

# **Effizienzsteigerung und Absicherung automobiler Inbetriebnahmeprozesse**

Betriebsmittel für die intelligente Inbetriebnahme und Absicherung in  
der Fahrzeugproduktion am Beispiel von Umfeldsensoren für das  
automatisierte Fahren

---

## **Dissertation**

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

von

**Marcel Otto**

Saarbrücken

2021

**Tag des Kolloquiums:** 07.12.2021

**Dekan:** Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jörn Walter

**Mitglieder des Prüfungsausschusses:**

**Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke

**1. Berichterstatter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

**2. Berichterstatter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper

**Akademischer Mitarbeiter:** Dr.-Ing. Paul Motzki

## Vorwort

*Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH (ZeMA) in Saarbrücken. Dort habe ich mich in der Arbeitsgruppe Technologie- und Prozessentwicklung überwiegend mit der Fahrzeug-Inbetriebnahme und Prüfprozessoptimierung beschäftigt.*

*Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, dem ehemaligen Leiter des ZeMA und Lehrstuhlinhabers für Montagesysteme an der Universität des Saarlandes, der nicht nur die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit übernommen, sondern mich auch im Hinblick auf meine fachliche, berufliche und persönliche Weiterentwicklung gefördert hat.*

*Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper von der Universität Luxemburg für die Übernahme des Zweitgutachtens, das inhaltliche Interesse und die eingebrachte fachliche Expertise. Ich danke ebenso meinem wissenschaftlichen Begleiter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke für seine Unterstützung während meiner Promotionszeit.*

*Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die dieser Arbeit zugrunde liegen, wurden innerhalb des vom europäischen Fond für regionale Entwicklung geförderten Forschungsprojekts AutoIBN umgesetzt. Für die gute Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch im Rahmen dieses Projekts sage ich insbesondere Prof. Dr.-Ing. Matthias Scholer, Dr.-Ing. Pascal Stoffels, Christian Siegwart und Benjamin Illmer herzlichen Dank. In diesen Dank schließe ich auch die Gruppe Montageverfahren und –automatisierung des ZeMA sowie Dr.-Ing. Leonie Mende, Anne Blum, Lennard Margies und Martin Karkowski für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, den intensiven Austausch und die freundschaftliche Atmosphäre mit ein. Auch meinen studentischen Mitarbeitern Michael Wocker, Matthias Kunz und Rami Kalso, die durch ihr Engagement und ihre Begeisterung für das Projekt diese Arbeit mit ermöglicht haben, schulde ich meinen Dank.*

*Des Weiteren danke ich den industriellen Forschungspartnern für die gute Zusammenarbeit und die gewonnen Erkenntnisse innerhalb der Forschungsprojekte, durch die ich sehr viel für die Erstellung dieser Arbeit lernen konnte. Besonders möchte ich mich bei dem Team Präventive Absicherung Prüfverfahren der Daimler AG unter der ehemaligen Leitung von Herrn Dr.-Ing. Rainer Mäckel für den stets fachlichen und freundschaftlichen Austausch bedanken.*

*Abschließend gilt ein ausdrücklicher Dank auch meiner Familie. Ohne meine Eltern und Großeltern, die mir die Ausbildung ermöglicht und mich immer uneingeschränkt unterstützt haben, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich danke meinem Großvater Manfred Dey für das intensive Korrekturlesen dieser Arbeit. Letztlich bedanke ich mich bei meiner Frau Jennifer und unserem Sohn Oskar, die mir stets den notwendigen Beistand gegeben haben, dieses Werk erfolgreich abzuschließen. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.*

*Die weltweite Nachfrage nach Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht überschreiten - allein schon aus Mangel an verfügbaren Chauffeuren.*

**Gottlieb Wilhelm Daimler**

## Kurzzusammenfassung

Bei Fahrerassistenzsystemen und dem zukünftigen autonomen Fahren kommen bei Inbetriebnahme der sicherheitskritischen mechatronischen Funktionen im Fahrzeug neue Anforderungen hinzu. Bedingt durch umfangreiche Arbeitsabläufe auf den entsprechenden Prüfständen stellt die Umfoldsensor-Inbetriebnahme am Bandende der Fahrzeugendmontage einen signifikanten Zeit- und Kostenfaktor dar. Daneben wird eine Produktionsabsicherung für die Inbetriebnahme der sicherheitsrelevanten und autonomen Fahrzeugsysteme unumgänglich sein, denn nur sichere Fahrzeuge dürfen die Produktion verlassen und sich im Straßenverkehr bewegen. Da in naher Zukunft Fahrerassistenzsysteme weiter zunehmen werden, ist es notwendig, eine effiziente Inbetriebnahmestrategie zu entwickeln, um Prüfstandsüberlastungen zu vermeiden, eine produktionsseitige Funktionsabsicherung der Fahrzeugsysteme sicherzustellen und die Prozesskosten niedrig zu halten.

In dieser Arbeit wird eine Lösungsstrategie entwickelt, um die geometrische Fahrachse des Fahrzeugs bereits in der Montagelinie zu ermitteln, da sie für die Inbetriebnahme eine maßgebliche Referenz bildet. Die Prozessvorverlagerung soll durch ein befähigtes Radadaptions-system in Verbindung mit einem entwickelten Targetmodul realisiert werden. Durch diese neuen Technologien können viele Inbetriebnahmeprozesse automatisiert in der Montagelinie ablaufen, die besonders bei autonomen und elektrifizierten Fahrzeugtechnologien Anwendung finden.



## **Abstract**

In the case of driver assistance systems and future autonomous driving, new requirements are being added to the end-of-line commissioning of the safety-critical mechatronic functions in the vehicle. Due to extensive workflows on the corresponding test benches, the commissioning of environment sensors at the end-of-line in the vehicle assembly represents a significant time and cost factor. In addition, hedging for the commissioning of the safety-relevant and autonomous driving vehicle systems will therefore be unavoidable, because only safe vehicles will be allowed to leave production and move in road traffic. Since the amount of driver assistance systems in vehicles will increase in the near future, it is necessary to develop an efficient commissioning strategy in order to avoid test bench overloads, to hedge functional safety of the vehicle systems properly in production and to minimize the process costs.

In this work, a solution strategy is developed to determine the geometric driving axle of the vehicle already in the assembly line, as it is a relevant reference for commissioning. The process shifting is to be realized by a qualified wheel adaptation system in combination with a developed target module. These new technologies therefore allows a lot of commissioning processes to be automated on the assembly line, which are particularly used for autonomous driving and electrified vehicle technologies.



# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>i</b>
<b>II</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>III</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
<b>IV</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xii</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung bei der Fahrzeuginbetriebnahme.....	3
1.2	Zielsetzung zur Effizienzsteigerung.....	6
1.3	Aufbau der Arbeit.....	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Fahrzeuginbetriebnahme und der bisherigen Forschung.....</b>	<b>10</b>
2.1	Systemkomponenten für Fahrerassistenzsysteme und autonome Fahrfunktionen.....	10
2.1.1	Übersicht der Erfassungstechnologien.....	10
2.1.2	Umfeldsensoren für autonome Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug.....	13
2.2	Geometrische Bezüge und Referenzen des Fahrwerks im Kraftfahrzeug.....	22
2.3	Eingliederung der Inbetriebnahme in die Fahrzeugproduktion.....	30
2.3.1	Strukturen und Prozesse der Inbetriebnahme.....	30
2.3.2	Prüftechnologien des End-of-Lines.....	35
2.3.3	Aktuelle Inbetriebnahmeprozesse am Beispiel der Umfeldsensorik.....	44
2.4	Aktuelle und zukünftige Anforderungen an das Bandende.....	49
2.5	Bisherige Ansätze zur Gestaltung eines effizienten Bandendes.....	56
2.5.1	Betriebsmittel und Konzepte für eine Inbetriebnahme in der Produktionslinie.....	56
2.5.2	Konzept eines Radadaptionssystems für ein effizientes Bandende.....	61
2.6	Ansatz des Radadaptionssystems in der Produktionsumgebung.....	64
2.6.1	Struktureller Aufbau des Prototyps.....	64
2.6.2	Konzept zur Vermessung der Fahrwerkgeometrien mittels Radadaption.....	67
<b>3</b>	<b>Anforderungen an ein System zur Inbetriebnahme und Prozessabsicherung.....</b>	<b>69</b>
3.1	Potenziale zur Effizienzsteigerung und Absicherung von Inbetriebnahmeprozessen.....	69
3.2	Vorgehensmodell und daraus abgeleiteter Forschungsansatz.....	74
<b>4</b>	<b>Technologie- und Prozessmodifikation anhand des Konzeptentwurfs.....</b>	<b>80</b>

---

4.1	Angestrebte Gesamtkonzeption für die Inbetriebnahme eines modernen Fahrzeugs.....	80
4.2	Weiterentwicklung der messtechnischen Struktur des bestehenden Radadaptionssystems.....	83
4.3	Modifikation des bestehenden Betriebsmittels für den Zielprozess.....	87
4.3.1	Dauerversuchsreihe mit dem prototypischen Radadaptionssystem.....	87
4.3.2	Modifizierung und Anpassung des Dehnungsgreifer-Systems.....	89
4.3.3	Modifikation der Schwimmeinheit und des Adaptionprozesses.....	93
4.4	Entwicklung einer Kalibriervorrichtung .....	95
4.5	Konzept zur Skalierbarkeit der eingesetzten Technologien .....	99
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines Messalgorithmus .....</b>	<b>106</b>
5.1	Konzept für ein räumlich mathematisches Modell .....	106
5.1.1	Anforderungen und Besonderheiten des Messsystems.....	106
5.1.2	Koordinatensysteme des Radadaptionssystems und deren Funktion.....	111
5.2	Mathematische Transformationsabfolge des Messsystems .....	115
5.2.1	Verfahren zur Rotationsermittlung.....	115
5.2.2	Transformations-Zusammenhänge der Anlagenkoordinatensysteme .....	120
5.2.3	Bestimmung einzelner Transformationen im System für eine Messung am Fahrzeug.....	124
5.3	Modell zur Kalibrierung des Messsystems .....	127
5.3.1	Herausforderungen für den Kalibrierprozess .....	128
5.3.2	Mathematisches Vorgehen bei der Kalibrierung des Systems .....	129
5.4	Bestimmung der Fahrwerkgeometrien aus der Messabfolge.....	132
5.4.1	Ablauf bei der Geometrienbestimmung aus den Messdaten.....	132
5.4.2	Ermittlung der Geometriedaten für ein Hinterachssystem.....	133
5.4.3	Ermittlung der Geometriedaten für ein Gesamtsystem .....	137
5.5	Erstellung des Messalgorithmus in einer Software .....	141
5.6	Validierung des Messprozesses.....	144
5.6.1	Vorgehensweise für die Validierung des Messprozesses .....	144
5.6.2	Testaufbau für die Validierung des Systems .....	148
5.6.3	Untersuchung der Umweltfaktoren und Auswirkungen auf die Anlagenparameter.....	150
5.6.4	Bewertung der Prüfmittelfähigkeit.....	152
5.6.5	Bewertung der Maschinenfähigkeit.....	153
5.6.6	Vergleich der Messgenauigkeit unter aktuellen Prüfmitteln.....	155
5.6.7	Fazit: Fähigkeiten des Radadaptionssystems.....	156
<b>6</b>	<b>Konzeptionelle Entwicklung eines Targetmoduls .....</b>	<b>159</b>

---

6.1	Anforderungen und möglicher Aufbau des Targets .....	159
6.2	Auslegung des Targetmoduls.....	161
6.3	Implementierung und mathematische Einbindung zusammen mit dem Radadaptionssystem .....	164
6.4	Alternatives Konzept zum Transfer der gemessenen Fahrwerkdaten.....	167
6.5	Erprobung am Beispiel einer Kalibrierung des Radarsensors.....	172
6.5.1	Versuchsaufbau und Ablauf .....	172
6.5.2	Auswertung und Ergebnisse der Versuchsmessungen.....	174
<b>7</b>	<b>Fähigkeiten des Gesamtsystems in der Produktion .....</b>	<b>177</b>
7.1	Gesamtaufbau des Prototyps in einer Modellfabrik .....	177
7.2	Resümee und Potenziale für zukünftige Inbetriebnahmen .....	178
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>179</b>
8.1	Zusammenfassung und Fazit .....	179
8.2	Ausblick .....	181
<b>V</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>182</b>
<b>VI</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>195</b>

## II Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
ACC	Activ Cruise Control
AI	Analog Input (Analoger Eingang)
AO	Analog Output (Analoger Ausgang)
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
CAD	Computer-aided design
CPU	Central Processing Unit
DI	Digital Input (Digitaler Eingang)
DO	Digital Output (Digitaler Ausgang)
DP	Profi-Bus-Verbindung
DPI	Dots per Inch
EHB	Elektrohängebahn
EOL	End-of-Line (Bandende)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FWS	Fahrwerkstand
GFA	Geometrische Fahrachse
HA	Hinterachse
HL	hinten links
HR	hinten rechts

---

IBN	Inbetriebnahme
IE	Industrielles Ethernet
IPC	Industriecomputer
ISO	International Standards Organization
K0-Lage	Konstruktionsnulllage
KC	Key Characteristic
KOS	Koordinatensystem
LED	Light-Emitting Diode
LIDAR	Laser Detection and Ranging
LRR	Long Range Radar
MRR	Mid Range Radar
MSA	Messsystemanalyse
OBD	On-Board-Diagnose
OEM	Original equipment manufacturer
PN	Profi-Net
POE	Power over Ethernet
PS	Prüfstand
PUR	Polyurethan
QM	Qualitätsmanagement
RADAR	Radio Detection and Ranging
RAE	Radadaptionseinheit
RAK	Radadaptionskopf

---

RAS	Radadaptionssystem
RS-485	Schnittstellen-Standard zur Datenübertragung
R <sub>x</sub>	X-Rotationsachse
R <sub>y</sub>	Y-Rotationsachse
R <sub>z</sub>	Z-Rotationsachse
SPS	Speicherprogrammierbare-Steuerung
SRR	Short Range Radar
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TOF	Time-of-Flight
TXT-File	Text-Datei
UDP	User Datagram Protocol
VA	Vorderachse
VL	vorne links
VR	vorne rechts
X	X-Achse
Y	Y-Achse
Z	Z-Achse
ZeMA	Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik
1°	1 Winkelgrad
1′	1 Winkelminute ( $\frac{1^\circ}{60 \text{ Minuten}}$ )

