auditzwecken mit $0,0^\circ$ Spurwinkel im Mittel hinten rechts vermessen worden. Hieraus ergibt sich ein Korrekturwert von $+0,16^\circ$, der auf die Messergebnisse der Versuche mit Federkraft addiert werden muss. Damit ist die Vergleichbarkeit zu den Spurwinkelwerten aus dem Achsmontagewerk hergestellt. Der Winkelfehler zwischen der Messung des Spurwinkels im Achsmontagewerk zur Hinterachssymmetrieachse und der Messung des Spurwinkels auf der Auditvermessungsanlage zur Fahrwerksymmetrieachse kann nachträglich nicht berücksichtigt werden. Tabelle 12 zeigt den Vergleich zwischen den Messwerten mit und ohne Federkraft. Die angegebenen Spurwinkel ergeben sich aus dem Mittelwert aller gemessenen Spurwinkel einer Federungskonfiguration. Die letzte Spalte enthält den Prädiktionswert mit den Toleranzen des elastokinematischen Einflusses auf den Spurwinkel bei einer gemessenen Radlast hinten rechts von 515 kg. Die Spuränderung durch die Radlast beträgt $-0,085^\circ$ mit einem Toleranzband von $\pm 0,016^\circ$. Dies führt zu einem Toleranzband von $-0,069^\circ$ bis $-0,101^\circ$.

Tabelle 12 Ergebnisse bei Einfluss der Elastokinematik auf das Fahrwerk

Parameter	mit Federkraft	ohne Federkraft	\Delta Spur	\Delta Prädiktion
Spurwinkel -110 mm	$-0,063^\circ$	$-0,085^\circ$	$0,022^\circ$	0°
Spurwinkel -80 mm	$-0,040^\circ$	$0,042^\circ$	$0,082^\circ$	$0,069^\circ-0,101^\circ$
Spurwinkel K0	$0,133^\circ$	$0,255^\circ$	$0,122^\circ$	$0,069^\circ-0,101^\circ$
Spurwinkel +80 mm	$0,416^\circ$	$0,427^\circ$	$0,011^\circ$	0°

Bei einer vollen Ausfederung des Fahrzeugs von -110 mm befinden sich die Räder in der Luft, sodass nur eine geringe Kraft der Luftfeder auf die Elastokinematik ausgeübt wird. Die Messergebnisse zeigen, dass in diesem Zustand eine Differenz von $0,022^\circ$ auftritt. Der Gewichtsprädiktionsalgorithmus ist für diesen Fall nicht konzipiert, da er nur die Spuränderung durch die statische Radlast bezogen auf eine Gegenkraft durch die Aufstandsfläche des Rades prognostiziert. Beim Ausfederungszustand -80 mm besteht ein Kontakt zwischen dem Fahrzeugrad und der Aufstandsfläche. In diesem Fall übt die entstehende Federkraft durch die Radlast bereits einen großen Einfluss auf den Spurwinkel aus. Es ergibt sich eine Differenz von $0,082^\circ$, die nur gering vom prognostizierten Wert mit $0,085^\circ$ abweicht. Im fahrfertigen Zustand ergibt sich eine Spurwinkeldifferenz von $0,122^\circ$. Der prognostizierte Wert am oberen Ende des Toleranzbereichs beträgt $0,101^\circ$. Die Abweichung liegt mit $0,021^\circ$ außerhalb des

Toleranzbereichs der Spurwinkeländerung durch die statische Radlast. Dies ist vermutlich auf den gebrauchten Zustand des Luftfedersystems des Versuchsfahrzeugs zurückzuführen. Die volle Einfederung des Fahrzeugs in der Niveaulage +80 mm ergibt eine Spurwinkeldifferenz von $0,011^\circ$. Dieser Fall spiegelt den gegenüberliegenden Grenzbereich der vollen Einfederung wieder. Eine korrekte Spuränderung durch den Gewichtsprädiktionsalgorithmus kann nicht berechnet werden, da die ausgeübte Kraft durch die Luftfederung auf die Elastokinematik sehr gering ist. Dies ist darin begründet, dass der Druck in der Luftfeder nahezu vollständig abgelassen werden muss, um diese Fahrzeugniveaulage zu erreichen. Somit stellt sich das benötigte Kräfteverhältnis für eine korrekte Prädiktion der Spuränderung nicht ein. Ist das korrekte Kräfteverhältnis durch eine befüllte Luftfeder und einer Radaufstandsfläche gegeben, liefert der Algorithmus zur Gewichtsprädiktion für die elastokinematische Spuränderung unter der statischen Radlast akzeptable Werte.

6.2 Ergebnisse der Betriebsmitteluntersuchungen

Die Betriebsmitteluntersuchung prüft die theoretischen Betrachtungen der Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse bezüglich des Betriebsmittels ab. Der Sollwert der Messungen für den Messbereichsanfang sowie für das Messbereichsende ergibt sich aus dem Mittelwert aller durchgeführten Messungen. Der Toleranzbereich ist über die Summe der Toleranzen der Betriebsmittelkonstruktion sowie der Messgenauigkeit des Lasertriangulationslasers bestimmt. Die Toleranz des Betriebsmittels ergibt sich durch die Parallelität der Linearführungen im montierten Zustand sowie der Form- und Lagetoleranzen der Bauteile und beträgt $\pm 0,015$ mm. Die tatsächliche Messungenauigkeit des Lasertriangulationssensors beträgt $\pm 0,006$ mm. Die Summe der beiden Toleranzen führt zu einem zulässigen Toleranzbereich von $\pm 0,021$ mm. Ungerade Zahlen der Reihenfolge entsprechen der Messwertaufnahme mit Schwingungen. Die geraden Zahlen der durchlaufenen Reihenfolge beschreiben die Messwertaufnahme im ruhigen Zustand ohne den Einfluss von Schwingungen und Vibrationen. Abbildung 106 zeigt die Ergebnisse der Versuchsdurchführung für den Messbereichsanfang.

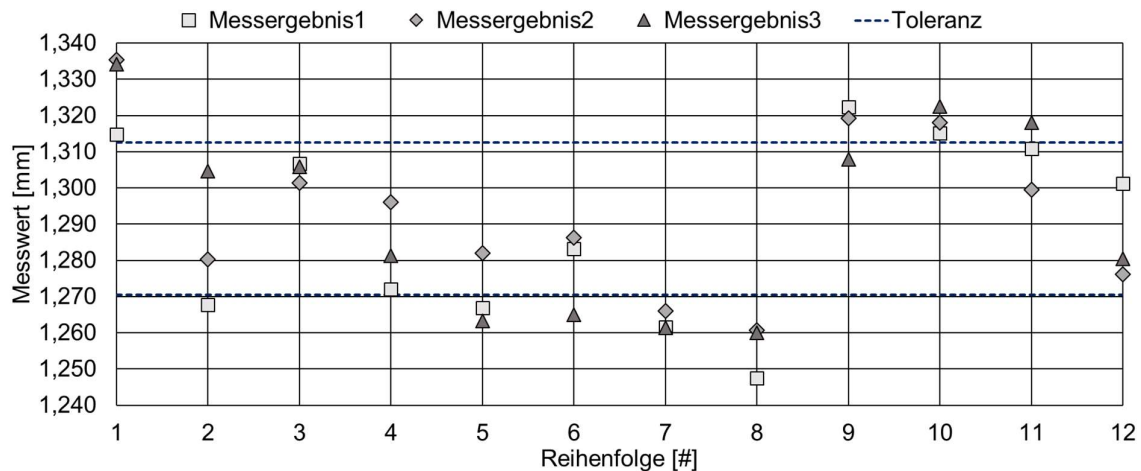


Abbildung 106 Ergebnisse des DOE Betriebsmittel für den Messbereichsanfang

Die Messwerte sind durchweg innerhalb bzw. knapp außerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs angesiedelt. Die Toleranzüberschreitungen sind zum einen auf die Ungenauigkeit der Ausrichtung der Messobjekte durch das Hilfsmesssystem Faro Laser Tracker sowie auf die fertigungstechnischen Form- und Lagetoleranzen der Messobjekte zurückzuführen. Ein weiterer Einfluss auf das Messergebnis wird durch die Gewichtsverlagerung des Betriebsmittels aufgrund der unterschiedlichen Betriebsmittelpositionen ausgeübt. Durch die Nachgiebigkeit des Untergrunds und der Fußverstellung entstehen in Abhängigkeit der Position des Betriebsmittels eine Neigung des Laserstrahls und damit eine kürzere bzw. längere gemessene Distanz. Schwingungen und Vibrationen scheinen sich auf die Messwerte nur im geringen Umfang auszuwirken. Abbildung 107 zeigt die Messergebnisse bei der Versuchsdurchführung für das Messbereichsende.

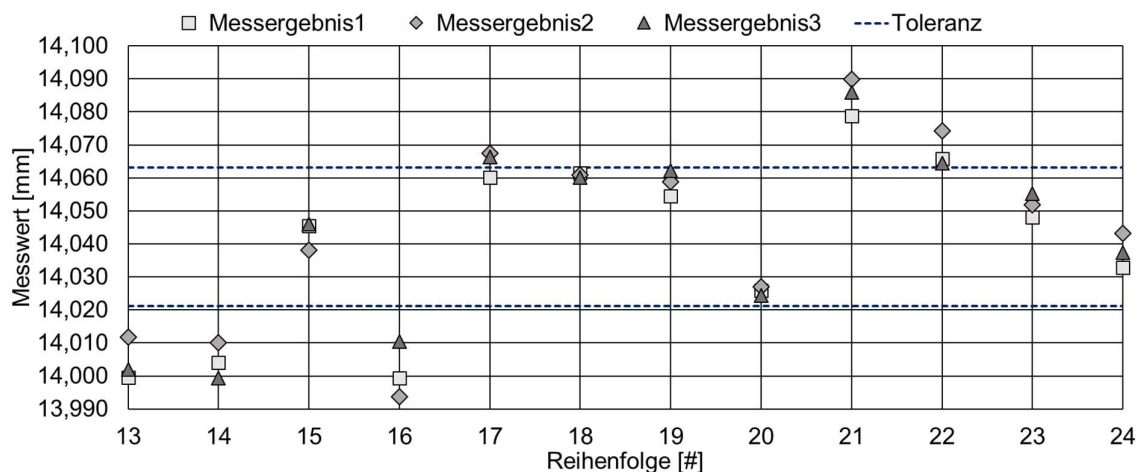


Abbildung 107 Ergebnisse des DOE Betriebsmittel für das Messbereichsende

Die Messwerte verteilen sich ebenfalls innerhalb bzw. knapp außerhalb des Toleranzbereichs. Dies ist auf dieselben Gründe zurückzuführen, wie bei der Versuchsdurchführung für den Messbereichsanfang, da der Standort sowie der Aufbau der Versuchsdurchführung identisch sind.