## III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Die 6 Stufen der Automatisierung zum autonomen Fahren .....	2
Abbildung 1.2: Sensorbedarf im Fahrzeug für die Stufen des autonomen Fahrens .....	4
Abbildung 1.3: Ausgangssituation und Zielsetzung der Arbeit .....	6
Abbildung 1.4: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	8
Abbildung 2.1: Einteilungsarten der Umfeldsensorik.....	11
Abbildung 2.2: Übersicht der Sensorerfassungsbereiche im Fahrzeug.....	12
Abbildung 2.3: Auswahlkonflikt bei Umfeldsensoren.....	13
Abbildung 2.4: Merkmalsbewertung eines Radarsensors .....	14
Abbildung 2.5: Merkmalsbewertung eines Stereokameramoduls.....	16
Abbildung 2.6: Merkmalsbewertung eines Ultraschall-Sensors.....	18
Abbildung 2.7: Merkmalsbewertung eines Lidar-Sensors .....	20
Abbildung 2.8: Fusion der Umfeldsensormerkmale .....	22
Abbildung 2.9: Aufbau der Fahrwerkkoordinatensysteme des Fahrzeugs.....	24
Abbildung 2.10: Schnittgeradenbildung für die Spur- und Sturzberechnung .....	25
Abbildung 2.11: Spurbwinkel und geometrische Bezüge des Fahrwerks .....	26
Abbildung 2.12: Sturzwinkel des Fahrwerks .....	28
Abbildung 2.13: Spur- und Sturzwinkel in Abhängigkeit vom Fahrzeughöhenstand.....	29
Abbildung 2.14: Bereiche eines Fahrzeugwerks .....	31
Abbildung 2.15: Aufgaben und Inhalte einer Inbetriebnahme.....	32
Abbildung 2.16: Übersicht einer Fahrzeug-Endmontage.....	33
Abbildung 2.17: Beispielhafte Gliederung einer Fahrzeuginbetriebnahme .....	34
Abbildung 2.18: Aufbau eines Fahrwerkgeometrieprüfstands .....	36
Abbildung 2.19: Messaufnehmerarten für die stationäre Fahrwerkvermessung im EOL .....	39

Abbildung 2.20: Beispielhafter Aufbau eines Fahrerassistenzsystemprüfstands.....	41
Abbildung 2.21: Beispielhafter Aufbau eines zukünftigen Fahrerassistenzsystemprüfstands um das Fahrzeug .....	43
Abbildung 2.22: Radumschlagmessung mit Laserlinientriangulationssensoren .....	45
Abbildung 2.23: Ausrichtung von Produkt und Betriebsmitteln bei der Kalibrierung auf dem Fahrerassistenzsystemprüfstand.....	46
Abbildung 2.24: Schema einer extrinsischen Frontkamera-Kalibrierung .....	48
Abbildung 2.25: Einfluss der Umfeldsensor-Kalibrierung auf die korrekte Kundenfunktion .....	49
Abbildung 2.26: Beispielhafte Toleranzkette für den produktseitigen Verbau eines Radarsensors.....	51
Abbildung 2.27: Betriebsmittelseitige Toleranzbeziehungen bei der Radarsensor- Kalibrierung.....	52
Abbildung 2.28: Beispielhafte produkt- und betriebsmittelseitige Toleranzkette für die Radarsensor-Kalibrierung .....	54
Abbildung 2.29: Ganzheitliches Einstell- und Prüfkonzept in der Montagelinie .....	57
Abbildung 2.30: Fahrwerkgeometrieprüfstand in der Montagelinie .....	58
Abbildung 2.31: Radnabengreifer-Technologien für die taktile Fahrwerkvermessung in der Montagelinie .....	59
Abbildung 2.32: Prototyp eines berührungslosen Fahrwerksmessverfahrens in der Montagelinie.....	60
Abbildung 2.33: Prototyp des Radadaptionssystems .....	62
Abbildung 2.34: Funktion des Dehnungsgreifers des Radadaptionsskopfs.....	63
Abbildung 2.35: Kinematischer Aufbau einer Radadaptionseinheit.....	66
Abbildung 2.36: Konzept zur Vermessung der Fahrzeughinterachse mit dem Radadaptionssystem.....	68
Abbildung 3.1: Kenngrößen für einen automobilen Inbetriebnahmeprozess .....	69
Abbildung 3.2: Sicherheitslevels Automotive Safety Integrity Levels (ASIL) nach ISO 26262.....	70

---

Abbildung 3.3: Potenziale zur Kostenreduzierung .....	73
Abbildung 3.4: V-Modell als Makrozyklus nach VDI 2206 .....	75
Abbildung 3.5: Abgeleitetes Vorgehen beim modellbasierten Systementwurf nach VDI 2206 / VDI 2221 .....	76
Abbildung 3.6: Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel .....	77
Abbildung 4.1: Zielbild der Gesamtkonzeption für EOL und Montagelinie.....	81
Abbildung 4.2: Benötigte Messtechnik für das prototypische Radadaptionssystem .....	83
Abbildung 4.3: Entwickelte steuerungs- und messtechnische Systemstruktur für das Radadaptionssystem.....	85
Abbildung 4.4: Auswertung der Streubreite des Dauerversuchs mit dem bestehenden Radadaptionssystem.....	88
Abbildung 4.5: PUR-Hülsen Abnutzung über den Dauerversuch .....	90
Abbildung 4.6: Modifizierung der Schwimmeinheit des Radadaptionssystems .....	94
Abbildung 4.7: Kalibriermöglichkeit für die Messtechnik des Radadaptionssystems .....	96
Abbildung 4.8: Skalierungsmöglichkeiten für den Systemaufbau.....	100
Abbildung 4.9: Aufbau für die Umfeldsensor-Inbetriebnahme in der getakteten Montagelinie.....	101
Abbildung 4.10: Aufbau für die Umfeldsensor-Inbetriebnahme in der Fließmontagelinie ....	102
Abbildung 4.11: Aufbau für eine komplette Fahrwerk- und Umfeldsensor- Inbetriebnahme in der Fließmontagelinie .....	103
Abbildung 4.12: Prozessablauf über Förderweg und Taktzeit für das fließende Gesamtsystem .....	104
Abbildung 5.1: Einmessung der Kinematiken der Radadaptionseinheiten .....	107
Abbildung 5.2: Belastungsversuch der Radadaptionseinheiten .....	109
Abbildung 5.3: Auswertung der Belastungsversuche mit den Radadaptionseinheiten .....	110
Abbildung 5.4: Koordinatensysteme des Radadaptionssystems.....	112
Abbildung 5.5: Zusammenhänge der primären Koordinatensysteme des Systems.....	114
Abbildung 5.6: Aufbau einer Transformationsmatrix .....	115

---

Abbildung 5.7: Roll $R_X(\gamma)$ , Pitch $R_Y(\beta)$ , Yaw $R_Z(\alpha)$ Drehwinkel .....	116
Abbildung 5.8: Drehung eines Vektors nach der Rodrigues-Formel.....	117
Abbildung 5.9: Gesamter Transformations-Baum für das Radadaptionssystem .....	121
Abbildung 5.10: Stationäre Einmessungen der Messtechnik zu den Anlagenkoordinatensystemen .....	122
Abbildung 5.11: Transformationsbestimmung zwischen TCP_ground und TCP_kin.....	125
Abbildung 5.12: Transformationsbestimmung zwischen TCP_kin und TCP_open .....	126
Abbildung 5.13: Stationäre Einmessungen der Kalibrierlehre zur Anlagenbasis .....	128
Abbildung 5.14: Transformationsbestimmung zwischen TCP_open und TCP_master.....	131
Abbildung 5.15: Bestimmung der Schnittgeraden und Winkel aus den Messebenen für eine Hinterachsvermessung .....	135
Abbildung 5.16: Bestimmung der Schnittgeraden und Winkel aus den Messebenen für eine Gesamtvermessung .....	139
Abbildung 5.17: Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse .....	140
Abbildung 5.18: Übersicht der Programmstruktur für die Berechnung .....	142
Abbildung 5.19: Visualisierung der Messdaten für die Hinterachse in Matlab .....	143
Abbildung 5.20: Vorgehensweise für die Bestimmung der jeweiligen Fähigkeitskenngrößen.....	147
Abbildung 5.21: Versuchsaufbauten für die Messsystemanalyse .....	149
Abbildung 5.22: Unterscheidung zwischen der Hinterachs- und Gesamtvermessung.....	150
Abbildung 5.23: Darstellung der Messergebniseinflüsse mittels Ishikawa-Diagramm .....	151
Abbildung 5.24: Übersicht der Fehlerkettenbewertung aus den Versuchsmessungen.....	157
Abbildung 6.1: Platzbedarf für Kalibrierbetriebsmittel in der Montagelinie.....	159
Abbildung 6.2: Mögliche Konzeptionen zur Auslegung des Tragetmoduls .....	160
Abbildung 6.3: Systementwurf des Targetmoduls in der Montagelinie .....	162
Abbildung 6.4: Relevante Koordinatensysteme für die Umfeldsensor-Inbetriebnahme .....	165
Abbildung 6.5: Bestimmung der Fahrachsrichtung durch die Quadranten .....	166

---

Abbildung 6.6: Übergabe der Fahrachse an ein Fahrzeugmerkmal in Takt 1.....	168
Abbildung 6.7: Auslesen der Fahrachse und Umfeldsensor-Kalibrierung in Takt 2.....	170
Abbildung 6.8: Versuchsaufbau zur Radarsensor-Inbetriebnahme in der Modellfabrik .....	173
Abbildung 6.9: Bestimmung der relevanten Daten aus dem Versuchsaufbau.....	175

## IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Klassifizierung der Automotive Safety Integrity Levels (ASIL) nach ISO 26262.....	71
Tabelle 3.2: Anforderungen an die neuen Betriebsmittel für das Gesamtkonzept.....	78
Tabelle 4.1: Positioniergenauigkeit der Kalibrierlehre zur Systembasis .....	99
Tabelle 5.1: Vergleich der Berechnungsarten für die Prüfmittelfähigkeit .....	145
Tabelle 5.2: Gesamtauswertung der Prüfmittelfähigkeitsbewertung.....	152
Tabelle 5.3: Gesamtauswertung der Maschinenfähigkeitsbewertung - BMW.....	153
Tabelle 5.4: Gesamtauswertung der Maschinenfähigkeitsbewertung - Daimler .....	154
Tabelle 5.5: Prüfmittelvergleich zur Messgenauigkeit .....	155
Tabelle 5.6: Gesamtauswertung der Fehlerkettenbewertung.....	158
Tabelle 6.1: Auswertung der Maschinenfähigkeitsbewertung zur Radarsensor- Inbetriebnahme .....	176

# 1 Einleitung

Die Automobilproduktion ist einer der wichtigsten und innovativsten Wirtschaftszweige in Deutschland [BAR16]. Seit der Erfindung des ersten Automobils im Jahre 1886 in Deutschland durch Carl Benz hat sich die Fahrzeugproduktion weltweit zum Massenmarkt entwickelt. Die deutschen Fahrzeughersteller und ihre Zuliefererfirmen spielten bei der Entwicklung der Automobilgeschichte eine wichtige Rolle und führen diese auch heute durch ständig neue technische Innovationen fort. [WEN11]

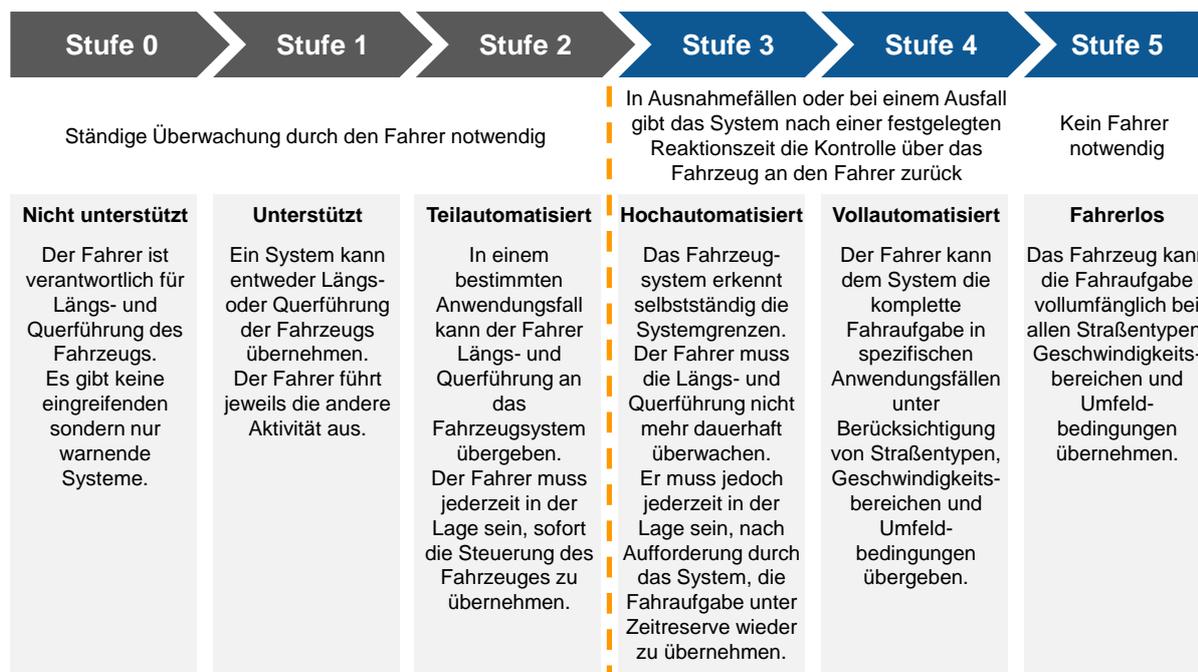
Die Kraftfahrzeuge von heute sind komplexe mechatronische Systeme. Zu den aktuellen Megatrends gehören unter anderem teilautomatisierte beziehungsweise fahrerlose Fahrzeuge. Auch elektrifizierte Fahrzeuggenerationen sind auf dem Vormarsch. Die Potenziale dieser neuen Technologien sind enorm und haben unter anderem positiven Einfluss auf die Gesellschaft, Verkehrssicherheit und den Wirtschaftsstandort Europa. Auch wenn sich laut Prognosestudie autonome Fahrzeuge erst ab dem Jahr 2040 durchsetzen sollten, ist es heute schon notwendig, durch innovative Produkte und intelligente Produktionsprozesse einen Wissensvorsprung zu erzielen. [ADA18] Dass diese Forschung und Entwicklung vorangetrieben wird, zeigen die fast 6000 Patentanmeldungen deutscher Automobilhersteller und Zulieferer, die seit dem Jahr 2010 eingereicht wurden. Auch bilden die Hersteller Kooperationen und Joint Ventures, um sich auf übergreifende Technologien vorzubereiten. [RUB17] Dabei ist es von großer Bedeutung, technologische und rechtliche Herausforderungen für die zukünftigen Assistenzfunktionen moderner Kraftfahrzeuge zu meistern. [BAR16]

Um automatisiertes Fahren in seiner höchsten Ausbaustufe zu ermöglichen, wird ein rechtlicher Rahmen benötigt, der die praktische Umsetzung neuer Technologien ermöglicht. Nur so kann Deutschland eine Vorreiterrolle bei der marktwirtschaftlichen Umsetzung erreichen. [VBW18] Dabei hat sich die Bundesregierung in Richtung Mobilität 4.0 die Ziele gesetzt, Leitanbieter und –markt zu werden, um dadurch automatisiertes und vernetztes Fahren auf die Straße zu bringen [BUN15].

Damit diese technologisch hoch entwickelten Fahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen können, wurde in Deutschland ein Gesetz verabschiedet. Dieses besagt, dass hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung zulässig sind. Daher dürfen, unter Voraussetzung der Systemüberwachung durch den Fahrzeugführer, automatisierte Fahrfunktionen auf der Autobahn zur Anwendung kommen. Daraus ergeben sich bezüglich der Haftungsfrage neue Bedingungen für den Fahrzeughersteller; denn wenn ein Fahrzeug in einem automatisierten Modus im Straßenverkehr unterwegs ist, liegt die Haftung beim Hersteller. [AUE17]

Daher wird es für den Fahrzeughersteller in naher Zukunft unumgänglich sein, nicht nur die Komplexität seiner Fahrzeuge zu beherrschen, sondern diese auch produktionstechnisch ab-

zusichern [EBN13]. Dafür werden unter anderem neue zukunftsweisende Produktionsprozesse und Betriebsmittel benötigt. Das ist einer der primären Ansätze, mit der sich diese Arbeit im Folgenden beschäftigt. Die Absicherung der automatisierten Fahrfunktionen betrifft zukünftig die Fahrzeuge der Automatisierungsstufen 3 bis 5. Die nachfolgende Abbildung 1.1 zeigt die 6 Stufen der Fahrzeugautomatisierung auf. Dabei unterscheidet man von nicht unterstützt, über unterstützt und automatisiert bis hin zum fahrerlosen Fahrzeug. Die Strichlinie symbolisiert dabei die aktuelle Schwelle von teil- zu hochautomatisiertem Fahren.



**Abbildung 1.1: Die 6 Stufen der Automatisierung zum autonomen Fahren [PAL16; VDA15]**

Die in Abbildung 1.1 festgelegten Automatisierungsgrade wurden auf nationaler und internationaler Ebene definiert. Dabei wurde je Stufe festgelegt, welche Aufgaben vom Fahrzeug und welche vom Fahrzeugführer übernommen werden. [VDA15] Stufe 0 stellt nach dieser Definition keinerlei Fahrzeugautomatisierung dar. Der Fahrer hat volle Kontrolle und ist für die Fahraufgabe des Fahrzeugs verantwortlich.

Auf dem Weg zum automatisierten Fahren wird bei Stufe 1 der Fahrer durch die bereits bekannten Fahrerassistenzsysteme unterstützt, die im Markt schon seit einigen Jahren vertreten sind. Dazu gehört beispielsweise der Abstandsregeltempomat (ACC), der im Jahr 2006 in Fahrzeugarchitekturen integriert wurde. Mit Hilfe eines Radar- (radio detection and ranging) Sensors kann das Assistenzsystem die Längsführung des Fahrzeugs durch Einhaltung des eingestellten Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug regeln. [PIS16, S. 1048f.]

Die Stufen 2 bis 4 beschreiben nach der Definition das automatisierte Fahren, wobei das teilautomatisierte Fahren der Stufe 2 bereits auf den Straßen beobachtet werden kann. Das Fahr-

zeug kann unter ständiger Beobachtung des Fahrers bereits Längs- und Querführungsaufgaben übernehmen. Solche Aufgaben werden zum Beispiel vom Abstandsregeltempomat und vom Spurhalteassistent übernommen. Dabei kann der Fahrer im Vergleich zur Stufe 1 zur gleichen Zeit sowohl den Fuß von den Pedalen und die Hände vom Lenkrad nehmen. Auch das hochautomatisierte Fahren der Stufe 3 findet seit kurzem Eingang in den Straßenverkehr, beispielsweise mit dem Stau- / Autobahnassistenten. Ab diesem Punkt ist das Fahrzeug bereits in der Lage, Fahrsituationen zu bewerten. Sollte das Fahrzeug auf nicht lösbare Situationen treffen, muss es dem Fahrer in einer angemessenen Zeit wieder die Kontrolle übergeben können. Ab Stufe 4, dem vollautomatisierten Fahren, muss das Fahrzeug Fahrsituationen eigenständig lösen können. Das soll unter vorgegebenen Randbedingungen ohne Eingreifen des Fahrers geschehen. Dabei muss das System des Fahrzeugs beispielsweise auch sämtliche Situationen im Stadtverkehr bewältigen können. [DRE17; HEI17]

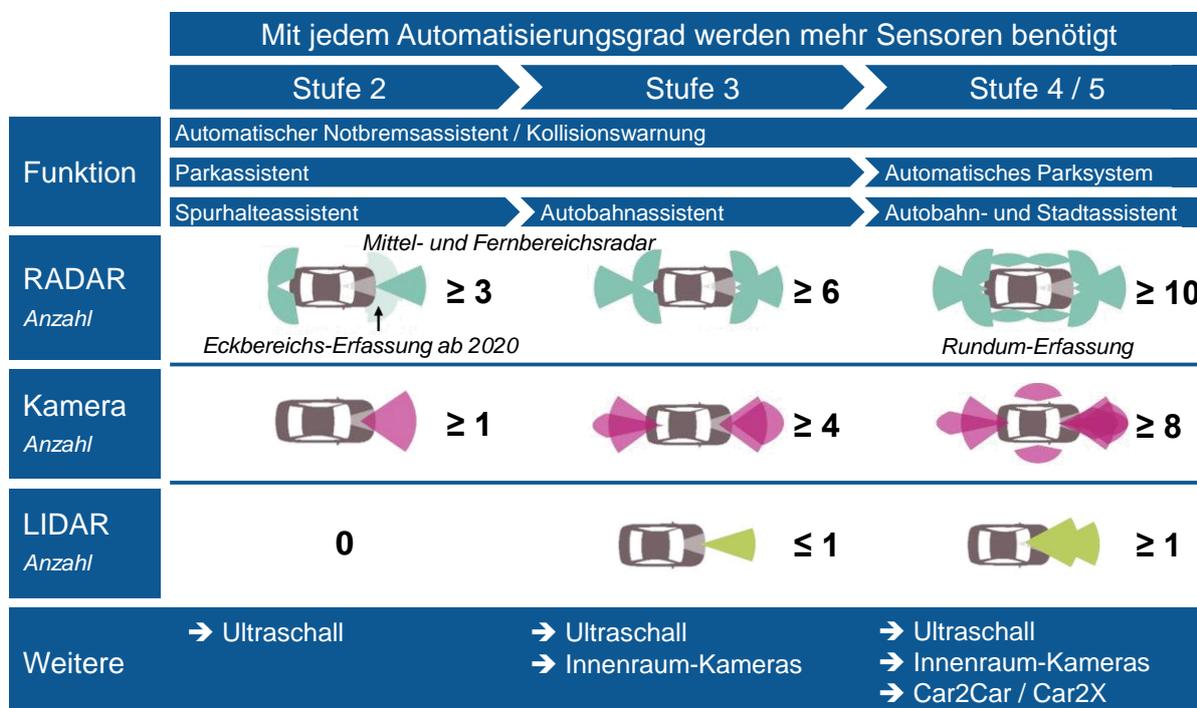
Autonomes beziehungsweise fahrerloses Fahren wird ab Stufe 5, der höchsten Automatisierungsstufe, Eingang finden. Dabei wird das Fahrzeug die vollständige Fahraufgabe unter allen äußeren Einflüssen vom Start bis zum Ziel übernehmen. [BUN15] Eine Überwachung des Systems oder die Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer ist somit nicht mehr möglich. Um die Stufe des fahrerlosen und auch schon des vollautomatisierten Fahrens beschreiten zu können, werden aus Produkt- und produktionstechnischer Sicht noch einige Hürden zu bewältigen sein. Unter anderem wird es zukünftig notwendig werden, die Fahrzeugsysteme abzusichern und die Produktion effizienter zu gestalten. Das soll in dieser Arbeit näher erläutert werden.

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung bei der Fahrzeuginbetriebnahme

Automatisiertes beziehungsweise autonomes Fahren ist auf dem Vormarsch und kommt bereits heute mit der Fahrzeugautomatisierungsstufe 2 und 3 im Straßenverkehr hinzu. Der Fahrer ist bei den aktuellen Systemen immer noch wesentlicher Bestandteil und unentbehrlich für die Systemüberwachung, auch wenn der Hersteller häufig sein Fahrzeug als „autonom“ anpreist [HEB20]. Das soll sich jedoch zukünftig ändern. Gegenwärtig werden bereits Konzepte erarbeitet, wie innerhalb urbaner Strukturen autonomes Fahren umsetzbar ist. Auch die Infrastruktur spielt dabei eine wichtige Rolle, sowohl für zukünftige automatisierte Fahrzeuge, als auch für neue Geschäftsmodelle wie beispielsweise „Robotaxis“ in der Stadt. [VOG19] Um das zukünftig realisieren zu können, werden die automatisierten Fahrfunktionen und Fahrzeugnetzungen massiv zunehmen. Daher ist die Rede von einem „Automotiv 4.0“ in den kommenden Jahren. [WIN15b]

Einer der wichtigsten Punkte für die Realisierung der aktuellen und der zukünftigen automatisierten Fahrfunktionen ist neben der Software die Umfelderkennung durch das Fahrzeug. Dazu

benutzen die Fahrfunktionen des Fahrzeugs Umfeldsensoren, die auf unterschiedlichen physikalischen Erfassungsarten basieren. Dabei kommen unter anderem Radar-, Videogebende-, Ultraschall- und Lidar- (light detection and ranging) Sensoren zum Einsatz. Diese Sensoren sind gewissermaßen die Augen des Fahrzeugs und müssen unter allen Umweltbedingungen Objekte beziehungsweise Hindernisse um das Fahrzeug zu einem geometrischen Bezug erfassen. [PAU14] Da jede Erfassungsart eines Umfeldsensors bei unterschiedlichen Umweltbedingungen abweichende qualitative Messwerte liefert, werden immer mehrere Sensoren verschiedener Messprinzipien in einem Fahrzeug benötigt. Vor allem bei hochautomatisierten und autonomen Fahrzeuggenerationen wird eine erhöhte Sensoranzahl vorzufinden sein. Wie in Abbildung 1.2 zu sehen ist, wird sich zukünftig die Umfeldsensoranzahl nahezu verdoppeln. Auch der Halbleiterbedarf in den Fahrzeugen wird aufgrund der Sensordatenfusion sowie der Ausfallsicherheit und der Redundanz weiter zunehmen. [SCH18; RIE19]



**Abbildung 1.2: Sensorbedarf im Fahrzeug für die Stufen des autonomen Fahrens [SCH18]**

Weiterhin werden sich Sensortechnologien wie Lidar in Hinblick auf das autonome Fahren in Fahrzeugen durchsetzen. Die meisten Fahrzeughersteller sind von dieser Technologie, in Kombination mit Radar- und Kamerasystemen, überzeugt, dass es sich dabei um die Zukunft der Umfelderkennung beim Fahrzeug handelt. [FLÖ20]

Damit die Umfeldsensoren im Fahrzeug überhaupt einen plausiblen Messwert liefern können, ist nach der Montage eine Inbetriebnahme der Sensoren notwendig. Dazu werden sie zu einem geometrischen Bezug des Fahrzeugs kalibriert. Diesen geometrischen Bezug bildet die sogenannte geometrische Fahrachse des Fahrzeugs, die sich durch die Spurwerte an der Fahrzeughinterachse bildet. Die Kalibrierung der Sensoren zu dieser geometrischen Referenz

muss im Bereich von wenigen Winkelminuten erfolgen, um die korrekte Funktion der Umfeldsensoren im Kundenbetrieb sicherzustellen. Diese Kalibrierung, die Bestandteil der Fahrzeuginbetriebnahme ist, findet aktuell im sogenannten End-of-Line (EOL) beim Fahrzeughersteller (OEM) statt.

Nach dem Sensorenverbau innerhalb der Montagelinie wird das Fahrzeug auf seinen eigenen vier Rädern in das EOL verbracht. Dort existiert eine große Anzahl von Prüf- und Einstellständen für die Inbetriebnahme (IBN) der Fahrzeugfunktionen und die dazugehörigen Systeme. Ein Prüfstand ist der Fahrwerkgeometrie Prüf- und Einstellstand, auf dem das Fahrwerk des Fahrzeugs vermessen und eingestellt wird. Anschließend wird daraus die geometrische Fahrachse ermittelt und auf demselben oder einem nachgelagerten Prüfstand ein Kalibriernormal zur ermittelten Fahrachse hochgenau ausgerichtet. Daran kann anschließend der entsprechende Umfeldsensor kalibriert werden.