Die Messung der Spur- und Sturzwinkel bei beliebigen Fahrzeugschiefungen wird durch das Rechenmodell der fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung ermöglicht. Die Validierung dieses Verfahrens erfolgt, indem das Versuchsfahrzeug in zwei Schiefungen gebracht wird und eine Fahrwerkgeometrievermessung durchgeführt wird. Die Betriebsmittel sind parallel zum Horizont ausgerichtet. Der Aufbau für die Versuchsdurchführung ist in Abbildung 108 gezeigt.

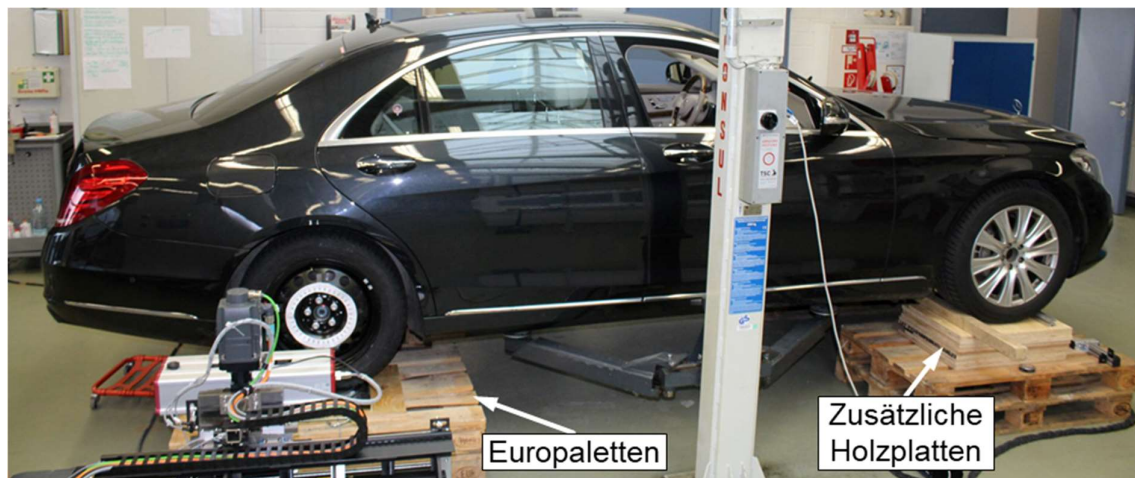


Abbildung 108 Versuchsdurchführung bei einer Fahrzeugschiefung

Nachdem das Fahrzeug in eine Schiefung gegenüber der Betriebsmittelebene gebracht wurde, werden mit dem Hilfsmesssystem die Radmittelpunkte bestimmt und dem Rechenmodell zur Verfügung gestellt. Es werden zwei Schiefungen betrachtet, die nachfolgend Schiefung-Bergauf und Schiefung-Bergab genannt werden. Nachdem die Fahrwerkgeometrievermessung in der Schiefung-Bergauf erfolgt ist, wird die Schiefung-Bergab eingestellt und die Radmittelpunkte erneut gemessen sowie dem Rechenmodell für die neue Fahrwerkgeometrievermessung in der Schiefung-Bergab zur Verfügung gestellt. Abbildung 109 zeigt die Darstellung beider Schiefungen mit den relevanten Vektoren für die Fahrwerkgeometrievermessung.

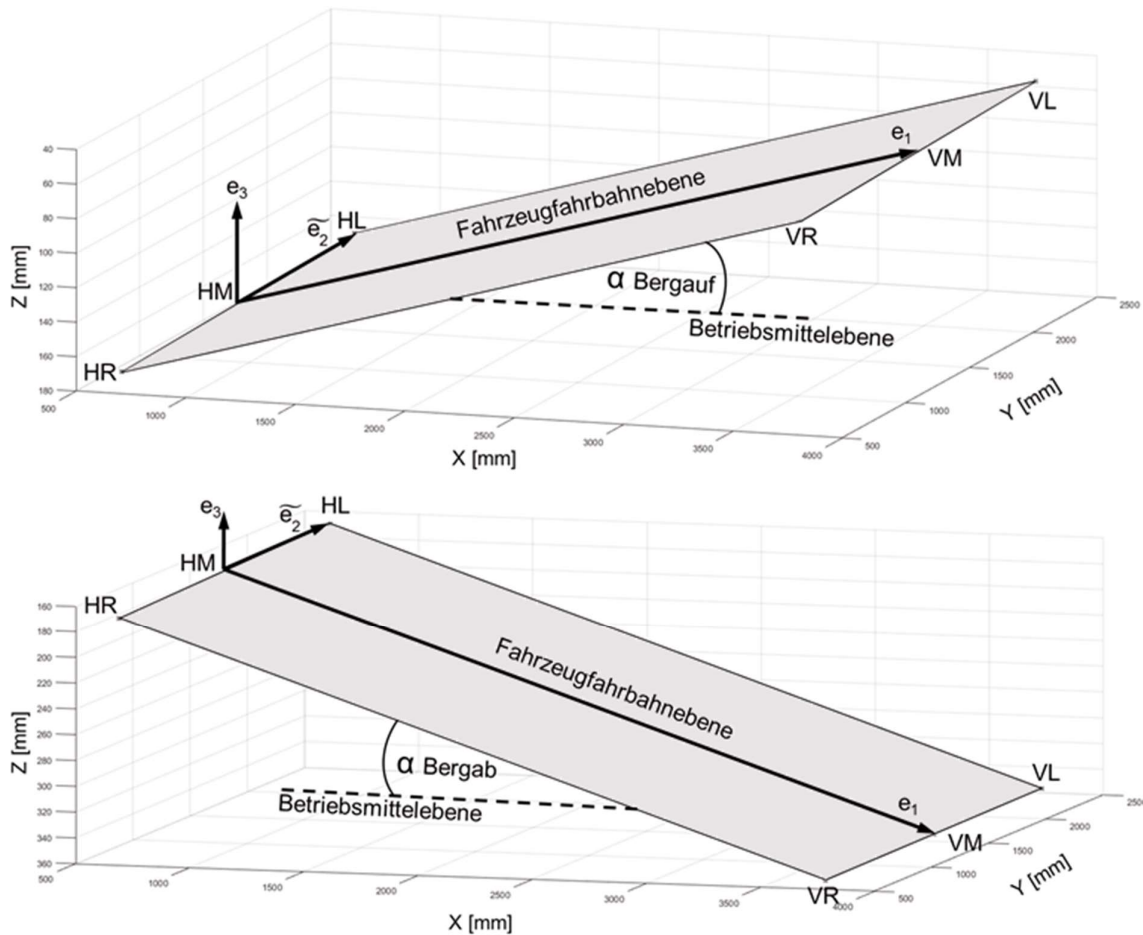


Abbildung 109 Ebenbetrachtung bei einer Fahrzeugschiefelage [vgl. Bos18]

Für die Schiefelage-Bergauf ergibt sich ein Schnittwinkel zwischen der Betriebsmittelebene und der Fahrzeugfahrbahnebene von $2,139^\circ$. Der Schnittwinkel der Schiefelage-Bergab beträgt $-2,636^\circ$. Tabelle 13 stellt die Ergebnisse der Fahrwerkgeometriemessung in den Schiefelagen im Vergleich zur horizontalen Lage des Fahrzeugs dar.

Tabelle 13 Messergebnisse der Fahrwerkswinkel bei einer Fahrzeugschiefelage

Fahrzeuglage	Spurwinkel
Horizontal K0-Lage	$-0,027^\circ$
$2,139^\circ$ Schiefelage-Bergauf	$0,058^\circ$
$2,636^\circ$ Schiefelage-Bergab	$0,062^\circ$

Die Differenz der Spurwinkel zwischen der Schiefelage-Bergauf und der Schiefelage-Bergab beträgt $0,004^\circ$. Dies spricht für die Korrektheit des mathematischen

Rechenmodells, da beide Schief lagen erkannt und eine korrekte Fahrwerkgeometrievermessung durchgeführt wurde. Es existiert jedoch ein Unterschied zwischen dem Spurwinkel der horizontalen K0-Lage sowie den Spurwinkeln der Schief lagen von $0,085^\circ$ und $0,089^\circ$. Die Differenz ist vermutlich auf eine Gewichtsverlagerung der Radlast zurückzuführen. Bei einer horizontalen Fahrzeuglage wirkt die Radlast als senkrechter Vektor entlang der Z-Achse im Fahrzeugkoordinatensystem. Bei einer Schief lage des Fahrzeugs wird der Radlastvektor in eine zweite Komponente in Richtung der X-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems aufgeteilt, sodass das Kräfteverhältnis entlang der Z-Achse des Radlastvektors einen geringen Einfluss auf die Elastokinematik ausübt. Dies entspricht im übertragenen Sinne einer Entlastung der Fahrzeugachse bzw. einer geringeren Radlast. Das Spuränderungsverhalten über der statischen Radlast hat gezeigt, dass mit zunehmender Radlast der Wert des Spurwinkels abnimmt bzw. in Richtung Nachspur größer wird. Bei einer Fahrzeugschief lage hingegen nimmt die relevante Radlastkomponente entlang der Z-Achse im Fahrzeugkoordinatensystem ab. Durch eine abnehmende Radlast wird der negative Einfluss der Spuränderung im Betrag kleiner, wodurch der Spurwinkel in Richtung Vorspur im Wert größer wird. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in den aufgenommenen Messwerten des Spurwinkels bei einer Fahrzeugschief lage im Vergleich zur horizontalen Fahrzeuglage wieder. Aufgrund der geringen Anzahl an durchgeführten Messungen kann keine abschließende Aussage über die Ursache für dieses Verhalten der Fahrwerkgeometrie getroffen werden.

6.3 Validierung im Betriebsversuch Werk Sindelfingen

Das neue Verfahren zur berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung wird in zwei Schritten mit konventionellen Anlagen zur Fahrwerkgeometrievermessung validiert. Im ersten Schritt wird das Versuchsfahrzeug nach den Messungen des vollfaktoriellen Versuchsplans auf einer Anlage zur Fahrwerkgeometrievermessung im Werkstattbereich vermessen. Anschließend wird das Versuchsfahrzeug im Werk auf einem Fahrwerkstand sowie auf einer weiteren Anlage, welche zur Auditierung der Fahrwerkgeometrievermessung verwendet wird, vermessen. Bei allen Messungen wurde die Fahrwerkgeometrie im Rahmen einer Eingangsmessung vermessen. Eine Einstellung oder Verstellung der Fahrwerkgeometrie auf die Sollwerte der Prüfvorschrift wurde nicht durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug wurde in jeder Anlage, außer der Fahrwerkvermessungsanlage im Werkstattbereich, zweimal vermessen und die Messergebnisse auf das K0-Niveau korrigiert. Im zweiten Schritt wird das Betriebsmittel in einer Montagelinie aufgebaut. Die Ergebnisse der Inline Fahrwerkgeometrievermessung werden mit den Fahrwerkständen in der Fahrtechnik verglichen. Eine direkte Zuordnung zum Vergleich der Messergebnisse wird über die Produktionsnummer des Fahrzeugs ermöglicht. Abbildung 110 zeigt den Vergleich der Messergebnisse am Versuchsfahrzeug auf der rechten Seite an der Hinterachse mit unterschiedlichen Anlagen zur Fahrwerkgeometrievermessung.