Im Gegensatz zur Montagelinie existiert im EOL kein fließender und automatisierter Fahrzeugtransport. Die Fahrzeuge werden von Werkern von Prüfstand zu Prüfstand gefahren. Durch die hohen Rüst- und Prozesszeiten auf den Prüfständen, werden diese mehrmals benötigt, da sonst der Liniengrundtakt der Produktionslinie nicht einzuhalten wäre. Daher ergeben sich mehrere parallele Linienstrukturen innerhalb des EOLs. [SCH19]

Daraus werden die folgenden Problemstellungen für die zukünftige Fahrzeugproduktion ersichtlich. Insbesondere der immer größere Anteil an Assistenzsystemen stellt die Inbetriebnahme des Gesamtsystems in der Produktion vor große Herausforderungen. Zum einen werden wegen der hohen Prozesszeiten auf den Prüfständen im EOL die Prüfstände und das zugehörige Personal mehrmals benötigt. Das bedeutet für den OEM enorme Investitions- und Betriebskosten. Da sich zukünftig die in Betrieb zu nehmende Anzahl an Umfeldsensoren im Fahrzeug nahezu verdoppeln wird, wird es zu Prüfstandsüberlastungen kommen. Das führt dazu, dass wiederum Prüfstände in weiteren parallelen Linienstrukturen angeschafft werden müssten, was zu großer Ineffizienz innerhalb dieses EOL Bereichs beiträgt.

Zum anderen werden zukünftige Absicherungen innerhalb der Produktion notwendig werden [EBN13]. Beim Beschreiten der automatisierten und autonomen Fahrzeuggenerationen, wird kein Fahrer das System mehr überwachen, was ein absolut funktionsfähiges System ab Kilometer Null erforderlich macht. Das bedeutet, dass diese Systemüberwachung durch den OEM beim Verlassen der Produktion erfolgen muss. [ZEN15] Das wird sowohl produkt- als auch produktionsseitig erfolgen müssen. Bei der produktionsseitigen Betrachtung muss demnach überprüft werden, ob die Inbetriebnahme der Sensoren und die damit verbundenen Fahrfunktionen im Fahrzeug erfolgreich waren. Das wird im aktuellen EOL nicht betrachtet, da lediglich eine Kalibrierung auf einem Prüfstand stattfindet, aber keine Prüfung auf einem weiteren, ob die Inbetriebnahme qualitativ erfolgreich war.

Da solche Absicherungsmaßnahmen bislang nicht durchgeführt werden, kann man immer wieder Unfälle mit teilautomatisierten Fahrzeugen beobachten [ING18]. Dem Kunden wird durch

das Assistenzsystem immer das „autonome Fahrgefühl“ vermittelt. Dabei wird jedoch vergessen, dass es sich aktuell lediglich um teilautomatisierte Fahrzeuge handelt, die eine ständige Überwachung durch den Fahrer voraussetzen [HEB20; AUT18]. Um zukünftig solche Unfälle im Straßenverkehr zu vermeiden, muss das Fahrzeug beim Verlassen der Produktion in einem in Betrieb genommenen und qualitativ überprüften „in Ordnung“ Zustand an den Kunden übergeben werden.

Wegen dieser Problematik wird im nächsten Kapitel eine Zielsetzung zur Lösung dieser Situation innerhalb der Fahrzeugproduktion dargestellt. Dabei soll sowohl eine Absicherung für zukünftige automatisierte Fahrzeugsysteme als auch eine allgemeine Effizienzsteigerung des EOLs durch neue Prozesse und Betriebsmittel aufgezeigt werden.

## 1.2 Zielsetzung zur Effizienzsteigerung

Zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen, wie auch zur Effizienzsteigerung des aktuellen und des zukünftigen EOLs, müssen die dort verorteten Prozesse analysiert werden. Demnach können Prozesse verlagert oder eliminiert werden, um so auf die beiden beschriebenen Kernprobleme aus Kapitel 1.1 eine Lösung zu finden. In Abbildung 1.3 ist die aktuelle Ausgangssituation und die dazugehörige Zielsetzung aufgezeigt. Im oberen Teil der Abbildung 1.3 ist der Status Quo dargestellt, wie er zuvor beschrieben wurde. Dabei ist zu sehen, dass das Fahrzeug innerhalb der Montagelinie durch eine Fördertechnik von einer Montagestation zur nächsten transportiert und dabei komplettiert wird. Anschließend wird das Fahrzeug am Bandende auf seine eigenen vier Rädern abgesetzt und von einem Werker auf die Prüfstände des EOLs gefahren. Dort erfolgen unter anderem die Fahrwerkeinstellung und die Kalibrierung der Umfoldsensoren.

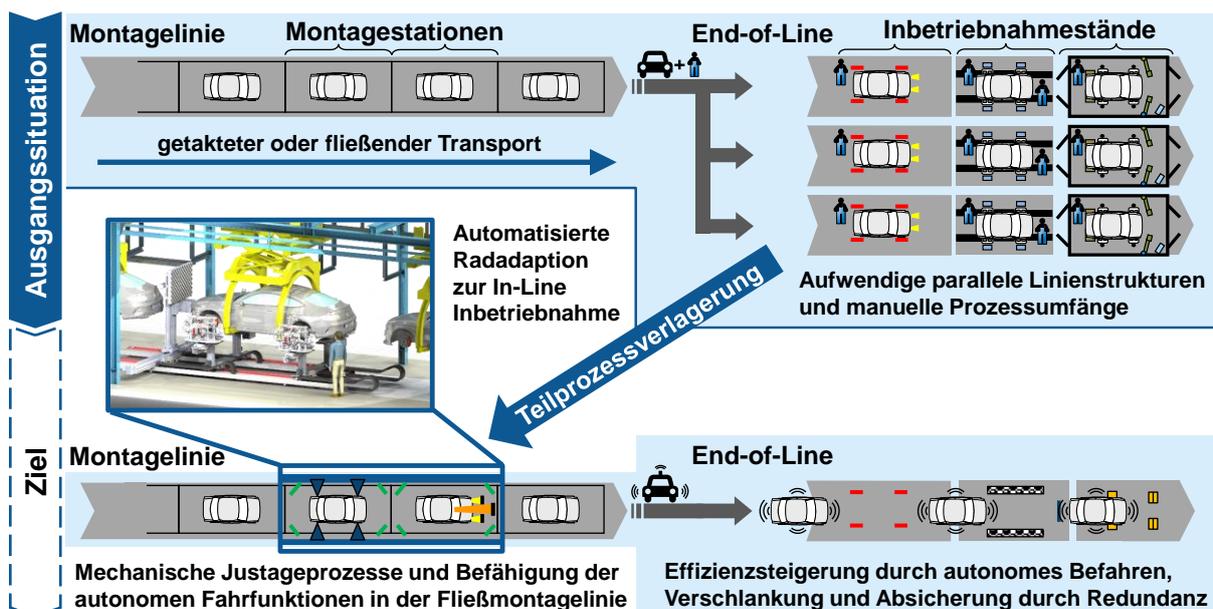


Abbildung 1.3: Ausgangssituation und Zielsetzung der Arbeit

Wie bereits zuvor beschrieben, kann man in Abbildung 1.3 die parallelen Linienstrukturen, die große Anzahl an Prüfständen und an Werkern des EOLs erkennen. Sie sind bedingt durch eine Vielzahl manueller Prozessumfänge, die aber zukünftig noch weiter zunehmen werden. Um dieser Situation entgegenzuwirken, soll innerhalb der Montagelinie durch eine neue Prozessstation in Kombination mit einer neu entwickelten Betriebsmitteltechnologie Abhilfe geschaffen werden. Durch Einbettung dieser neuen Technologie sollen Teile der Inbetriebnahmeprozesse aus dem EOL in die Hauptmontagelinie vorverlagert werden. Dadurch sollen sich drei neue Teilziele für das EOL ergeben, was zu einer Effizienzsteigerung der dort verorteten Inbetriebnahme beiträgt:

- Verschlinkung des EOL in Richtung einer Einlinigkeit durch Vorverlagerung der Inbetriebnahmeprozesse in die automatisierte Montagelinie.
- Absicherung der sicherheitsrelevanten Fahrfunktionen des Fahrzeugs durch redundante Inbetriebnahme in der Montagelinie und qualitative Überprüfung innerhalb des bestehenden EOLs.
- Werkerloses EOL wird ermöglicht durch autonom fahrende Fahrzeuge, die bereits in der Montagelinie dazu in Betrieb genommen und somit vorbefähigt worden sind.

Dadurch ergibt sich für das EOL eine neue Zieldarstellung, die in Abbildung 1.3 unten aufgezeigt ist. Das EOL wird bei Erreichen dieser Teilziele nur noch zu Validierungs- und Nacharbeitsaufgaben benötigt. Bei einer reinen Produktion automatisierter Fahrzeuge besteht die Möglichkeit, das Fahrzeug eigenständig durch diese Validierungsphase zu führen. Durch dieses Gesamtziel im EOL ergeben sich für den OEM enorme Einsparpotenziale, um am Hochlohnstandort Deutschland bestehen zu können. Darüber hinaus entstehen durch qualitativ hochwertige Produkte Vorteile im Kundenwettbewerb.

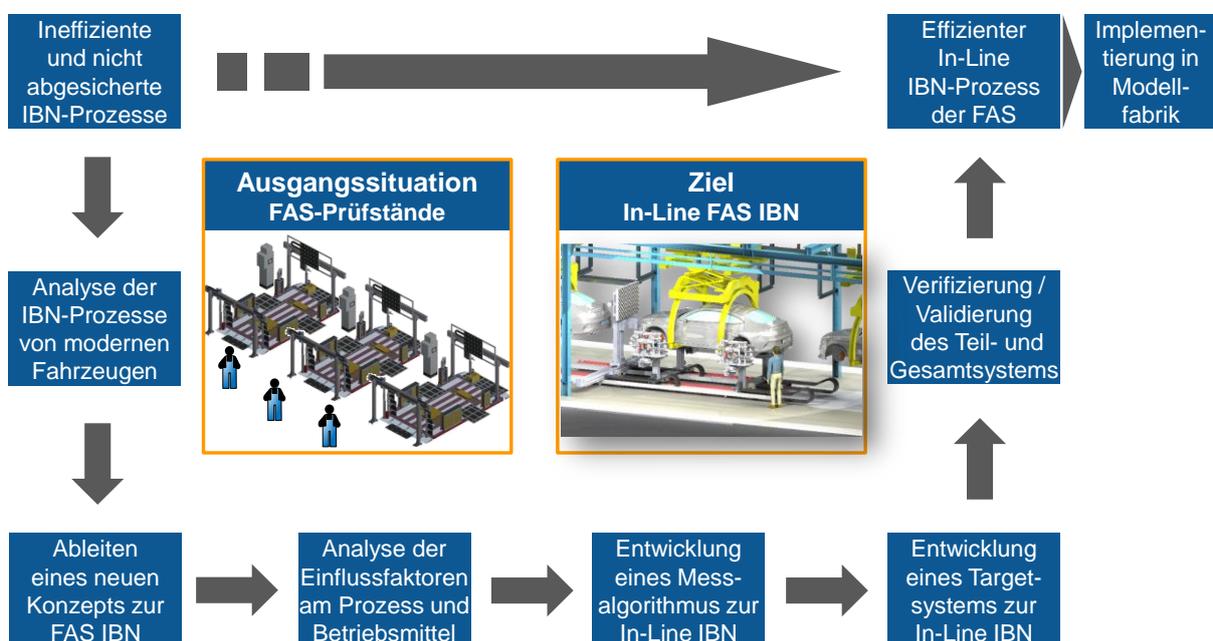
Diese Teilziele des EOL werden durch das Primärziel der In-Line Inbetriebnahme mittels eines neuen Betriebsmittels ermöglicht. Ziel dieser Arbeit ist daher die Prozessauslegung, Entwicklung und Untersuchung des Betriebsmittels, das speziell bei der Inbetriebnahme von automatisierten Fahrzeugen Anwendung findet. Dabei sollen durch eine neuartige Radadaptationseinheit (RAE) Fahrwerkeinstell- sowie Umfeldsensorkalibrierprozesse in der Montagelinie durchgeführt werden. Die Herausforderung besteht darin, die gleichen Systemeigenschaften wie auf aktuellen Prüfständen des EOLs zu erzielen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Um die zuvor genannten Ziele umsetzen zu können, werden innerhalb dieser Forschungsarbeit folgende Vorgehen geplant. Es wird ein Lösungsansatz entwickelt, um die Fahrwerkgeometriedaten in der Montagelinie zu ermitteln und einzustellen, da sie für die Inbetriebnahme der Umfeldsensorik maßgeblich sind. Der Prozess soll durch ein Radadaptationssystem vollautomatisch durchgeführt werden. Übergeordnetes Ziel soll es dabei sein, einen effizienten

In-Line Inbetriebnahmeprozess der Assistenz- und Fahrfunktionen moderner Fahrzeuge abzubilden. Dieser soll später in der Fabrik bei einem OEM integrierbar sein.

Die Abbildung 1.4 zeigt die Ausgangssituation und die Teilschritte zum Ziel. Als erster Teilschritt müssen dabei die aktuellen Inbetriebnahmeprozesse analysiert werden, zur Identifizierung, welche Prozesse relevant sind. Dabei ist es auch bedeutsam zu untersuchen, welche Randbedingungen beispielsweise bei einer Vorverlagerung des Prozesses in die Hauptmontagelinie zu beachten sind. Anhand dieser Untersuchung soll ein neues Gesamtkonzept abgeleitet werden. Es soll detailliert darstellen, wie der spätere Gesamtaufbau und die Verortung der neuen Prozesse und Betriebsmittel aussehen. Bevor die Entwicklung des Betriebsmittels beginnt, sollen Einflussfaktoren anhand des Inbetriebnahmeprozesses identifiziert werden. So können im Folgenden wichtige Prozessmerkmale berücksichtigt werden.



**Abbildung 1.4: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Nach Ermittlung der theoretischen Faktoren soll ein prototypisches System befähigt werden, den Fahrwerkvermessungsprozess in der Montagelinie durchzuführen. Dafür muss ein Messalgorithmus entwickelt werden, der in Kombination mit dem Prototyp verifiziert werden kann. Nach erfolgreicher Vermessung der Fahrwerkgeometriedaten soll ein Targetmodul entwickelt werden, um eine Kalibrierung im Systemverbund an einem Umfeldsensor vornehmen zu können. Dieses Gesamtsystem wird abschließend verifiziert und in einer Modellfabrik unter realen Produktionsbedingungen mit Fahrzeugen validiert.

Um die relevanten Merkmale des Produkts, der Prüfprozesse und der Betriebsmittel zu verstehen, wird umfangreiches Wissen in den Bereichen Assistenzsysteme und deren Umfeldsensoren, Fahrwerkgeometrien, Fahrzeuginbetriebnahme, aktuelle Prüftechnologien sowie

bisherige Forschungsansätze und Konzepte zur Optimierung benötigt. Auch bereits bestehende Betriebsmittel werden vorgestellt, um den Zusammenhang zum Gesamtprozess zu erkennen. Die Grundlagen dazu werden in Kapitel 2 vermittelt.

In Kapitel 3 werden die Anforderungen an die Inbetriebnahme der Umfeldsensoren diskutiert. Dadurch sollen die Potenziale für die Absicherung und die Effizienzsteigerung des EOLs herausgestellt werden. Unter anderem werden dabei die Einsparpotenziale und die benötigte Absicherung der Systeme bei einem hochautomatisierten Fahrzeug aufgezeigt. Anhand dieser Erkenntnisse wird ein Vorgehensmodell für die Neuentwicklungen erstellt und die Forschungsfragen abgeleitet.

In Kapitel 4 wird die Entwicklung des Gesamtkonzepts erarbeitet. Dabei werden die verfügbaren Technologien für den Gesamtprozess aufgezeigt und für eine Skalierung eingeteilt. Da ein bestehendes Betriebsmittel genutzt wird, muss es für den Prozess modifiziert werden. Die Systemänderungen werden innerhalb dieses Kapitels dargestellt. Auch die benötigten Teilsysteme für den Gesamtprozess werden aufgezeigt.

Kern des Kapitels 5 ist die Entwicklung der mathematischen Beschreibung des bestehenden Betriebsmittels in einem Messalgorithmus. Durch diesen mathematischen Ablauf sollen in Kombination mit den Betriebsmitteln die Fahrwerkparameter der Fahrzeugachsen bestimmt werden. Dazu muss ein räumliches Modell erstellt werden, das die kinematische Einrichtung des Radadaptionssystems (RAS), welches als Betriebsmittel eingesetzt wird, beschreibt. Dieser Messablauf soll auf dem RAS implementiert werden, um so unter prototypischen Bedingungen das Gesamtsystem validieren zu können. Parallel zur Validierung wird dabei eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung durchgeführt.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 6 ein Targetsystem entwickelt. Dieses System soll zusammen mit dem RAS, das in vorherigem Kapitel befähigt worden ist, die Sensorinbetriebnahme vornehmen. Dabei wird das System sowohl konzeptionell entworfen, als auch eine mathematische Einbindung in das Gesamtsystem beschrieben. Zudem werden alternative Konzepte zur Nutzung eines Kalibriernormals aufgezeigt. Auch für das Teilsystem erfolgen abschließend die Verifizierung und Validierung innerhalb des Gesamtsystems.

In Kapitel 7 werden die Fähigkeiten des Gesamtsystems herausgestellt. Dabei wird der prototypische Aufbau in einer Testfabrik beschrieben und zukünftige Verbesserungen für den aktuellen Prozess sowie Betriebsmittel dargestellt. Auch zusätzlich mögliche Inbetriebnahmeszenarien werden aufgezeigt. Am Ende des Kapitels wird ein Resümee gezogen.

In der abschließenden Zusammenfassung des Kapitels 8 werden die Ergebnisse dieser Arbeit reflektiert und darüber hinaus ein Ausblick bezüglich zukünftiger Inbetriebnahmeprozesse gegeben. Dabei werden neue intelligente Prozesse aufgezeigt, die zur Entlastung und Effizienzsteigerung des EOLs maßgeblich beitragen.

## 2 Grundlagen der Fahrzeuginbetriebnahme und der bisherigen Forschung

In diesem Grundlagenkapitel wird zu Beginn eine Übersicht zur aktuell verbauten und zukünftigen Umfeldsensorik im Fahrzeug gegeben. Anschließend werden die wichtigsten Sensortechnologien einzeln vorgestellt und nach ihren Merkmalen klassifiziert. Darauf aufbauend werden die geometrischen Eigenschaften eines Fahrwerks dargestellt. Auch die Koordinatensysteme und deren geometrische Referenzen für die spätere Inbetriebnahme werden aufgezeigt. Daran anschließend wird die Fahrzeugproduktion und der darin enthaltene Montage- und Inbetriebnahmebereich beschrieben. Dabei werden auch die aktuellen Prüfstände, die aktuell für die Umfeldsensorinbetriebnahme relevant sind, diskutiert. Des Weiteren werden die Inbetriebnahmeprozesse an einem Beispiel erläutert.

Nach Einführung zu den aktuellen Produkten, Prozessen und den dazu benötigten Betriebsmitteln werden die aktuellen sowie zukünftigen Anforderungen an das EOL herausgestellt. Auch bisherige Konzepte aus der Forschung zur Gestaltung effizienter EOLs werden aufgezeigt. Abschließend wird ein bestehendes Betriebsmittel vorgestellt, das in Folge der Arbeit modifiziert und für die Produktion nutzbar gemacht werden soll. Aufbauend auf diesem Stand der Technik wird diese Arbeit neue Betriebsmittel entwickeln, die zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme und Absicherung der Fahrzeugsysteme beitragen.

### 2.1 Systemkomponenten für Fahrerassistenzsysteme und autonome Fahrfunktionen

#### 2.1.1 Übersicht der Erfassungstechnologien

Um Fahrzeuge teil- beziehungsweise hochautomatisiert in den Straßenverkehr zu bringen, ist es zwingend erforderlich, das Umfeld des Fahrzeugs wahrzunehmen. Aktuell wird das Umfeld durch den Fahrer festgestellt, der daraufhin das Fahrzeug angemessen im Verkehr bewegt. Da das heute schon assistiert wird und zukünftig durch das Fahrzeug allein geschieht, ist es wichtig auf physikalische Messgrößen zurückzugreifen, um die Fahrzeugumwelt wahrnehmen zu können.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Einteilung der Umfeldsensoren gemäß den physikalischen Prinzipien. Dabei wird unterschieden zwischen elektromagnetischen, optischen und akustischen Sensormessverfahren. Unerheblich welches Messprinzip bei einem Umfeldsensor zum Einsatz kommt, ist es seine Aufgabe, ein Hindernis im Umfeld des Fahrzeugs zu erkennen. Idealerweise liefert ein Umfeldsensor von einem erfassten Objekt immer folgende Informationen an das Steuergerät der zugehörigen Fahrfunktion: [PAU14]

- Ort des Objekts innerhalb des Sensorkoordinatensystems mit den Koordinaten X, Y, Z oder eine Distanz zusammen mit einem Winkel zu der Sensorachse
- Abmessungen des Objekts
- Geschwindigkeit des Objekts in Längs- und Querrichtung oder eine Relativgeschwindigkeit des Objekts zum Sensor

Durch immer häufigere Mehrfachnutzung der Sensorinformationen innerhalb eines Fahrzeugs werden sich zukünftig auch Verschiebungen der Sicherheitsanforderungen ergeben. Nutzt zum Beispiel eine sicherheitsrelevante Bremsfunktion und Distanzhaltfunktion die Information der Relativgeschwindigkeit eines Radarsensors, dann steigt der Sicherheitsanspruch. Diese werden innerhalb der Sicherheitsnorm ISO 26262 für Kraftfahrzeuge geregelt [ISO18]. Durch die neuen Anforderungen müssen Sensorsignalverarbeitungen innerhalb der Sensoren redundant ausgelegt oder durch einen weiteren physikalischen Sensor aus Abbildung 2.1 abgesichert werden. [WIN15a]

Alle in Abbildung 2.1 dargestellten Sensortechnologien unterliegen der autonomen Fremdortung und können Hindernisse ohne externe Hilfe erkennen. Zukünftig rückt jedoch die kooperative Fremdortung durch die Car-2-X Kommunikation in den Vordergrund. Dabei sollen sich Hindernisse aktiv beim Fahrzeug melden. Dieses elektromagnetische Prinzip der Fahrzeugkommunikation / -ortung ist in Abbildung 2.1 ausgegraut dargestellt, da es erst in ferner Zukunft zu erwarten ist. [PAU14]

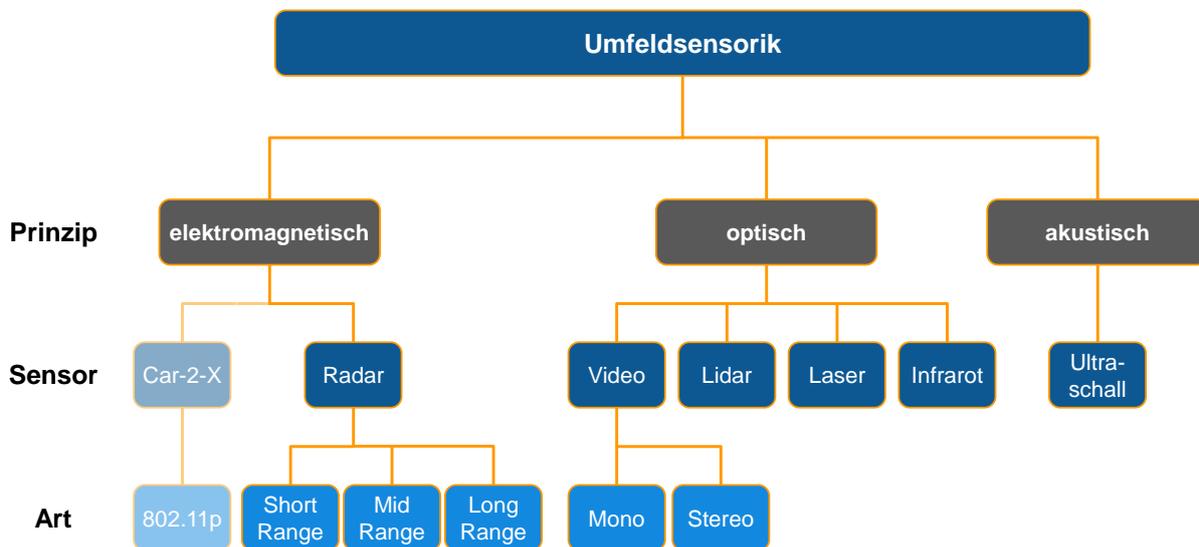
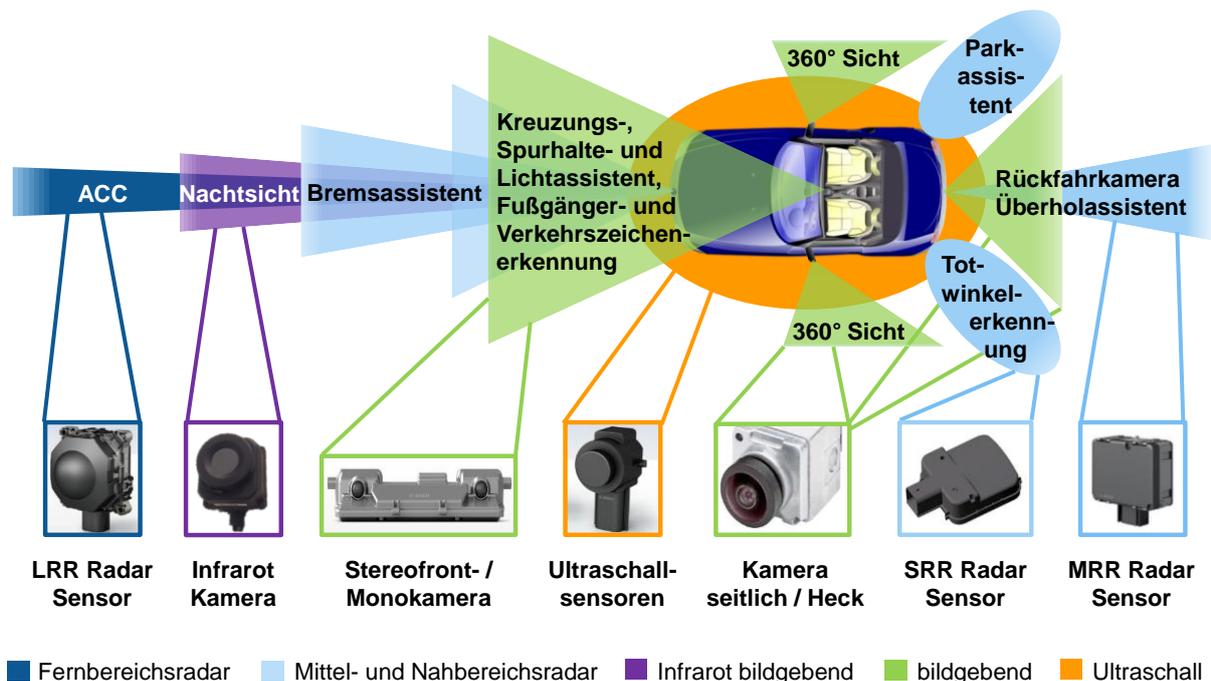


Abbildung 2.1: Einteilungsarten der Umfeldsensorik [PAU14]

Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, gehört das Radar zu den bekanntesten elektromagnetischen Umfeldsensoren. Es wird überwiegend benötigt, um Objekte in großen Distanzen zu erkennen. Dabei kommt es vor allem beim Abstandsregeltempomaten zum Einsatz, der eine eingestellte Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält. Aktuell macht man sich dieses System auch für im Stau fahren auf Autobahnen, in Kombination mit weiteren Systemen nutzbar. Aktuelle Fernbereichsradarsensoren (LRR) erfassen Objekte in einem Abstand bis zu

250 Metern vor dem Fahrzeug [ROB14]. Zukünftige Generationen sollen durch eine Laserradartechnologie Objekte in einer Entfernung bis zu 500 Metern erkennen [FLÖ20]. Auch weitere Arten des Radarsensors für eine Kurz- oder Mittelstreckenerfassung (SRR oder MRR) sind heute auf dem Markt und werden unter anderem für die Totwinkelerkennung und den Überholassistent im Heck des Fahrzeugs genutzt. Je nach benötigter Funktion kann diese Sensorart Objekte zwischen 0,36 und 160 Metern um das Fahrzeug erfassen [ROB17a]. Die aktuellen Erfassungsbereiche durch Radarsensoren im Fahrzeug sind in der Abbildung 2.2 blau dargestellt.