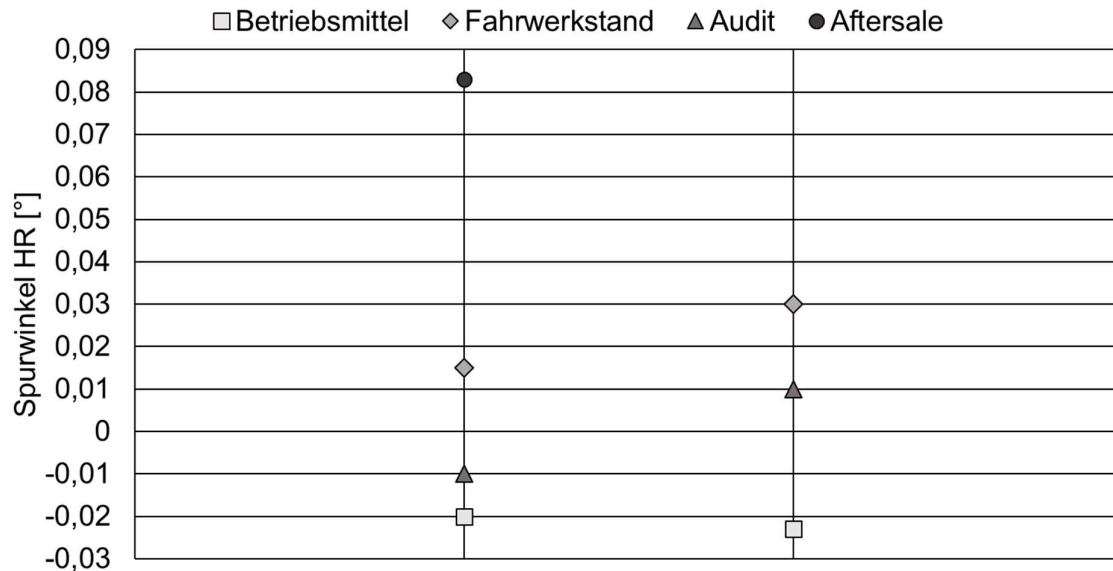


Abbildung 110 Messergebnisse unterschiedlicher Fahrwerkanlagen

Als Referenzwert für den Vergleich der Messergebnisse dienen die Messwerte der Fahrwerkvermessungsanlage zu Auditzwecken. Diese betragen in der ersten Eingangsmessung $-0,01^\circ$ und in der zweiten Eingangsmessung $0,01^\circ$. Bei der ersten Eingangsmessung liefert das neue Betriebsmittel eine geringere Abweichung zum Referenzwert als der Fahrwerkstand. Bei der zweiten Eingangsmessung ist dieses Verhalten umgekehrt zu beobachten. Zudem wird der Betrag der Differenz vom neuen Betriebsmittel zum Referenzwert der Auditanlage bei der zweiten Eingangsmessung größer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der zweiten Eingangsmessung mit dem neuen Betriebsmittel eine zusätzliche Drehung des Radflansches am Versuchsfahrzeug um 120° stattgefunden hat. Die Messergebnisse zeigen im Allgemeinen, dass das neue Betriebsmittel tendenziell niedrigere Spurwinkel misst als die Auditanlage und der Fahrwerkstand. Der Fahrwerkstand hingegen misst größere Spurwinkel als die Auditanlage. Der Betrag der Differenz zwischen der Auditvermessung und dem Fahrwerkstand sowie zwischen der Auditvermessung und dem neuen Betriebsmittel ist im Mittel nahezu identisch. Die Differenzen unterscheiden sich hingegen in ihren Vorzeichen. Die Fahrwerkvermessungsanlage für den Werkstattbereich zeigt mit einer Spurwinkeldifferenz von über $0,09^\circ$ bei der ersten Eingangsmessung und mit über $0,07^\circ$ bezogen auf die zweite Eingangsmessung eine sehr hohe Abweichung zu den Referenzwerten der Auditanlage. Dies kann auf eine unregelmäßige und fehlerhafte Kalibrierung der Fahrwerkvermessungsanlage sowie auf Ungenauigkeiten bei der Durchführung der Fahrwerkgeometrievermessung zurückzuführen sein. Die Vorvalidierung durch eine Vergleichsmessung unterschiedlicher Fahrwerkvermessungsanlagen hat für das neue Betriebsmittel akzeptable Ergebnisse aufgezeigt und unterstützt somit das weitere Vorgehen für einen Betriebsversuch im produktionsnahen Umfeld.

Der Betriebsversuch zur Validierung der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometriemessung wurde im Mercedes-Benz Werk Sindelfingen in der Produktion der S-Klasse durchgeführt. Für die erfolgreiche Durchführung des Betriebsversuchs waren die Bereiche Montage Fahrwerk, Instandhaltung, Logistik sowie die Fahrtechnik beteiligt. Der Betriebsversuch wurde im Bereich der Fahrwerkmontage auf einer verbindenden Fördertechnik realisiert. Dieser Bereich befindet sich vor der Medienbefüllung des Fahrzeugs bzw. nach der Frontmodulmontage. Die aufgebaute Fördertechnik in diesem Bereich besteht aus Schlitten auf denen das Fahrzeug positioniert ist. Die Schlitten bewegen sich über Laufrollen entlang der Montagelinie. Abbildung 111 zeigt den Standort des Betriebsversuchs sowie die verbindende Fördertechnik, welche über Schlitten realisiert ist.



Abbildung 111 Standort und Fördertechnik für den Betriebsversuch

Am Standort des Betriebsversuchs werden weder automatische noch manuelle Montageumfänge durchgeführt. Die verbindende Fördertechnik zwischen den Montagebändern dient gleichzeitig als Pufferstrecke. Die Montagebänder befinden sich auf dem Obergeschoss der Montagehalle. Die verbindende Fördertechnik ist auf der Bühne realisiert und wird durch Heber vom Obergeschoss erreicht.

Je ein Betriebsmittel ist links und rechts im Bereich der Hinterachse des Fahrzeugs aufgebaut. Die Betriebsmittel sind durch das Hilfsmesssystem Faro Laser Tracker eingemessen und kalibriert. Die Fahrzeuge bewegen sich in diesem Bereich der Montage im getakteten Betrieb. Im Idealfall befinden sich in diesem Bereich keine Fahrzeuge, da es sich hierbei um eine Pufferstrecke handelt. Die Pufferstrecke füllt sich, sobald Störungen in den nachgelagerten Montagebändern entstehen. Der Betriebsversuch lief über einen Zeitraum von zwei Wochen. Hinzu kamen weitere Tage für den Auf- und Abbau sowie zur Inbetriebnahme. Im Zeitraum von zwei Wochen konnten 150 Fahrzeuge, aufgrund der Abhängigkeit von Störungen, gemessen werden. Nach der Vermessung der Fahrwerkgeometrie werden die Spurwinkel hinten rechts sowie hinten links mit Korrekturwerten belegt. Zunächst wird die Niveauekompensation auf das Fahrzeugzielniveau anhand der aktuell gültigen Prüfvorschrift für das Fahrwerk durchgeführt. Anschließend erfolgt die Elastokinematikkompensation, um den Einfluss der Radlast in den Messwerten abzubilden. Die so ermittelten Winkel der Fahrwerkgeometrie bilden die endgültigen Werte für die weitere Validierung. Abbildung 112 zeigt die aufgebauten Betriebsmittel zur Durchführung des Betriebsversuches in der Halle 46 sowie das Hilfsmesssystem.



Abbildung 112 Aufbau der Betriebsmittel für den Betriebsversuch

Die Ergebnisse der Spurwinkelmessung des Betriebsversuchs werden mit den Messergebnissen des Fahrwerkstandes verglichen. Hierzu wird die Differenz zwischen dem Messwert des Fahrwerkstandes und dem Messwert der Inline Fahrwerkgeometrievermessung für den Spurwinkel hinten links und hinten rechts gebildet. Abbildung 113 zeigt das Ergebnis dieses Vergleiches.

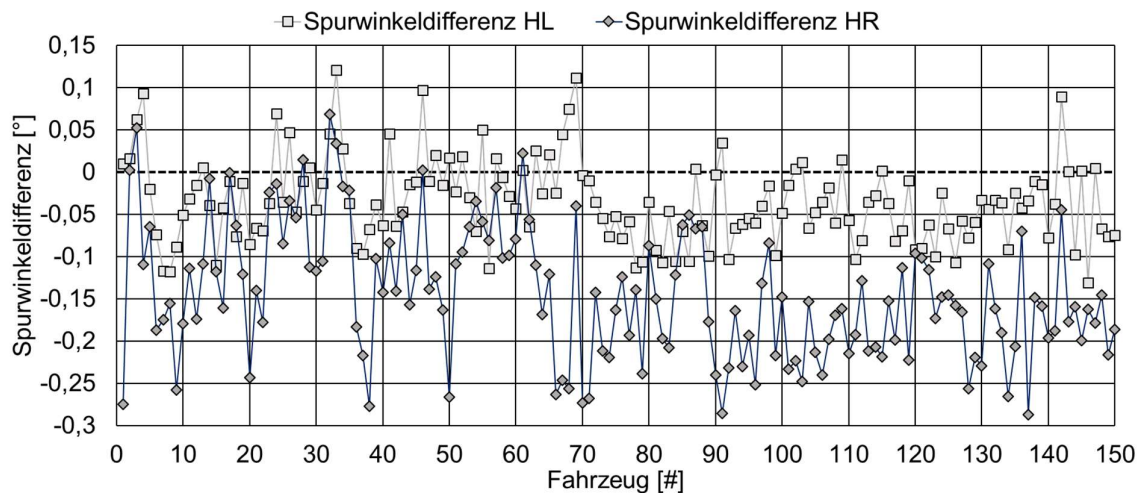


Abbildung 113 Messvergleich zwischen Fahrwerkstand und Betriebsmittel

Die Beobachtung in der Vorvalidierung, dass das neue Betriebsmittel im Vergleich zum Fahrwerkstand geringere Spurwinkel misst, wird durch diesen Vergleich der Messergebnisse bestätigt. Allerdings zeigen die Messergebnisse einen deutlichen Unterschied zwischen den Messungen hinten links und hinten rechts. Dieses Verhalten deutet auf einen systematischen Fehler hin. Das zweite Betriebsmittel gleicht dem ersten Betriebsmittel in allen Bauteilen bis auf den Lasertriangulations-sensor. Der Lasertriangulationssensor des Betriebsmittels HR (in Abbildung 112 links aufgebaut) weist einen geringeren Messabstand von 420 mm auf, wodurch der Messbereich auf 50 mm ansteigt. Die Messgenauigkeit bzw. Linearität des zweiten Lasertriangulationssensors gleicht dem Ersten. Aufgrund des geringeren Messabstandes ist das Betriebsmittel HR zwangsläufig näher an der Montagelinie positioniert. Fährt ein Fahrzeug mitsamt Schlitten an der Messstation vorbei, neigen sich die Betriebsmittel nach unten, da der Holzboden nachgibt. Aufgrund der Gewichte sowie der Tatsache, dass die Betriebsmittel nicht im Hallenboden verankert sind, sondern auf demselben Holzboden wie die Montagelinie platziert sind, kommt es zu den Neigungen der Betriebsmittel während der Messung. Da das Betriebsmittel HR näher an der Fördertechnik platziert ist als das Betriebsmittel HL, fällt die Neigung am Betriebsmittel HR höher aus. Dadurch hat das Fahrzeug- und Schlittengewicht einen stärkeren Einfluss auf die Messung des Betriebsmittels HR. Es entsteht ein systematischer Fehler beim Betriebsmittel HR der dazu führt, dass größere Distanzen

gemessen werden, die zu betragsmäßig größeren Spurwinkeln führen. Im Falle, dass der Holzboden nicht durch ein zusätzliches Fahrzeuggewicht belastet wird, sind beide Betriebsmittel ideal zueinander ausgerichtet und eingemessen. Das Betriebsmittel HL mit dem größeren Messabstand ist weiter weg von der Fördertechnik platziert, sodass der Gewichtseinfluss keinen zusätzlichen systematischen Fehler verursacht. Die Ergebnisse aus Abbildung 113 sind in Abbildung 114 mit einem konstanten Korrekturwert belegt, sodass dieser systematische Fehler zum Teil ausgeglichen wird.