**Abbildung 2.2: Übersicht der Sensorerfassungsbereiche im Fahrzeug [MEN18; ROB13; ROB14; ROB17a; ROB18]**

Neben den SRR Sensoren kommen auch akustische Sensoren im Nahbereich zum Einsatz. Ultraschallsensoren eignen sich im Fahrzeug ausschließlich zur Nahbereichsüberwachung. Dieser Bereich ist in Abbildung 2.2 orange dargestellt. Dabei spricht man von einem virtuellen Sicherheitsgürtel um das Fahrzeug von bis zu ca. 5 Metern. Durch die Objekterkennung in diesem Nahbereich um das Fahrzeug werden vor allem Parkfunktionen realisiert. [REI10, S. 130] Auch sicherheitsrelevante Funktionen, wie das Wiederanfahren des Fahrzeugs nach einem vollständigen Stillstand, benötigen zukünftig diese Nahbereichsüberwachung. Dabei gilt es zu prüfen, ob sich Personen im direkten Umfeld des Fahrzeugs aufhalten, damit beispielsweise ein Wiederanfahren verhindert werden kann.

Unter den optischen Umfeldsensoren finden bisher primär die bildgebenden Systeme Anwendung. Kamerasysteme werden im Fahrzeug gerne zur Objekterkennung im Nah- und Mittelbereich genutzt und bieten einen hohen Informationsgehalt. Dabei unterscheidet man zwischen Mono- und Stereokamerasystemen, die je nach Assistenzfunktion im Fahrzeug Anwendung finden. Immer häufiger findet man eine Kamera hinter der Frontscheibe des Fahrzeugs.

Sie erkennt im Umfeld Objekte für den Spurhalteassistenten oder das Notbremssystem im Stadtverkehr. Dabei können abhängig von verbauten Objektiven und der Auflösung der Kamera Überwachungsbereiche von bis zu ca. 50 Metern vor dem Fahrzeug verwirklicht werden. Des Weiteren sind Kamerasysteme in Front, Heck und seitlich des Fahrzeugs zur Realisierung von passiven informationsgebenden oder aktiven Parksyste men, wie der Rückfahrkamera oder die 360 Grad Rundumsicht, verbaut. Die Kameraerfassungsbereiche sind in Abbildung 2.2 grün dargestellt. [REI10; ROB13]

Zukünftig wird auch die Lidar-Technologie unter den optischen Umfeldsensoren Eingang finden. Diese auf Infrarotlaserstrahl basierenden Systeme sollen speziell im Front- und Eckbereich des Fahrzeugs Objekte erfassen. Dabei können sie Hindernisse in einer Entfernung bis zu 180 Metern orten. Um den Informationsgehalt zu erhöhen und für zukünftige autonome Fahrzeugsysteme redundant arbeiten zu können, werden Lidar-Sensoren im Fahrzeug unverzichtbar sein [OSR19]. Diese haben sich jedoch bislang aufgrund der hohen Komponentenkosten noch nicht durchgesetzt und kommen aktuell nur in wenigen Fahrzeugen zum Einsatz. Aus diesem Grund arbeiten aktuell Komponentenzulieferer daran, diese Technik bezahlbar anbieten zu können. [FLÖ20; WIN15a]

### 2.1.2 Umfeldsensoren für autonome Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug

Jeder einzelne Umfeldsensor im Fahrzeug trägt zur Erfüllung der Funktionen von Fahrerassistenzsystemen bei. Da die Kosten für diese Assistenzfunktionen jedoch gering bleiben müssen, um Marktakzeptanz zu erreichen, muss die Anzahl der Sensoren und deren Kosten auf das Notwendigste reduziert werden. Daher entstehen für den OEM allgemeine und technische Auswahlkriterien für die gesuchte Funktion. [WIN15a]

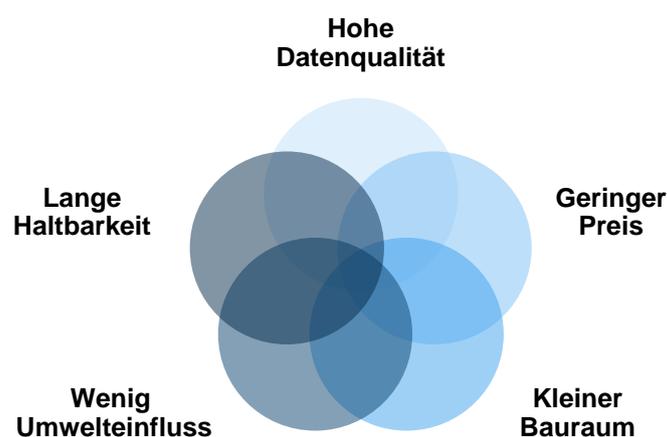
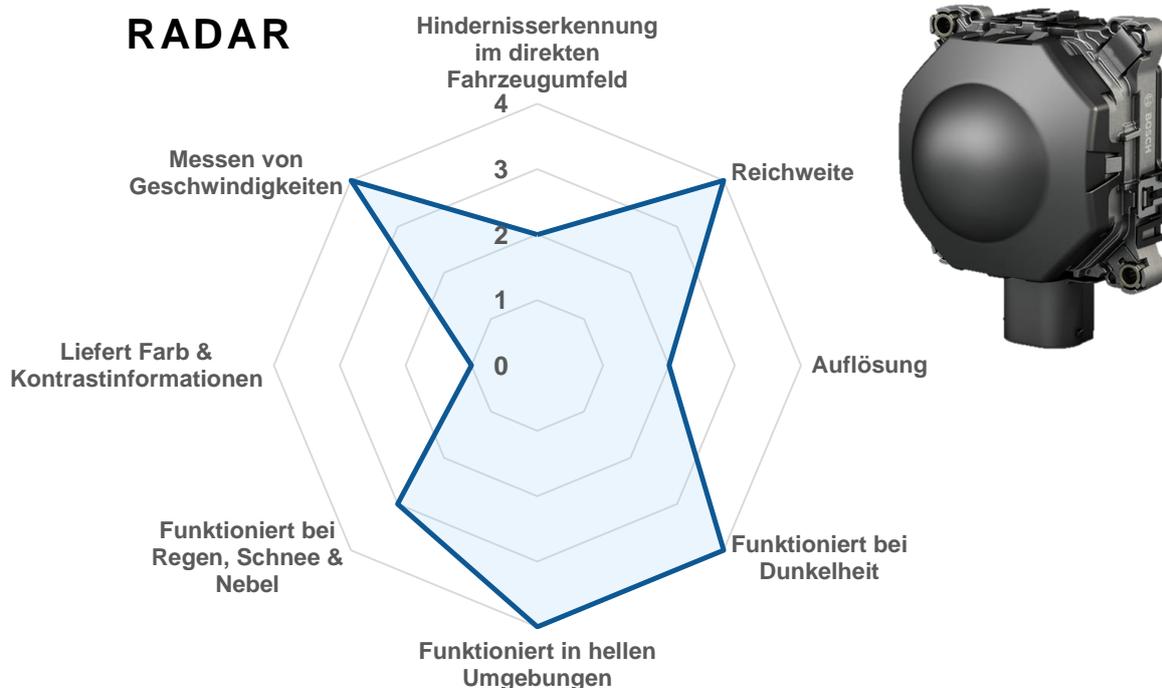


Abbildung 2.3: Auswahlkonflikt bei Umfeldsensoren [PAU14]

Abbildung 2.3 zeigt den Auswahlkonflikt für die Umfeldsensorik. Darin ist zu sehen, dass sich nur ein kleiner Überschneidungsraum innerhalb der Auswahlkriterien bildet. Die Sensoren, die

verbaut werden sollen, müssen sich einerseits durch geringe Preise und hohe Qualität auszeichnen und andererseits auch System- und Einbauanforderungen erfüllen. Auch sämtliche Umwelthanforderungen, wie Schlechtwettersituationen sollten sie meistern können. Hinzu kommen zukünftige gesetzliche Anforderungen und Normungen, die über den Sensorlebenszyklus eingehalten werden müssen. [WIN15a; PAU14]

Nachfolgend werden die vier wichtigsten Umfeldsensortechnologien für das automatisierte Fahren einzeln beschrieben. Um deren technologische Auswahlkriterien aufzuzeigen, wurden die Merkmale der einzelnen Sensoren identifiziert, dem Stand der Technik nach bewertet und jeweils in einem Netzdiagramm aufgetragen. Die Darstellung in einem Netzdiagramm eignet sich in diesem Fall besonders, um einen Vergleich der Werte ziehen zu können [TEC15]. Nach den einzelnen Vorstellungen werden die Diagramme fusioniert, um die aktuellen Möglichkeiten heutiger Erfassungssysteme im Fahrzeug zu visualisieren.



**Abbildung 2.4: Merkmalsbewertung eines Radarsensors [ROB14; WIN15a, S. 299–301]**

Radarsensoren sind dafür bekannt, Objekte innerhalb größerer Entfernung von aktuell bis zu 250 Metern erfassen zu können [CON14]. Die Abbildung 2.4 zeigt einen solchen LRR Sensor und die Einteilung seiner Merkmale in einem Netzdiagramm von 1 bis 4, abhängig von seiner Eignung, wobei 4 der besten und 1 keiner Eignung entspricht. Damit der Radarsensor Objekte detektieren kann, sendet er elektromagnetische Wellen aus, die an metallischen Oberflächen reflektieren und von dem Empfangsteil im Radarsensor wieder erfasst werden. Da eine Luftzeitmessung für eine Distanzbestimmung zum georteten Objekt sehr aufwendig wäre, nutzt

man das Prinzip der indirekten Laufzeitmessung. Dabei wird auf dem Sendesignal der Radarwellen ein bestimmter Frequenzgang von ca. einem GHz moduliert, der gängigerweise eine Trägerfrequenz von 76,5 GHz aufweist. Bei einer Reflektion des Sendesignals an einem detektierten Objekt entsteht ein Echo, das durch die Signallaufzeit bedingt, eine Frequenzdifferenz zum Sendesignal aufweist. Diese Differenz ist ein direktes Maß für den Abstand zwischen Sensor und erfasstem Objekt. Zusätzlich kann durch den Dopplereffekt eine Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und geortetem Objekt erfasst werden. Diese kann aus der Subtraktion der Frequenzdifferenzen von steigender und fallender Eingangsfrequenzrampe ermittelt werden. [REI16]

Neben dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit zu einem Objekt kann der Radarsensor als dritte Messgröße einen Winkel zu seiner eigenen Sensorachse bestimmen. Bei aktuellen LRR Sensorgenerationen ist eine Winkelgenauigkeit von  $\pm 0,1^\circ$  in Azimut und  $\pm 0,2^\circ$  in Elevation bei einer Punktziel Bestimmung möglich [WIN15a, S. 300f.]. Dazu ist eine mehrstrahlige Antennenanordnung innerhalb des Sensorgehäuses notwendig. Durch die Bestimmung der stärksten Reflektionen auf dem Antennenarray kann die Richtung des georteten Objekts durch einen Winkel zum Sensor bestimmt werden. [REI16]

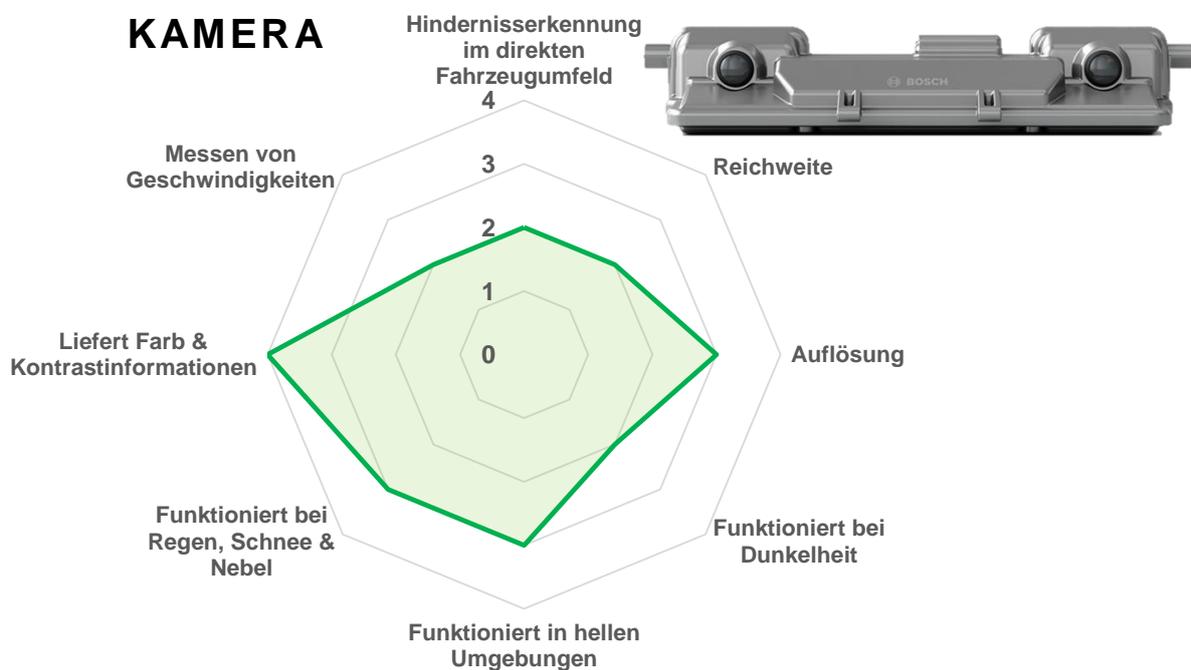
Spiegelt man die dargestellten Messgrößen auf die Merkmale in der Abbildung 2.4, wird ersichtlich, dass sich der Radarsensor besonders für eine Objektdetektion über größere Entfernungen sowie zur Bestimmung von Relativgeschwindigkeiten für die Annäherungsbestimmung eignet. Dabei ist er nur geringfügig von Umweltfaktoren abhängig. Deshalb wird er primär eingesetzt, um sich annähernde Objekte und deren Richtung bestimmen zu können. Eine detaillierte Darstellung des georteten Objekts ist jedoch nicht möglich, weshalb weitere Sensoren im Fahrzeug benötigt werden.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit eines LRR Sensors im Bezug zum bewegten Fahrzeug ist eine Kalibrierung des Sensors notwendig. Man unterscheidet dabei zwischen intrinsischer und extrinsischer Kalibrierung. Die intrinsische Kalibrierung wird bereits vom Sensorhersteller durchgeführt. Dabei wird der geometrische Bezug der Sensor-Messzelle zur Sensorsymmetrieachse oder einem Bezugspunkt des Sensorgehäuses kalibriert. Ein solcher Bezugspunkt ist beispielsweise ein kleiner Hilfsspiegel, der am Radarsensorgehäuse angebracht ist. Dieser Hilfsspiegel wird später zusammen mit den Kalibrierdaten des jeweiligen Sensors vom Sensorhersteller für die extrinsische Kalibrierung beim OEM benötigt. Dabei muss je nach Sensortyp der geometrische Bezug der Sensorsymmetrieachse oder des Gehäusebezugspunkts zu einer Referenzachse des Fahrwerks kalibriert werden, um so die Verbaul toleranzen ausblenden zu können. [WIN15a; TEN20a] Dieser Bezug ist die sogenannte geometrische Fahrachse des Fahrzeugs, die im folgenden Kapitel 2.2 im Detail beschrieben wird.