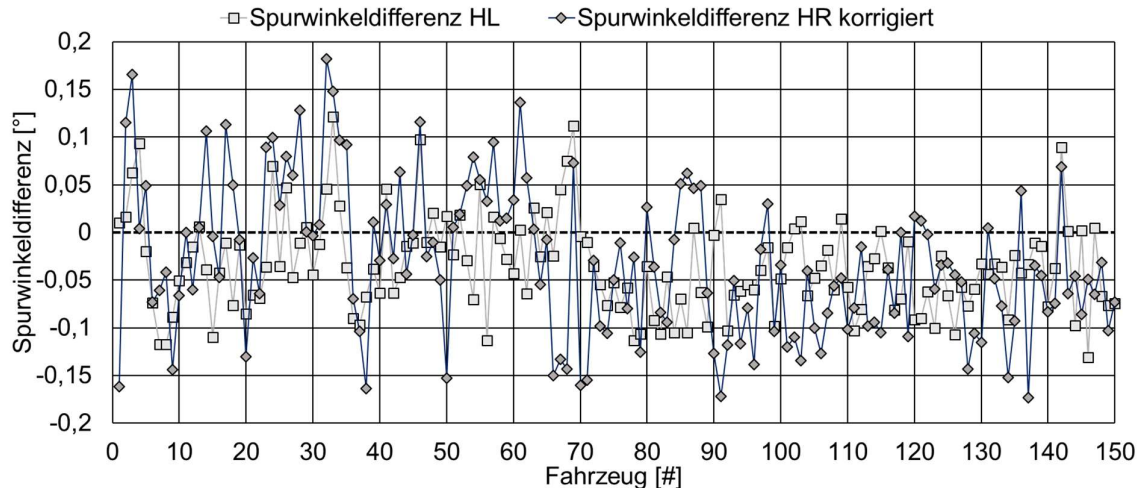


Abbildung 114 Messvergleich mit Korrekturwert hinten rechts

In den Messergebnissen der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung mit dem Korrekturwert ist ein weiterer systematischer Fehler enthalten. Dieser betrifft die Symmetrieachsen des Fahrwerks. Bei der Messung in der Montagelinie wurden die Winkel der Fahrwerkgeometrie zur Hinterachssymmetrieachse bestimmt, da die Messung der Radmittelpunkte an der Vorderachse nicht möglich war. Hierzu müssten zwei weitere Betriebsmittel für die Vermessung der Vorderachse installiert werden. Auf dem Fahrwerkstand werden die Winkel der Fahrwerkgeometrie allerdings zur Fahrwerksymmetrieachse bestimmt. Die so bestimmten Winkel können auf die Hinterachssymmetrieachse zurückgerechnet werden, wenn die Koordinaten aller Radmittelpunkte vorhanden sind. In diesem Fall war diese Rechenoperation nicht möglich, da die Koordinaten der Radmittelpunkte in X- und Y-Richtung auf dem Fahrwerkstand nicht abgreifbar waren. Die Messwerte zeigen ein sprunghaftes Verhalten bis zur Fahrzeugnummer 70. Ab diesem Fahrzeug werden die Amplituden der Differenzen geringer. Dieses Verhalten ist darin begründet, dass es ab der Fahrzeugnummer 70 zu weniger Vibrationen und Schwingungen in der Montagelinie kam. Die Minderung der Vibrationen wurde durch eine geringer werdende Anzahl an Fahrzeugbewegungen ausgelöst, da die Pufferstrecke nahezu vollständig befüllt war. Im Zeitraum zuvor befanden sich nur wenige Fahrzeuge auf der Pufferstrecke, sodass

es durch die angeschlossenen Drehtische zu häufigen Fahrzeugbewegungen kam, die die Messungen beeinflusst haben. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Vibrationen einen größeren Einfluss auf das Betriebsmittel für die Fahrwerkgeometrievermessung hinten links ausgeübt haben. Dies ist auf den geringeren Messabstand und der Nähe des Betriebsmittels zur Montagelinie mit dem damit verbundenen Einfluss der Neigung durch die Gewichte zurückzuführen. Für die Bewertung der erzielten Ergebnisse wird ein Toleranzband von $\pm 0,05^\circ$ aufgrund der Messwiederholgenauigkeit des Fahrwerkstandes sowie der Produkteinflüsse auf die Fahrwerkgeometrie gewählt. [Fit17] Die Vergleichsergebnisse für den Spurwinkel hinten links sind in Abbildung 115 in einem Histogramm aufgezeigt.

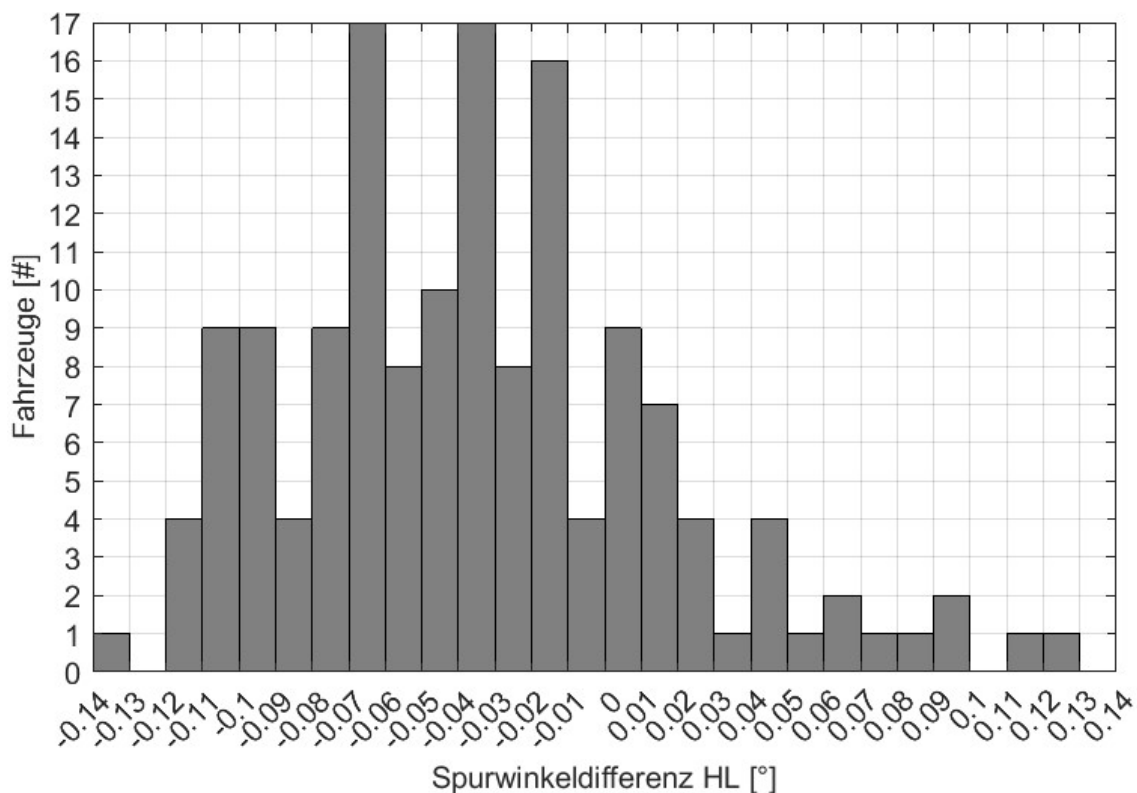


Abbildung 115 Histogramm der Spurwinkeldifferenz hinten links

Wird der Toleranzbereich von $\pm 0,05^\circ$ angesetzt, liegen 80 von 150 gemessenen Fahrzeugen innerhalb des Toleranzbereichs. 53% der gemessenen Fahrzeuge sind bezüglich der Messwerte der Fahrwerkgeometrie hinten links in Ordnung. In Abbildung 116 ist der Vergleich der Messwerte für die Spurwinkelmessung hinten rechts in einem Histogramm grafisch dargestellt.