Nach der extrinsischen Kalibrierung beim OEM hat der Radarsensor im späteren Kundenbetrieb die Möglichkeit, durch eine Azimut und Elevation Offsetbestimmung seine Kalibrierung

nachzuführen. Diese Online-Kalibrierung geschieht mithilfe von Offsetschätzverfahren zur Korrektur des Azimutwinkels und unter Ausnutzung des Bodenechos für den Elevationwinkel. [WIN15a; KÜH09] Da die Online-Kalibrierung nur bedingt funktioniert und nicht ab Kilometer Null umgesetzt werden kann, ist die initiale extrinsische Kalibrierung beim OEM zwingend notwendig.

Sie muss nicht nur bei dem Radarsensor vorgenommen werden, sondern auch bei anderen Umfeldsensoren, die zur automatisierten Längs- und Querführung des Fahrzeugs benötigt werden. Wie diese Kalibrierung der Umfeldsensoren prozessseitig innerhalb der Produktion bei einem OEM durchgeführt wird, ist anhand eines Beispiels im Kapitel 2.3.3 beschrieben.



**Abbildung 2.5: Merkmalsbewertung eines Stereokameramoduls [ROB13; ROB17b]**

Kamerabasierende Systeme kommen im Fahrzeug besonders zur detailreichen Erkennung im direkten Umfeld zum Einsatz. Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen ist, liefert das Kamerasystem Farb- und Kontrastinformationen bei einer guten Auflösung der Bildinformationen. Bildgebende Systeme sind jedoch auch stärker von Umwelteinflüssen abhängig. Dabei spielen beispielsweise helle und dunkle Umgebungen eine Rolle. Da die Kamerahardware meistens hinter der Frontscheibe des Fahrzeugs verbaut ist, können auch schlechte Wettereinflüsse die Sicht der Kamera stark einschränken. Gibt es in solchen Situationen keine Referenzinformationen von redundanten Sensorsystemen, dann kann es zum Ausfall der Assistenzfunktion des Fahrzeugs kommen.

Einfache Kamerasysteme kommen im Heck oder rund um das Fahrzeug zum Einsatz, um Parkfunktionen zu realisieren. In der Fahrzeugfront werden die Systeme auch genutzt, um

sicherheitsrelevante Fahrfunktionen umzusetzen. Dazu gehört unter anderem der Notbrems- oder der aktive Spurhalteassistent. Die Kamerasensoren müssen daher, ebenso wie die zuvor vorgestellten Radarsensoren, die Sicherheitsanforderungen der ISO 26262 erfüllen. Deshalb kommen im Bereich der Frontkameras unterschiedliche Kamera-Architekturen zum Einsatz. Man unterscheidet zwischen Mono- und Stereokamerasystemen. Bei der Monokamera gibt es ein Modul, das zusammen mit einer Auswerteeinheit Bilder von vor dem Fahrzeug aufnehmen und auswerten kann. So können beispielsweise Verkehrszeichen oder Objekte vor dem Fahrzeug in der YZ-Ebene detektiert werden. Ein Nachteil der Monokamera ist, dass keine räumlichen Tiefeninformationen aus dem Bild ermittelt werden können. Das bedeutet, dass die Richtung zum Objekt bestimmt werden kann, aber nicht die Entfernung. [WIN15a]

Bei der Stereokamera existieren in einem Systemgehäuse zwei Kameramodule mit jeweils zwei Auswerteeinheiten. Die Kameramodule ermitteln jeweils zeitgleich zwei sich überschneidende Bilder, so dass aus den Bildern ein Schnittpunkt des georteten Objekts ermittelt werden kann. Da die beiden Kameramodule räumlich zueinander kalibriert sind und so der Schnittpunkt innerhalb des globalen Kamera-Koordinatensystems ermittelt wird, kann zusätzlich eine Tiefeninformation zum Objekt dargestellt werden. Stereokamerasysteme benötigen deshalb erhöhte Rechenleistung und müssen sehr präzise in allen Raumachsen zueinander ausgerichtet sein. Daher ist ein größerer Kalibrieraufwand als bei einem Monokamerasystem notwendig. [WIN15a]

Wie bei dem Radarsensor wird auch bei dem bildgebenden Sensorsystem eine intrinsische und extrinsische Kalibrierung durchgeführt, um die korrekte Funktion des sicherheitsrelevanten Systems sicherzustellen. Folgende geometrischen Bezüge müssen dabei kalibriert werden: [FEL16; WIN15a]

**Intrinsische Kalibrierparameter beim Sensorhersteller:**

- Kamerahauptpunkt je Kameramodul
- Brennweite je Kameramodul
- Verzeichnung je Kameramodul
- Pixelskalierung je Kameramodul
- Relative Lage und Orientierung der einzelnen Kameramodule zueinander bei einem Stereokamerasystem

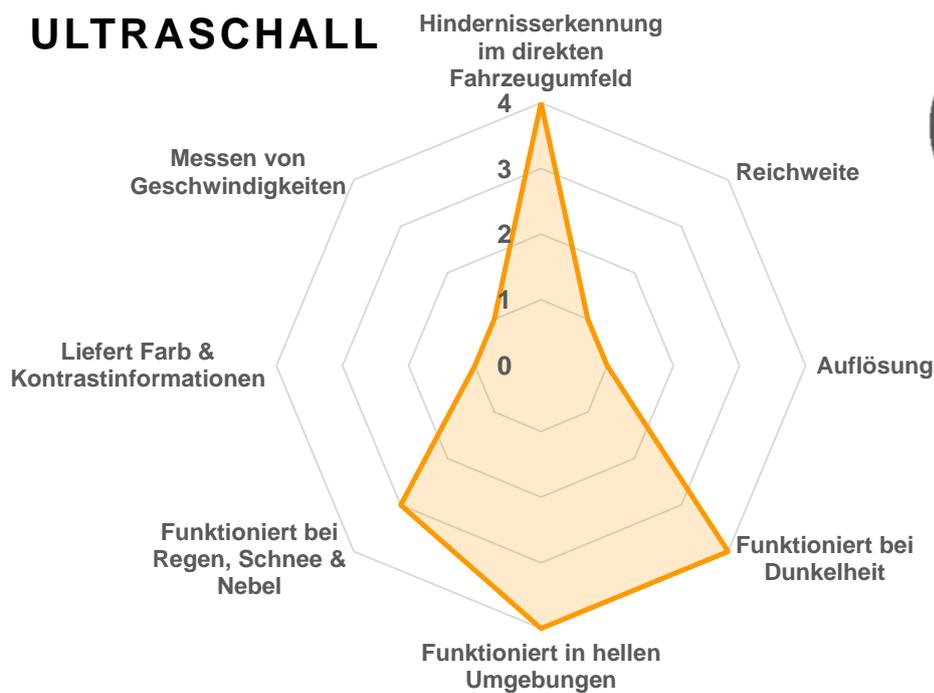
**Extrinsischer Kalibrierparameter beim Fahrzeughersteller:**

- Kameraposition nach Verbau zur Referenz des Fahrzeugs
- Kameraorientierung nach Verbau zur Referenz des Fahrzeugs

Die intrinsische Kalibrierung beim Sensorhersteller findet in dessen Produktionslinie statt. Dabei werden die Modellparameter des Kameramoduls bestimmt und auf das fertig produzierte System übertragen. Bei der extrinsischen Kalibrierung beim OEM müssen die geometrischen Bezüge zum Fahrzeug, die sich nach der Montage des Kamerasystems ergeben, kalibriert

werden. Dabei müssen die Lage- und Orientierungsoffsets zwischen einem aufgenommenen Kalibrierbild und einem Referenzbild des Kameramoduls über eine externe Kalibriernormale bestimmt werden. [WIN15a; FEL16]

Auch bei dem bildgebenden Sensor hat das System die Möglichkeit, im späteren Kundenbetrieb eine Nachführung der Kalibrierung durchzuführen. Dabei wird der optische Fluss des Videostroms der Kamera anhand spezieller Fahrsituationen bewertet. Auf dieser Basis können Schätzungen der inkrementellen Fahrzeugbewegung getroffen werden, was zu einer relativen räumlichen Bestimmung der Kamera zum Fahrzeugkoordinatensystem führt. Daraus kann der hinterlegte Offsetkalibrierwert korrigiert werden. Da die Online-Kalibrierung im Fahrbetrieb immer existent ist, soll auf eine initiale Kalibrierung beim OEM verzichtet werden können. [WIN15a; PFL12] Solch ein Verfahren kann jedoch nur angewendet werden, wenn keine automatisierten Fahrfunktionen ab Kilometer Null zur Verfügung gestellt werden sollen. Aktuell gibt es kein durchgängiges Kalibrierkonzept für bildgebende Systeme bei den OEMs.



**Abbildung 2.6: Merkmalsbewertung eines Ultraschall-Sensors [ROB18; WIN15a, S. 256f.]**

Ultraschallsensoren kommen bei automobilen Anwendungen insbesondere bei Einparksystemen zum Einsatz. Dabei nutzt man Sensoren mit piezokeramischen Ultraschallwandlern, die aufgrund ihrer robusten Umwelteigenschaften besonders für automobiler Anwendungen geeignet sind. Abbildung 2.6 zeigt, dass die Ultraschallsensoren unabhängig von unterschiedlichen Wittereinflüssen sind. Auch das Tageslicht spielt keine Rolle. Aufgrund ihrer physikalischen

Eigenschaften eignen sie sich jedoch nur, Objekte in geringen Reichweiten im direkten Fahrzeugumfeld zu detektieren. Dabei muss auf eine detailreiche Darstellung des Objekts verzichtet werden. Durch die Verschaltung mehrerer Ultraschallsensoren in den Stoßfängern des Fahrzeugs kann aber im Verbund eine detailreichere Darstellung des Fahrzeugumfelds ermittelt werden. [ROB18; WIN15a]

Ultraschallsensoren arbeiten nach dem Impuls-Echo-Prinzip. Dabei werden Ultraschallimpulse ausgesendet, an einem zu detektierenden Objekt reflektiert und von einem Empfänger wieder erfasst. Der Ultraschallimpuls wird durch eine piezoelektrische Keramik ausgelöst. Parallel dazu wird eine Laufzeitmessung gestartet. Reflektiert der Schallimpuls an einem Objekt, dann wird ein Echo zurückgeworfen, das vom Ultraschallwandler aufgenommen und die Laufzeitmessung beendet wird. Mit der Laufzeit des Signals kann die Entfernung zwischen Sensor und Objekt berechnet werden. Dafür bildet die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Medium Luft die entscheidende Rechengröße. Diese ist wiederum von Umweltfaktoren wie beispielsweise der Lufttemperatur und der Dichte abhängig. Daneben ist auch die Echostärke von Bedeutung. Kleine Echosignale führen, bedingt durch das zeitliche Ausklingen des Signals zu einer Laufzeitverzögerung. Durch diese Nebeneffekte ist eine Entfernungsmessung nur im Zentimeterbereich möglich. [WIN15a; ROB18]

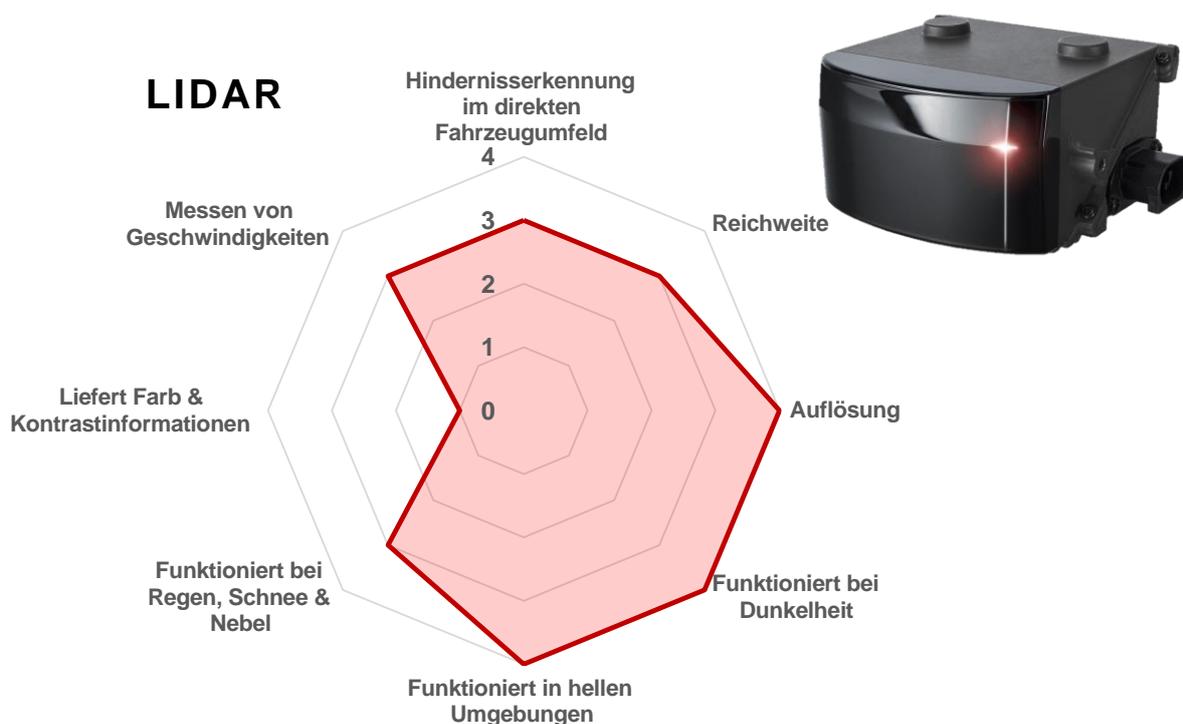
Das zeigt, dass Ultraschallsensoren nur für Systeme geringerer Anforderungen genutzt werden können. Die zentimetergenaue Entfernungsmessung ist jedoch für Parksyste me oder Fahrfunktionen, die keine genaue Entfernung benötigen, tolerierbar. Durch das einfache Messprinzip sind Ultraschallsensoren wesentlich günstiger und witterungsunabhängiger als Radar, Lidar oder bildgebende Sensoren. [WIN15a]

Bei sicherheitsrelevanten Funktionen, bei denen Entfernungen auch seitlich oder im Heck des Fahrzeugs genau benötigt werden, wie beispielsweise beim automatischen Spurwechselassistenten, kommen radarbasierte Sensoren wie SRR oder MRR zum Einsatz. Aufgrund der ungenaueren Objekterfassung im direkten Nahbereich des Fahrzeugs und dem großen Öffnungswinkel von  $\pm 35^\circ$  der Detektionszone ist keine extrinsische Kalibrierung zu einem geometrischen Bezug nach Verbau der Sensoren im Fahrzeug notwendig [ROB18].