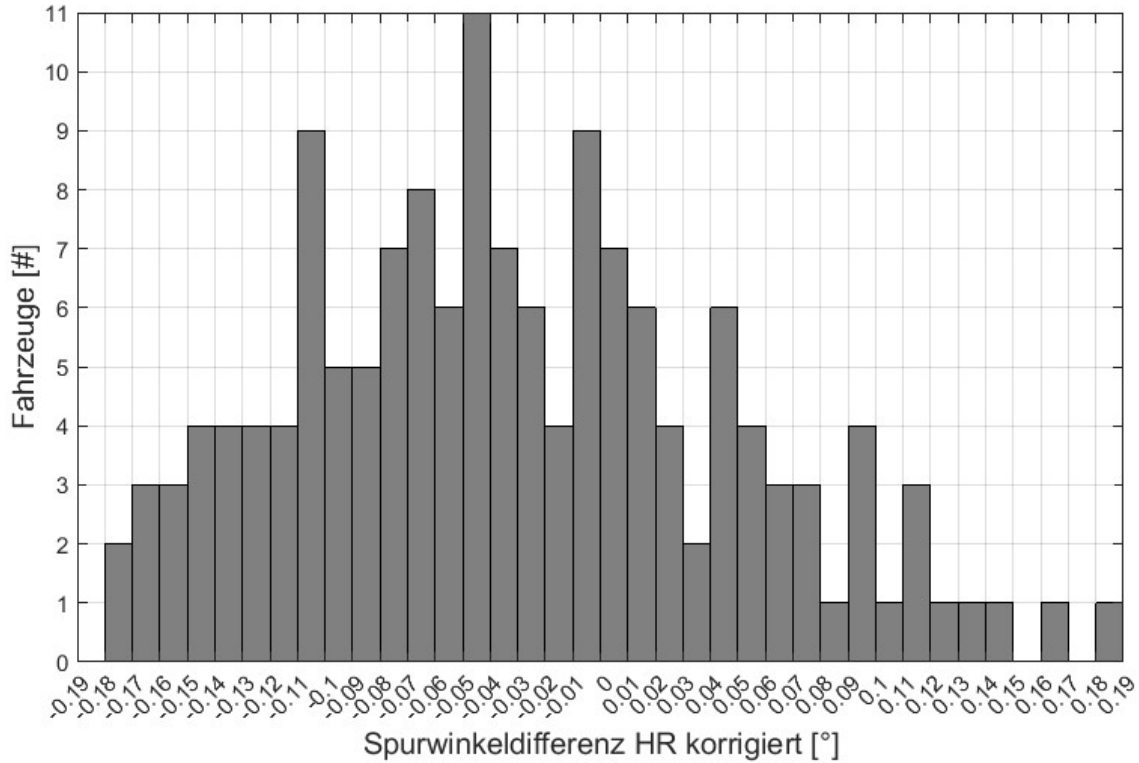


Abbildung 116 Histogramm der korrigierten Spurwinkeldifferenz hinten rechts

Für die Bewertung der Spurwinkeldifferenz hinten rechts wird ebenfalls ein Toleranzbereich von $\pm 0,05^\circ$ angesetzt. Hieraus folgt, dass die Fahrwerkgeometrievermessung bei 62 von 150 Fahrzeugen in Ordnung war. Dies entspricht 41% der gemessenen Fahrzeuge. Der geringere Wert im Vergleich zur Fahrwerkgeometrievermessung hinten links ist vermutlich auf den Resteinfluss der Vibrationen zurückzuführen. Dies ist auch in der breiteren Streuung des Histogramms erkennbar. In beiden Auswertungen ist weiterhin der systematische Fehler zwischen der Fahrwerkgeometrievermessung zur Hinterachs- und zur Fahrwerksymmetrieachse vorhanden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden abschließend alle durchgeführten Schritte und erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Ergänzend hierzu erfolgt die Beantwortung der Forschungsfragen sowie ein Ausblick über weitere Handlungsfelder im Rahmen der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung.

7.1 Zusammenfassung

Die Ausgangssituation und die Aufarbeitung des Standes der Technik zeigten die Herausforderungen der Fahrzeuginbetriebnahme auf. Durch die stetig wachsende Anzahl an zusätzlichen Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen entstehen hohe Prozesszeiten auf dem Fahrwerkstand in der Fahrtechnik. Dies führt zu einer Parallelisierung und dem Bedarf nach mehreren Fahrwerkständen in der Fahrtechnik. Eine Vorverlagerung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen kann diesem Trend entgegenwirken, sodass die Einlinigkeit in der Fahrtechnik erreicht werden kann. Als Basis für eine Vorverlagerung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen muss die Fahrwerkgeometrie vermessen werden. Aktuelle Technologien zur Fahrwerkgeometrievermessung in der Montagelinie besitzen, aufgrund der taktilen Vermessung durch die Adaption des Betriebsmittels mit dem Fahrzeug, Nachteile bezüglich der Investitionskosten, der Betriebsmittelkomplexität sowie dem flexiblen Einsatz in bestehenden Fahrzeugproduktionshallen. Dadurch ist der Bedarf nach einer neuartigen Technologie zur berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung gegeben. Eine umfassende Betrachtung nach dem Prinzip des Produktentstehungsprozesses sowie die Einbeziehung der Schwerpunkthemen Produkt, Prozess und Betriebsmittel bildet die Basis für die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Die Produktanalyse lieferte den Zentrierabsatz des Radflansches als neues Messobjekt für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung. Ergänzt durch experimentelle Voruntersuchungen wurde aufgezeigt, dass ein Radumschlag für die Fahrwerkgeometrievermessung nicht mehr notwendig ist, da die Form- und Lagetoleranzen des Messobjekts einen maximalen Fehler von $\pm 0,013^\circ$ hervorrufen. Somit kann die Forschungsfrage nach dem Entfall der Planlaufkompensation durch die Wahl eines geeigneten Messobjektes positiv beantwortet werden. Im Zuge der Produktanalyse erfolgte eine Definition von produktspezifischen Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Federkraft und -weg sowie der Radflanschposition und der Messoberfläche, die zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen von Experimenten evaluiert wurden. Im Rahmen einer Technologierecherche ist ein Lasertriangulationssensor als Messtechnologie für das Betriebsmittel identifiziert worden, da diese Art der Messtechnologie die Anforderungen an die Messgenauigkeit erfüllt. Zur Durchführung der Bewegungsabläufe des Lasertriangulationssensors wurde ein präzises und auf Steifigkeit ausgelegtes Betriebsmittel konstruiert, das im Wesentlichen aus zwei Linearachsen

besteht und modular aufgebaut werden kann. Die Kalibrierung der Betriebsmittel zueinander ist durch ein Hilfsmesssystem realisiert. In der Planungs- und Konzeptionsphase der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung wurden die betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren, wie der Messbereich, die Laserpositionen auf den Linearachsen und die Schwingungen zur weiteren Analyse definiert. Die Prozessbetrachtung hatte Algorithmen zur Niveau- und Gewichtsprädiktion zum Ergebnis, um das Spur- und Sturzänderungsverhalten des Fahrzeugs vom ausgefederten in den fahrfertigen Zustand zu beschreiben. Dadurch kann die Adaption des Betriebsmittels mit dem Fahrzeug vollständig vermieden werden, da der Einfederungszustand und der Einfluss der Elastokinematik durch Korrekturwerte kompensiert werden. Die Forschungsfragen zur Berücksichtigung des fahrfertigen Fahrzeugniveaus ohne physische Einfederung sowie zur Kompensation des Einflusses der Radlast können demzufolge positiv beantwortet werden. Für den gesamten Prozess der berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung ergibt sich ein maximaler Fehler von $\pm 0,038^\circ$. Die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase hatte eine modellprädiktive Regelung des Betriebsmittels sowie das mathematische Rechenmodell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung als wichtigste Ergebnisse. Die modellprädiktive Regelung des Betriebsmittels erlaubt die Einbeziehung der Massenträgheiten in die Automatisierungstechnik, wodurch präzisere und schnellere Bewegungsabläufe des Betriebsmittels realisiert werden. Das neuartige mathematische Rechenmodell zur fahrbahnunabhängigen und radindividuellen Fahrwerkgeometrievermessung ermöglicht auf Grundlage einer Vektoren- und Ebenenbetrachtung eine Fahrwerkgeometrievermessung in jeder beliebigen Lage zwischen dem Fahrzeug und dem Betriebsmittel. Die Voraussetzungen, dass sich das Fahrzeug zur Fahrwerkgeometrievermessung in der fahrfertigen Lage und parallel zum Betriebsmittel befinden muss, sind dadurch nicht mehr notwendig. Dieser Sachverhalt beantwortet die Forschungsfrage nach der Sicherstellung einer parallelen Ausrichtung zwischen dem Betriebsmittel und der Fahrzeugfahrbahnebene während dem Messvorgang positiv. Außerdem sind verschiedene Modi, wie beispielsweise der Automatikbetrieb und der manuelle Handbetrieb, in die Automatisierungstechnik integriert worden, wodurch eine optimale Steuerung des Betriebsmittels gewährleistet wird. Der Ablauf des Messvorganges gliedert sich in drei Hauptbestandteile, die in der Automatisierungstechnik implementiert sind. Zunächst erfolgt eine Messobjektdetektion durch eine Messmethodik zur Erkennung der Messflanken des Zentrierabsatzes auf dem Radflansch. Anschließend wird auf Basis von Konstruktionsdaten und einer weiteren Detektion von Messflanken der exakte Radmittelpunkt bestimmt. Abschließend findet der eigentliche Messvorgang für die Spur- und Sturzwinkelmessung statt. Die Koordinaten für die Messpunkte werden durch das mathematische Rechenmodell vorgegeben. Die Berechnung der Spur- und Sturzwinkel findet durch entsprechende Schnitte der gemessenen Raddrehebene mit der Fahrwerksymmetrieebene statt. Aus den zuvor definierten produkt- und

betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren wurde mit der Methode des Design of Experiments ein vollfaktorieller Versuchsplan für die Produkt- und Betriebsmitteluntersuchungen unter Laborbedingungen aufgestellt. Die Umsetzung der produktspezifischen Einflussfaktoren erforderte die Messungen an einer ausgebauten Hinterachse sowie an einem Versuchsfahrzeug, um den Einfluss der Federkraft zu ermitteln. Bei der Betriebsmitteluntersuchung wurde als Ausgangsgröße der Lasertriangulationssensormesswert definiert, sodass eine Messung an einer Fahrzeugachse nicht notwendig war. Die Auswertung der Ergebnisse der Produktuntersuchung ohne die Federkraft bestätigte das Niveauänderungsverhalten der Fahrwerkgeometriewinkel. Der maximal auftretende Fehler lag unterhalb der theoretischen Messgenauigkeitsanalyse von $\pm 0,018^\circ$. Im zweiten Teil der Produktuntersuchungen wurde die Fahrwerkgeometrievermessung an einem Versuchsfahrzeug durchgeführt. Die Versuchsdurchführung ergab einen maximal auftretenden Messfehler unterhalb des Werts der theoretischen Messgenauigkeitsanalyse von $\pm 0,022^\circ$. Hierbei wurde das Betriebsmittel zur Vermessung eingesetzt, weshalb der Toleranzwert der Messgenauigkeitsanalyse im zweiten Teil der Produktuntersuchung höher ist. In einer Gegenüberstellung beider Teile der Produktuntersuchungen wurde der Einfluss der Federkraft ermittelt und mit dem Gewichtsprädiktionsalgorithmus zur Ermittlung der Korrekturwerte für den Einfluss der Elastokinematik verglichen. Als Ergebnis des Vergleichs konnte festgestellt werden, dass der Gewichtsprädiktionsalgorithmus akzeptable Werte für die elastokinematische Fahrwerkgeometriewinkeländerung liefert, wenn das korrekte Kraftverhältnis zwischen dem Fahrzeug und der Radaufstandsfläche gegeben ist. Die Abweichung außerhalb des Toleranzbereichs in der fahrfertigen Fahrzeuglage beträgt $0,021^\circ$. Wird das Fahrzeug um 80 mm ausgefedert beträgt die Abweichung des Prädiktionwertes zum Sollwert $0,003^\circ$. Die Ergebnisse der Betriebsmitteluntersuchungen zeigten teilweise geringe Toleranzüberschreitungen auf, die auf Ungenauigkeiten bei der Ausrichtung der Messobjekte durch das Hilfsmesssystem sowie auf fertigungstechnische Form- und Lagetoleranzen der Messobjekte zurückzuführen sind. Abschließend wurde das gesamte Messverfahren zur berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung in einem Betriebsversuch validiert. Zunächst erfolgte eine Vorvalidierung in einem Vergleich zwischen den ermittelten Ergebnissen am Versuchsfahrzeug zu einem Fahrwerkstand sowie zu einer Auditierungsanlage. Dabei ergab sich im Mittel eine nahezu identische Abweichung, allerdings mit unterschiedlichen Vorzeichen, zwischen dem neuen Betriebsmittel und dem Fahrwerkstand im Vergleich zur Auditierungsanlage. Das neue Betriebsmittel misst geringere Winkel als der Fahrwerkstand, was auf eine unterschiedliche Messmethodik zurückzuführen ist. Die gemessenen Winkel mit dem neuen Betriebsmittel sowie auf dem Fahrwerkstand befinden sich alle im zulässigen Toleranzbereich der Auditierungsanlage, die als Referenz gilt. Die Ergebnisse der Validierung im Betriebsversuch umfassen die Gesamtheit aller unternommenen Schritte zur berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung. Insgesamt wurden 150 Fahrzeuge vermessen und mit Hilfe der Korrekturwerte wurde

die Fahrwerkgeometrie im fahrfertigen Zustand ermittelt. Die Fahrwerkvermessung am Fahrzeug hinten rechts brachte ein Ergebnis von 53% der gemessenen Fahrzeug, die im Vergleich zum Fahrwerkstand in Ordnung waren. Bei der Fahrwerkvermessung hinten links wurde ein Wert von 41% festgestellt. Die Beobachtung, dass das neue Betriebsmittel geringere Fahrwerkgeometriewinkel misst als der Fahrwerkstand, wurde bestätigt. Die außerhalb der Toleranz gemessenen Fahrzeuge sind auf starke Vibrationen durch die Fahrzeugbewegungen auf der Montagelinie sowie auf einen systematischen Fehler bezüglich der Fahrzeugsymmetrieachsen bei der Inline Fahrwerkgeometrievermessung zurückzuführen. Durch den Betriebsversuch in einer Produktionsumgebung konnten weitere Störgrößen sowie Optimierungs- und Entwicklungspotentiale für die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung ermittelt werden.

Das neue Betriebsmittel zur berührungslosen Inline Fahrwerkgeometrievermessung zeichnet sich durch geringe Investitionskosten für eine Technologie, die die Durchführung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen im Montageband ermöglicht, aus. Die geringeren Investitionskosten resultieren aus der Reduktion der Komplexität des Betriebsmittels, da keine taktile Messung durch Adaption mit dem Fahrzeug durchgeführt werden muss. Die konventionelle Adaption des Betriebsmittels mit dem Fahrzeug entfällt aufgrund des Einsatzes von neuen datengetriebenen Lösungen. Durch die Vorverlagerung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfängen in das Montageband wird die inhaltliche und strukturelle Parallelität in der Fahrtechnik vermieden. Dadurch steigt die Kalibrier- und Inbetriebnahmequalität im Vergleich zu traditionellen Fahrtechnikanlagen. Werden zukünftig neue Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge durch weitere Umgebungssensoren notwendig, können diese direkt in der Montagelinie integriert werden und führen somit nicht zu einer Prozesszeiterhöhung auf dem Fahrwerkstand. Das vollständig berührungslose Messverfahren erlaubt eine hohe Flexibilität bei der Wahl des Einsatzortes. Dies begünstigt die Anwendung der neuen Technologie in bereits bestehenden Montagehallen mit begrenzten Platzreserven und verkürzten Produktionslaufzeiten zur Amortisierung der Investitionskosten. Dadurch kann die zu Beginn der Arbeit gestellte zentrale Forschungsfrage positiv beantwortet werden. Das vorgestellte Betriebsmittel zur Inline Fahrwerkgeometrievermessung bietet die Chance Kalibrierumfänge effizient in die Montagelinie vorzuverlegen.

7.2 Ausblick

Die Validierung der experimentellen Untersuchungen im Betriebsversuch hat gezeigt, dass das Kalibrierkonzept für den Produktionseinsatz nicht praktikabel ist. Es erfordert umfangreiche Kenntnisse über das Hilfsmesssystem und dauert, selbst mit Unterstützung durch mehrere Personen, zu lange. Eine Anpassung der Konstruktion des Betriebsmittels muss vorgenommen werden, um eine schnellere Einstellung der benötigten Parallelitäten zwischen allen Betriebsmitteln und der globalen Ausrichtung

zu garantieren. Vorzugsweise findet die initiale Ausrichtung zum Horizont über eine automatisierte Fußverstellung mit entsprechender Neigungssensorik statt. Die Herstellung der Parallelität zwischen den Betriebsmitteln muss über einen simplen Mechanismus am Betriebsmittel selbst realisiert werden. Um das Hilfsmesssystem zu substituieren, ist eine geeignete Kalibrierlehre vorzusehen, die in der Lage ist die Austrittswinkel der Lasertriangulationssensoren zu bestimmen. Als erhebliche Störgrößen wurden Vibrationen und Schwingungen mit einer großen Amplitude im Betriebsversuch identifiziert. Hochfrequente Schwingungen mit einer kleinen Amplitude wirken sich auf das Messergebnis nur im geringen Maße aus, wie die Laborversuche gezeigt haben. Daher muss der Einsatzort des Betriebsmittels im Idealfall von der Montagelinie bautechnisch entkoppelt sein. Das Betriebsmittel sollte außerdem in einem dedizierten Hallenboden fest verankert werden, um eine Neigung des Betriebsmittels während des Messvorganges durch die vorbeifahrenden Objekte, wie beispielsweise Fahrzeuge, Schubplattformen oder Schlitten, zu vermeiden. Die Steifigkeit des Betriebsmittels darf durch zusätzliche Schwingungsdämpfer nicht reduziert werden, da ansonsten die Gefahr besteht die erforderlichen Laufparallelitäten nicht zu erreichen. Die berührungslose Inline Fahrwerkgeometrievermessung mit dem neuen Betriebsmittel wurde für den Montagetaktbetrieb realisiert. Das Ziel muss es sein, den Montagefließbetrieb ebenfalls zu ermöglichen. Hierzu muss die Automatisierung des Messablaufes weiter optimiert werden. Die reine Messdauer eines Durchganges ist für den Montagefließbetrieb zu hoch. Um eine Verkürzung der Messdauer zu erreichen, muss der Messablauf verschlankt werden, indem die Anzahl der Messpunkte reduziert wird und die Geschwindigkeit zum Anfahren der Messpunkte erhöht wird. Dies erfordert weitere Untersuchungen bezüglich der Qualität und Wiederholgenauigkeit der Messergebnisse. Aufgrund der Tatsache, dass die mathematischen Rechenmodelle ebenfalls auf der Recheneinheit der Automatisierungstechnik implementiert sind, kommt es zu Laufzeiterhöhung bei einem Messdurchgang. Wenn zwei Betriebsmittel parallel einen Messdurchgang starten, erhöht sich die Gesamtdauer eines Messdurchganges um bis zu 30 Sekunden. Dieser Zustand ist durch eingebaute Verzögerungen in der Automatisierungstechnik bereits zum Teil optimiert. Dies ermöglicht einen asynchronen Start der Betriebsmittel, sodass während der Messpunktaufnahme des einen Betriebsmittels das andere Betriebsmittel eine Fahrtbewegung ausführt. Dadurch wird die Recheneinheit entlastet. Eine bedeutend leistungsstärkere Recheneinheit für die Automatisierungstechnik ist vorzusehen, um die Gesamtdauer für einen Messdurchgang, vor allem beim Einsatz von vier Betriebsmitteln, signifikant zu reduzieren. Zur Realisierung der Messung im Montagefließbetrieb muss zunächst eine Synchronisation mit dem Fahrzeug und mit dem Montageband erfolgen. Die Synchronisationsgeschwindigkeit wird als Leitwert für den anschließenden Messdurchgang verwendet. Nach der Synchronisation ist das Betriebsmittel allerdings nicht in der Lage eine Änderung der Bandgeschwindigkeit zu detektieren. Eine Änderung der Bandgeschwindigkeit während des Messvorganges birgt die Gefahr, dass Messpunkte außerhalb der Messzone des Zentrierabsatzes

aufgenommen werden. Sollte sich das Montageband nicht mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegen, besteht die Option ein Geberrad an das Montageband zu installieren, um die Bandgeschwindigkeit in Echtzeit zu ermitteln. Die Einstellung der Fahrwerkgeometrie an der Hinter- und Vorderachse mit dem neuen Betriebsmittel zur Inline Fahrwerkgeometrievermessung ist nicht möglich, da der Lasertriangulations-sensor keine Echtzeitmessung durchführen kann. Dadurch ist die Änderung der Fahrwerkgeometriewinkel während der Fahrwerkeinstellung nicht messbar. Die Wahl einer anderen Messsensorik, wie beispielsweise einem Laserlinienscanner, ermöglicht die Echtzeitmessung, sodass auch die Kalibrier- und Inbetriebnahmeumfänge des Fahrwerkverbundes in der Montagelinie realisiert werden können. In der Technologierecherche wurde der Laserlinienscanner, aufgrund des geringen Messabstandes und dem damit verbundenen Risiko einer Kollision der Messtechnik mit dem Fahrzeug, zunächst ausgeschlossen. Die Wahl eines Laserlinienscanners führt dazu, dass der Messabstand zum Fahrzeug, aufgrund der erforderlichen Messgenauigkeit und Linearität, geringer wird. Die Anwendung eines Laserlinienscanners ist daher im Einzelfall speziell zu prüfen. Die eingesetzten datengetriebenen Lösungsansätze für die Niveau- und Gewichtsprädiktion erfordern eine ständige Aktualisierung. Hierzu muss die IT-Infrastruktur qualitativ hochwertige Datensätze aus der Fahrtechnik bereitstellen. Die datengetriebenen Lösungen müssen für einen flächendeckenden Einsatz des neuen Betriebsmittels zur Inline Fahrwerkgeometrievermessung soweit weiterentwickelt werden, dass zukünftig selbstlernende Systeme die operativen Auswertelgorithmen sowie die Adaption des Spur- und Sturzänderungsverhaltens übernehmen.

8 Literaturverzeichnis

- [Abe17] ABELE, M.: *Fahrwerkgeometrievermessung*. Hochschule Aalen, Praxissemesterbericht, 2017
- [Adc17] A.D.C. GMBH – INDUSTRIAL SENSORS: *ARS 30X /-2 /-2C/-2T/-21 Long Range Radar*. Lindau, Datenblatt Nr. 12, 2017.
- [Aue16] AUE KASSEL GMBH: *Original-Betriebsanleitung Endmontage HA Linie 3*. Kassel, Bedienungsanleitung, 2016.
- [Bin11] BINZ, H.: *Methodische Produktentwicklung 1*. Stuttgart, Umdruck zur Vorlesung, 2011.
- [Bos06] BOSCH: *Felgenschlagkompensation*. Plochingen, Bosch informiert, 2006.
- [Bos18] BOSCH, R.: *Entwicklung eines produktionsgerechten und automatisierten Messverfahrens für die Inline Fahrwerkgeometrievermessung*. Hochschule Augsburg, Bachelorthesis, 2018.
- [Bra13] BRAESS, H.; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden, Springer Vieweg Nr. 7, 2013
- [Bra17] BRATZEL, S.; THÖMMES, J.; TELLERMANN, R.: *Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen für das Jahr 2030: Deutschland, EU, USA und China*. Bergisch Gladbach, Studie, 2017.
- [Cac15] CACILO, A.; SCHMIDT, S.; WITTLINGER, P.; HERMANN, F.; BAUER, W.; SAWADE, O.: *Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – industriepolitische Schlussfolgerungen*. Studie, 2015.
- [Dai11-1] DAIMLER AG: *Fahrzeugansicht virtuelles Fahrzeug*. Sindelfingen, Grafik, 2011
- [Dai11-2] DAIMLER AG: *Der Fahrwerksprüfstand in der Mercedes-Benz Produktion - mehr als nur Spureinstellung*. Ulm, Präsentation, 2011.

- [Dai14] DAIMLER AG: *Mercedes-Benz investiert mehr als drei Milliarden Euro in Deutschland: Mercedes-Benz richtet Pkw-Produktionsorganisation neu aus.*
<https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/cache/7539303v1tv3/D213973-Produktion-in-Sindelfingen.jpg>. Zugriff am 12.11.2018.
- [Dai15] DAIMLER AG: *ZB Verbundbremsscheibe Hi In.Bel BS320x24 TL48.* Sindelfingen, Konstruktionszeichnung, 2015.
- [Dai16] DAIMLER AG: *Presswerk Kuppenheim: Mercedes-Benz investiert 170 Millionen Euro und schafft 200 zusätzliche Arbeitsplätze.*
<https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/cache/10013279v1tv3/D289589-Eroeffnungsfeier-Presswerk-Kuppenheim-II.jpg>. Zugriff am 12.11.2018.
- [Dai17] DAIMLER AG: *HA Radflansch.* Sindelfingen, Konstruktionszeichnung, 2017.
- [Dai18-1] DAIMLER AG: *Steckbrief: Kamera.*
<https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Steckbrief-Kamera.xhtml?oid=40727166>. Zugriff am 03.11.2018.
- [Dai18-2] DAIMLER AG: *Die neue Mercedes-Benz A-Klasse: Der Maßstab in der Kompaktklasse.*
<https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/cache/32971630v2tv3/D481096-Mercedes-Benz-A-Klasse-W177-2018.jpg>. Zugriff am 12.11.2018.
- [Dai18-3] DAIMLER AG: *Die neue Mercedes-Benz A-Klasse: Der Maßstab in der Kompaktklasse.*
<https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/cache/32971635v2tv3/D481101-Mercedes-Benz-A-Klasse-W177-2018.jpg>. Zugriff am 12.11.2018.
- [Dai19] DAIMLER AG: *Geschäftsbericht 2018.* Stuttgart, Geschäftsbericht, 2019.
- [Deu00] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 32877 Optoelektronische Abstands-, Profil- und Formmessung.* Berlin, Norm, 2000.

- [Deu08] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 70020-3 Prüfbedingungen, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Elastizität, Masse, Begriffe, Verschiedenes*. Berlin, Norm, 2008.
- [Deu11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 25178-602 Geometrische Produktspezifikation*. Berlin, Norm, 2011.
- [Deu13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN ISO 8855 - Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe*. Berlin, Norm, 2013.
- [Deu92] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 70027 Fahrwerkvermessung*. Berlin, Norm, 1992.
- [Deu94] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 70000 Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten Begriffe*. Berlin, Norm, 1994.
- [Eie17] EIERMANN, L.: *Modellprädiktive Positionsregelung einer Inline Fahrwerkvermessungsanlage*. Hochschule Karlsruhe, Masterthesis, 2017.
- [Eur92] EUROPÄISCHE UNION: *92/91/EWG über Massen und Abmessungen von Kraftfahrzeugen der Klasse M1*. Brüssel, Richtlinie, 1992.
- [Far18] FARO TECHNOLOGIES, INC.: *Faro Laser Tracker*.
<https://www.faro.com/de-de/produkte/industrielle-messtechnik/faro-laser-tracker/>. Zugriff am 29.04.2018.
- [Fit17] FITZ, D.: *MSA Rohdaten*. Böblingen, Datenblatt, 2017.
- [For17] FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V.: *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*. Berlin, Studie, 2017.
- [Fre16] FREUER, A.: *Ein Assistenzsystem für die energetisch optimierte Längsführung eines Elektrofahrzeugs*. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.

- [Gev99] GEVATTER, H.: *Handbuch der Meß- und Automatisierungstechnik*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 1999.
- [Gra18] GRAUMANN, M.: *Betriebsmittel zur Inline Fahrwerkgeometrie-vermessung*. Hochschule Landshut, Praktikumsbericht, 2018.
- [Gre01] GREFF, U.; ALTMAYER, A.; HERRMANN, A.; DURANT, P.: *Verfahren zur Messung der Geometrie einer Radachse eines Fahrzeugs*. Püttlingen, Patentschrift EP 1 128 157 B1, 2001.
- [Hei13] HEIßING, B.; ERSOY, M.; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden, Springer Vieweg Nr. 4, 2013.
- [Hen93] HENKER, E.: *Fahrwerktechnik*. Braunschweig, Vieweg, 1993.
- [Her03] HERING, E.; TRIEMEL, J.; BLANK, H.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Nr. 5, 2003.
- [Her18] HERING, E.; SCHÖNFELDER, G.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Wiesbaden, Springer Vieweg Nr. 2, 2018.
- [Hes14] HESSE, S.; SCHNELL, G.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Wiesbaden, Springer Vieweg Nr. 6, 2014.
- [Hil16] HILGERS, M.: *Elektrik und Mechatronik*. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.
- [Hoh11] HOHLRIEDER, M.; REICHBOTT, H.; LAMSTER, R.: *Vorrichtung und Verfahren zum Vermessen der Geometrie einer Radachse eines Kraftfahrzeuges*. Kassel, Patentschrift DE 11 2004 000 871 B4, 2011.
- [Idg18] IDG TECH MEDIA GMBH: *Radar, Lidar, Kamera - die Augen der Sicherheits-Assistenten*.
https://www.pcwelt.de/ratgeber/Radar__Lidar__Kamera_-_die_Augen_der_Sicherheits-Assistenten-Autos_mit_Durchblick-8238798.html. Zugriff am 03.11.2018.
- [Jän05] JÄNICH, K.: *Mathematik 1 – Geschrieben für Physiker*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Nr.2, 2005.

- [Kam12] KAMACHI, H.; HARA, K.; AOKI, Y.; ONO, K.; SAITO, H.: *Fahrzeug-Radeinstellungs-Messverfahren und Vorrichtung*. München, Patentschrift DE 10 2009 013 157 B4, 2012.
- [Kar15] KARPFINGER, C.: *Höhere Mathematik in Rezepten – Begriffe, Sätze und zahlreiche Beispiele in kurzen Lerneinheiten*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Nr. 2, 2015.
- [Kef18] KEFERSTEIN, C.; MARXER, M.; BACH, C.: *Fertigungsmesstechnik*. Wiesbaden, Springer Vieweg Nr. 9, 2018.
- [Ker18] KERBER, F.: *Herleitung Gauß-Helmert Modell*. Augsburg, 2018.
- [Kim08] KIMMERLE, W.; STROPPEL, M.: *Lineare Algebra und Geometrie für Ingenieure, Mathematiker und Physiker*. Stuttgart, edition delkhofen Nr. 2, 2008.
- [Kir16] KIRCHENBAUR, J.: *Konstruktion einer modularen Trägereinheit für Sensoren zur Fahrwerkgeometrievermessung*. Hochschule Ulm, Bachelorthesis, 2016
- [Lan16] LANZINGER, J.: *Technologierecherche*. Ulm, Abschlussbericht, 2016.
- [Lap15] LAP GMBH LASER APPLIKATIONEN: *Antaris Installations- und Gebrauchsanweisung*. Lüneburg, Bedienungsanleitung, 2015.
- [Lap16] LAP GMBH LASER APPLIKATIONEN: *Antaris-L parameter listing*. Lüneburg, Datenblatt, 2016.
- [Leu18] LEUZE ELECTRONIC: *Lichtschnittsensor ermittelt 3D-Greifpositionen eines Roboters*.
[http://leuze.com/de/belgium/oplossingen_be/toepassingen_uit_de_praktijk_be/details_7779.php?lang=deu#prettyPhoto\[galerie1\]/4/](http://leuze.com/de/belgium/oplossingen_be/toepassingen_uit_de_praktijk_be/details_7779.php?lang=deu#prettyPhoto[galerie1]/4/).
 Zugriff am 24.04.2018.
- [Lud02] LUDLOFF, A.: *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*. Braunschweig Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Nr. 3, 2002.

- [Mat07] MATSCHINSKY, W.: *Radführungen der Straßenfahrzeuge*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Nr. 3, 2007.
- [Mer16] MERCEDES-BENZ: *Einstellvorschrift Fahrwerk*. Sindelfingen, Datenblatt Nr. 5, 2016.
- [Mer17] MERCEDES-BENZ: *Prüfvorschrift Fahrgestell*. Sindelfingen, Datenblatt Nr. 10, 2017.
- [Mic18] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG: *Laser-Linien-Triangulation*. <https://www.micro-epsilon.de/service/glossar/Laser-Linien-Triangulation.html>. Zugriff am 05.05.2018.
- [Min18] MINITAB INC.: *Minitab Statistical Software*. <http://www.minitab.com/de/de/products/minitab/>. Zugriff am 29.04.2018.
- [Möl10] MÖLLER-WEDEL OPTICAL: *Autokollimatoren Einleitung*. Wedel, Katalog, 2010.
- [Mül11] MÜLLER, R.; ESSER, M.: *Montagesystemgestaltung – Toleranzmanagement als Planungsbasis*. Aachen, Vortrag, 2011.
- [Mül15-1] MÜLLER, R.; OTTO, M.: *Möglichkeiten und Strategien zur Fahrwerkeinstellung in der automobilen Endmontage*. Böblingen, Präsentation, 2015.
- [Mül15-2] MÜLLER, R.: *Montage und Inbetriebnahme von Kraftfahrzeugen – Einführung in die Automobilproduktion*. Saarbrücken, Vorlesungen, 2015.
- [Mül15-3] MÜLLER, R.; TENTRUP, T.: *Montage und Inbetriebnahme von Kraftfahrzeugen – Inbetriebnahme und Prüfungen im Bandende-Bereich I*. Saarbrücken, Vorlesungen, 2015.
- [Mül16] MÜLLER, R.; OTTO, M.; SCHIRMER, L.: *Optimierung des Voreinstellprozesses für Hinterachsen*. Böblingen, Abschlusspräsentation, 2016.
- [Nau74] NAUMANN, M.: *Meß- und Prüftechnik*. Wiesbaden, Springer Fachmedien, 1974.

- [Ntn15] NTN-SNR ROULEMENTS: *Wir bringen Sie auf die Schiene!*. Annecy, Katalog, 2015.
- [Oic18] OICA: *Economic Contributions – A growth industry*.
<http://www.oica.net/category/economic-contributions/>. Zugriff am 13.11.2018
- [Pol16] POLYTEC: *Oberflächenmesstechnik Technologie*.
https://www.polytec.com/fileadmin/b/Oberfl%C3%A4chenmesstechnik/TOP_TEC_CHROM_Chromatic-confocal_principle.jpg. Zugriff am 24.04.2018.
- [Pon08] PONN, J.; LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2008.
- [Pre11] PRESTING, H.; JOSTSCHULTE, K.: *Der Fahrwerksprüfstand in der Mercedes-Benz Produktion - mehr als nur Spureinstellung*. Ulm, Vortrag zum Film, 2011.
- [Pro18-1] PROFIBUS & PROFINET INTERNATIONAL (PI): *PROFINET*.
<https://www.profibus.com/technology/profinet/>. Zugriff am 05.05.2018.
- [Pro18-2] PROFIBUS & PROFINET INTERNATIONAL (PI): *PROFIBUS*.
<https://www.profibus.com/technology/profibus/>. Zugriff am 05.05.2018.
- [Püt17] PÜTZ, R.; SERNÉ, T.: *Rennwagentechnik - Praxislehrgang Fahrdynamik*. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.
- [Ras18] RASPBERRY PI FOUNDATION: *Raspberry Pi 3*.
<https://www.raspberrypi.org/>. Zugriff am 05.05.2018.
- [Rau16] RAU, T.: *Analyse der Prüfabläufe in der Fahrzeuginbetriebnahme auf dem Fahrwerkstand*. Ulm, Bachelorthesis, 2016.
- [Rei11] REIF, K.: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*. Wiesbaden, Vieweg+ Teubner Verlag Nr. 6, 2011.

- [Rom18] ROMESS ROGG: *Neigungsmesser CM 09606*.
<http://www.romess.de/index.php/produkte/fahrwerkvermessung/neigungsmesser-cm-09606>. Zugriff am 29.04.2018.
- [Ron15] RONCZKA, J.: *Continental Engineering Services GmbH - Advanced Driver Assistance Systems*. Präsentation, 2015.
- [Sch17] SCHLAG, M.: *Standardspezifikation Fahrwerkstand*. Sindelfingen, Datenblatt Nr. 0.93, 2017.
- [Sch95] SCHIROTZEK, W.; SCHOLZ, S.: *Starthilfe Mathematik – Für Studienanfänger der Ingenieur-, Natur- und Wirtschaftswissenschaften*. Wiesbaden, Springer Fachmedien, 1995.
- [Sig16] SIGMAPRO: *DOE – Vollfaktorielle 2^k Versuche*. Feldkirchen, Schulungsunterlage, 2016.
- [Soc75] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: *SAE J1100a motor vehicle dimensions*. Warrendale, Geset, 1975.
- [Sto95] STOLL, G.: *Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD*. München, Hanser, 1995.
- [Tel18] TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION: *TIA TSB-89 – Application Guidelines for TIA/EIA-485-A*. <https://www.tiaonline.org/>. Zugriff am 05.05.2018.
- [Ten04] TENTRUP, T.; MÜLLER, D.; BLAES, S.: *Verfahren zur Messung der Radachsen einer Fahrzeugachse*. Püttlingen, Patentschrift EP 1 505 363 B1, 2004.
- [Trä14] TRÄNKLER, H.; REINDL, L.: *Sensortechnik*. Berlin Heidelberg, Springer Vieweg Nr. 2, 2014.
- [Tra17] TRASKOVSKIS, E.: *Verfahren zur Fahrzeuggewichtsprädiktion und elastokinematische Einflüsse der statischen Radlast auf die Fahrwerkgeometrie*. Hochschule Rhein-Waal, Bachelorthesis, 2017.

- [Tyr18] TYREREVIEWS: *Michelin Pilot Sport 4 S*.
<http://www.tyrereviews.co.uk/public/tyres/Michelin-Pilot-Sport-4-S.jpg>.
 Zugriff am 29.04.2018.
- [Val18] VALEO: *Valeo Scala*. <https://www.valeo.com/en/valeo-scala/>. Zugriff
 am 03.11.2018.
- [Vau11] VAUDERWANGE, T.: *Fahrwerkvermessung*. Würzburg, Vogel
 Buchverlag, 2011.
- [Völ16] VÖLZ, A.: *Modellprädiktive Regelung nichtlinearer Systeme mit
 Unsicherheiten*. Wiesbaden, Springer Vieweg , 2016.
- [Wal06] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*.
 Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlag Nr. 1, 2006.
- [Way19-1] WAYCON POSITIONSMESSSTECHNIK: *Kapazitive Sensoren - Messprinzip*.
[https://www.waycon.de/produkte/kapazitive-
 wegsensoren/messprinzip-kapazitive-sensoren/](https://www.waycon.de/produkte/kapazitive-wegsensoren/messprinzip-kapazitive-sensoren/). Zugriff am
 25.07.2019.
- [Way19-2] WAYCON POSITIONSMESSSTECHNIK: *Induktive Sensoren - Aufbau*.
[https://www.waycon.de/fileadmin/induktive-sensoren-lvdt/Induktiver-
 Sensor-Aufbau.svg](https://www.waycon.de/fileadmin/induktive-sensoren-lvdt/Induktiver-Sensor-Aufbau.svg). Zugriff am 25.07.2019.
- [Wie11] WIEDEMANN, J.: *Fahreigenschaften des Kraftfahrzeugs 1*. Stuttgart,
 Umdruck zur Vorlesung, 2011.
- [Wis18] WISSMANN, M.: *OICA Press Conference*. Genf, Präsentation, 2018.

V Im Rahmen der Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten

BOSCH, ROBERT: *Entwicklung eines produktionsgerechten und automatisierten Messverfahrens für die Inline Fahrwerksgeometrievermessung*. Hochschule Augsburg, Fakultät für Elektrotechnik, 2018.

EIERMANN, LUCAS: *Modellprädiktive Positionsregelung einer Inline Fahrwerksvermessungsanlage*. Hochschule Karlsruhe, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, 2017.

TRASKOVSKIS, EDVARDS: *Verfahren zur Fahrzeuggewichtsprädiktion und elastokinematische Einflüsse der statischen Radlast auf die Fahrwerksgeometrie*. Hochschule Rhein-Waal, Fakultät Technologie und Bionik, 2017.

KIRCHENBAUR, JOHANNES: *Konstruktion einer modularen Trägereinheit für Sensoren zur Fahrwerksgeometrievermessung*. Hochschule Ulm, Fakultät Maschinenbau und Fahrzeugtechnik, 2016.

CHEN, YUQI: *Entwicklung eines Messsystems zur Fahrwerksgeometrievermessung*. Karlsruher Institut für Technologie, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, 2016.

RAU, TOBIAS: *Analyse der Prüfabläufe in der Fahrzeuginbetriebnahme auf dem Fahrwerkstand*. Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften, 2016.

VI Anhang

Tabelle 14 Parameter des vollfaktoriellen Versuchsplans für das Produkt

1. Definition	
a. Problemdefinition	Die Fahrwerkvermessung soll ohne Radumschlag, ohne Radlast und im ausgefederten Zustand erfolgen
b. Zielsetzung	Die Wirkung der Einflussfaktoren auf die Fahrwerkgeometrie wird ermittelt.
c. Rahmenbedingungen	Die Versuche finden an einer Versuchsachse sowie am Fahrzeug statt
2. Voruntersuchung	
a. Ermittlung Einflussfaktoren (Eingangsvariablen)	Federkraft, Federweg, Radumschlag, Messoberfläche
b. Ermittlung Zielgrößen (Ausgangsvariablen)	Spurwinkel
c. Ermittlung von Zusammenhängen, Effekten und Wechselwirkungen	Die Federkraft und Federweg beeinflusst die Fahrwerkswinkel
3. Versuchsplan	
a. Festlegung der Zielgrößen	Spurwinkel
b. Festlegung der Einflussfaktoren	Federkraft, Federweg, Position Radflansch, Messoberfläche
c. Festlegung der Faktorstufen	Federkraft: ja, nein; Federweg: -110 mm, -80 mm, K0, +80 mm; Position Radflansch: 0°, 120°, 240°; Messoberfläche: glatt, rau
d. Festlegung der Wiederholungen	3
e. Erstellung des Versuchsplans	MiniTab
f. Vorbereitungen zur Datenerfassung	Listen
4. Durchführung	
a. Versuche nach Plan durchführen	Durchführung im Labor und in der Versuchswerkstatt
b. Protokollieren von Rahmenbedingungen	
c. Einfluss von Störgrößen minimieren	
d. Messung und Protokollieren von Störgrößen	Ein Hygrometer misst Raumfeuchtigkeit und -temperatur.
e. Dokumentation von Besonderheiten	
5. Auswertung	
6. Verifizierung	

Tabelle 15 Parameter des vollfaktoriellen Versuchsplans für das Betriebsmittel

1. Definition	
a. Problemdefinition	Form- und Lagetoleranzen sowie äußere Faktoren beeinflussen das Messergebnis des Betriebsmittels
b. Zielsetzung	Das Betriebsmittel erfüllt in allen Situationen die geforderten Toleranzen
c. Rahmenbedingungen	Die Versuche finden an einem experimentellen Aufbau statt.
2. Voruntersuchung	
a. Ermittlung Einflussfaktoren (Eingangsvariablen)	Messbereich, Position X-Achse, Position Z-Achse, Schwingungen
b. Ermittlung Zielgrößen (Ausgangsvariablen)	Messwert Lasersensor
c. Ermittlung von Zusammenhängen, Effekten und Wechselwirkungen	Die Linearität des Lasertriangulationssensors beeinflusst die Messgenauigkeit über dem Messbereich.
3. Versuchsplan	
a. Festlegung der Zielgrößen	Messwert Lasersensor
b. Festlegung der Einflussfaktoren	Messbereich, Position X-Achse, Position Z-Achse, Schwingungen
c. Festlegung der Faktorstufen	Messbereich: Anfang, Ende; Position X-Achse: Anfang, Mitte, Ende; Position Z-Achse: Anfang, Ende; Schwingungen: ja, nein
d. Festlegung der Wiederholungen	3
e. Erstellung des Versuchsplans	MiniTab
f. Vorbereitungen zur Datenerfassung	Listen
4. Durchführung	
a. Versuche nach Plan durchführen	Durchführung in der Versuchswerkstatt
b. Protokollieren von Rahmenbedingungen	
c. Einfluss von Störgrößen minimieren	
d. Messung und Protokollieren von Störgrößen	
e. Dokumentation von Besonderheiten	
5. Auswertung	
6. Verifizierung	