Lidar Sensoren sind eine noch sehr neue Technologie zur Umfelderkennung beim automatisierten Fahren. Dennoch ist die Lidar Technologie im sicherheitsrelevanten Bereich neben den zuvor beschriebenen optischen und elektromagnetischen Ortungsverfahren ein integraler Bestandteil zur Klassifizierung von Objekten im Straßenverkehr. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, bieten Lidar gegenüber Radarsensoren eine wesentlich feinere Auflösung und damit eine höhere Informationsdichte für eine detailliertere Darstellung. [TIL18] Die Detektionsreichweite mit ca. 200 Metern ist jedoch minimal geringer als bei einem modernen LRR Sensor. [WIN15a; EBE18]

Das physikalische Prinzip eines Lidar Sensors zur Abstandsmessung basiert auf der Laufzeitmessung Time-of-Flight (TOF) von Lichtimpulsen. Dabei sendet eine Laserdiode innerhalb des

Sensors einen infraroten Lichtimpuls bei ca. 950 Nanometern aus, der an dem zu detektierenden Objekt reflektiert und zurückgeworfen wird. Die Laufzeit des Lichtimpulses vom Aussenden bis zum Eintreffen auf der Fotodiode des Sensor-Empfängerteils verhält sich proportional zur Distanz zwischen Sensor und detektiertem Objekt. Da der Lichtimpuls den Weg zum und vom Objekt zweimal mit Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  zurücklegt, muss das bei der Berechnung der Distanz aus der Laufzeitmessung berücksichtigt werden. [TIL18]



**Abbildung 2.7: Merkmalsbewertung eines Lidar-Sensors [VAL20; WIN15a, S. 329–331]**

Neben der Auswertung der Distanzinformation kann der Lidar Sensor auch die Intensität der Lichtimpulse auswerten. Daraus ergibt sich die Möglichkeit einer visuellen Darstellung und somit einer Klassifizierung von erfassten Objekten, was aufgrund der benötigten Auflösung bislang nur bei einer Kamera möglich war. [WIN15a] Diese Funktionalität wird bei autonomen Fahrfunktionen aufgrund der redundanten Absicherung der Systeme im Betrieb zwingend notwendig sein.

Um bei der Konturdarstellung des Objekts nicht nur einen Punkt darstellen zu können, müssen mehrere Laserimpulsstrahlen erzeugt werden, die auf die Objektoberfläche geworfen werden. Bislang gibt es dazu zwei unterschiedliche Architekturen der Lidar Sensoren. Um diese mehrfach benötigten Messkanäle des Sensors zu erzeugen, werden mehrere Laserdioden in einem Array verschaltet oder man führt das Messsystem als „scannend“ aus. Bei der scannenden Architektur rotiert ein Spiegel in der Messzelle, die den Laserstrahl innerhalb der Abtastzone

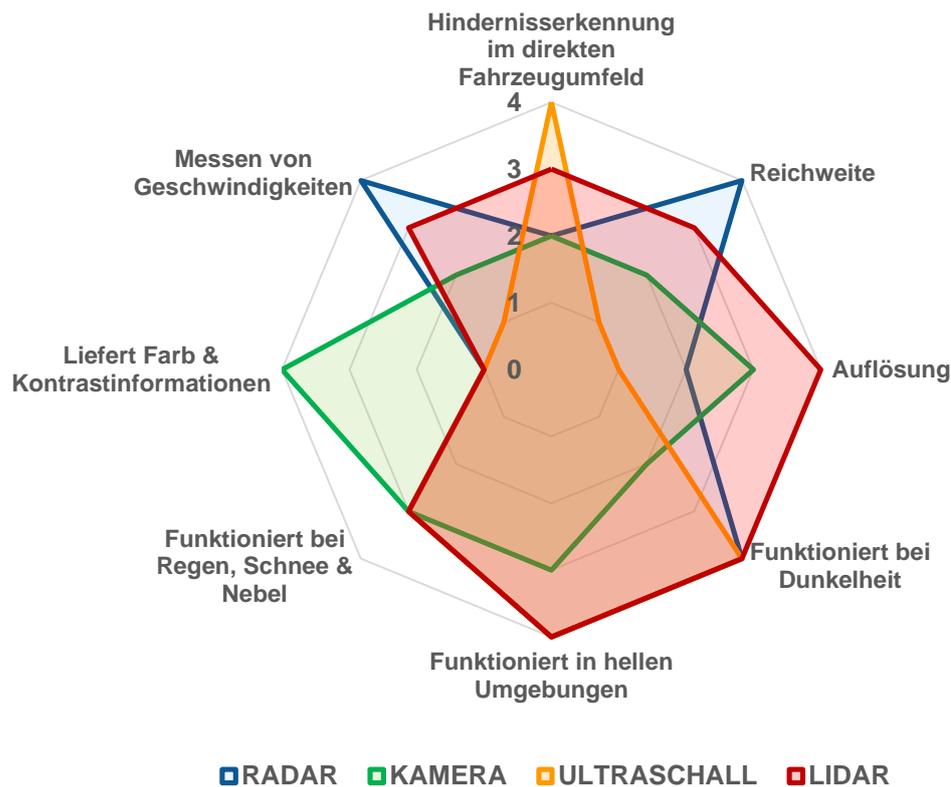
umlenkt. Dabei entsteht ein zeitlicher Aufnahmeversatz zwischen den einzelnen Abtastpunkten. Abhängig vom ausgewählten Verfahren ergeben sich Unterschiede bei den Detektionszonen, Abtastraten und der benötigten Rechenleistung des Sensors. [WIN15a]

Unabhängig von der Sensorarchitektur müssen die Lidar Sensoren auch einer intrinsischen und extrinsischen Kalibrierung unterzogen werden. Dabei muss die Messzelle sowie das Sensorarray beim Sensorhersteller relativ zueinander kalibriert werden. Beim OEM müssen die geometrische Lage und Orientierung zur Referenz des Fahrzeugs nach dem Verbau des Sensors kalibriert werden. Da Lidar Sensortechnologien im automobilen Umfeld noch sehr neu sind und bislang nur selten eingesetzt werden, gibt es aktuell nur wenige Kalibrierstrategien innerhalb der Fahrzeugproduktion. Das hat wirtschaftliche Gründe, denn die Lidar Technologie ist noch sehr teuer und die Sensoren findet man nur in Oberklassefahrzeugen [FLÖ20]. Das wird sich zukünftig ändern, da umfangreiche Entwicklungen im Bereich automobiles Lidar betrieben wird.

Erste Kalibriermethoden werden bereits vollzogen. Dazu wird eine Kalibriertafel mit Hell- und Dunkelgrenzen benutzt, um die Lage und Orientierung des Lidar Sensors zum Fahrzeug zu kalibrieren [DOM19; HEL19]. Dabei sind zukünftig auch Säulen denkbar, die im Raum verteilt und deren Bezüge relativ zueinander bekannt sind. Durch Erfassen dieser Säulen mittels des verbauten Lidar Sensors und einer Referenzierung des Fahrzeugs ist auch eine Kalibrierung denkbar. Die Möglichkeiten sind dabei vielfältig. Jedoch gilt es immer zu prüfen, ob sich diese Kalibrierverfahren auch in eine bestehende Produktion des OEMs integrieren lassen.

Nach Vorstellung der primären Sensortechnologien im Fahrzeug zur Umfelderkennung und deren essenziellen Merkmalen, können diese nachfolgend miteinander verglichen werden. Abbildung 2.8 zeigt die Überlagerung der Netzdiagramme der vorgestellten Sensortechnologien Radar, Kamera, Ultraschall und Lidar. Dabei ist zu erkennen, dass nur bei einer Nutzung aller Sensortechnologien eine Sicherstellung aller benötigten Merkmale gewährleistet ist. Es gibt kaum Merkmale, die von zwei Sensortechnologien in gleichem Umfang abgedeckt werden können. Das ist einer der Gründe, warum auf dem Weg zum autonomen Fahren immer mehr Sensortechnologien zum Einsatz kommen. Um eine umfassende Fahrzeugumfeldererkennung sicherzustellen, ist daher die Kombination von mehreren unterschiedlichen Sensorinformationen notwendig [WEN08].

Die Kombinationsmöglichkeiten der unterschiedlichen Sensortechnologien werden als Sensorfusion bezeichnet. Damit können aus der Fusion mehrerer Informationen von einem Objekt detailliertere Aussagen getroffen werden, aus denen sich Klassifizierungen von Objekten ableiten lassen. Auch für die Redundanz der sicherheitsrelevanten Fahrfunktionen beim automatisierten Fahren ist eine Sensorfusion aus den Rohdaten unerlässlich. [WEN08; LIU10]



**Abbildung 2.8: Fusion der Umfeldsensormerkmale**

Durch Fusion der unterschiedlichen Technologien und Sensordaten ergeben sich auch für die Kalibrierung dieser Sensorsysteme neue Möglichkeiten. Wie bereits vorgestellt, besitzen die heutigen Sensorsysteme Funktionen zur Online-Kalibrierung im regulären Kundenbetrieb. Auf der Basis einer zukünftigen Multisensorplattform können die jeweiligen Sensortechnologien ihre räumlichen relativen Lagen und Orientierungen zueinander festlegen. Dafür sind lediglich gemeinsame Merkmale des Umfelds zu erfassen. [STR13] Grundlage dafür stellt die initiale extrinsische Kalibrierung einiger Sensoren zur hochgenauen Objekterfassung in großen Distanzen dar. Im Anschluss daran könnten sich weniger hochgenaue Erfassungssysteme durch Sensorfusion selbstständig initial kalibrieren.

## 2.2 Geometrische Bezüge und Referenzen des Fahrwerks im Kraftfahrzeug

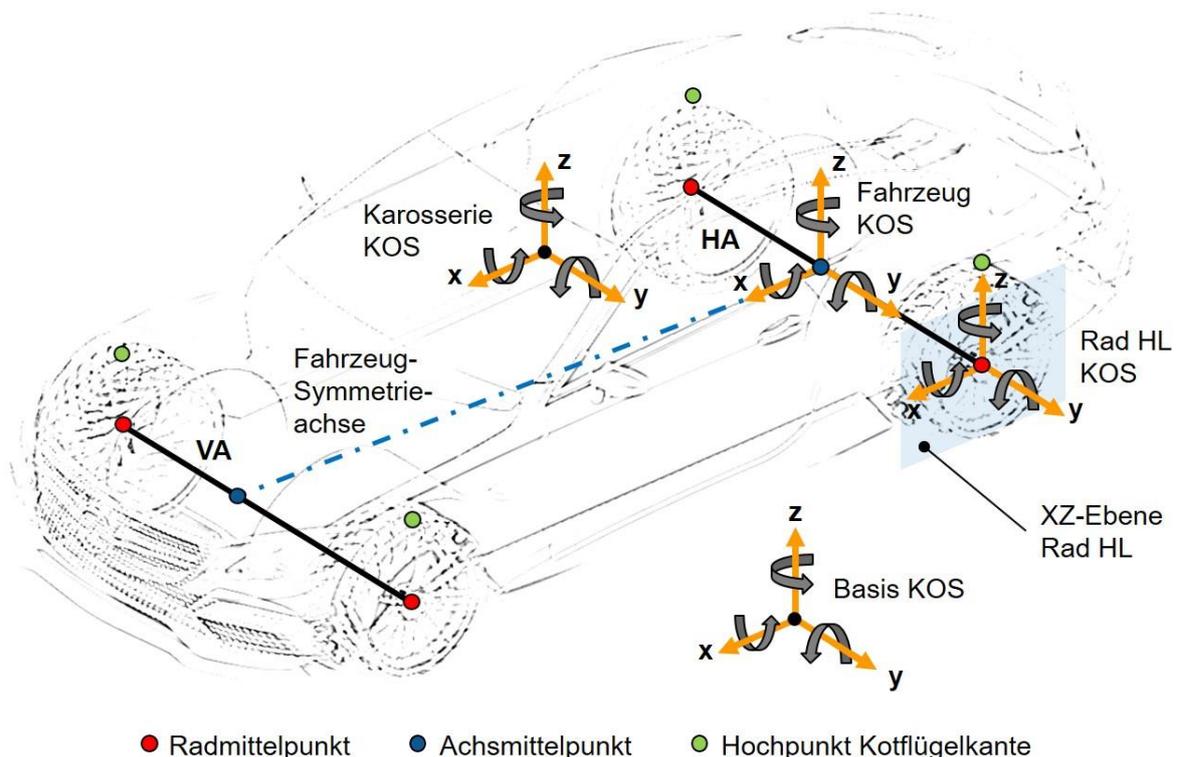
Die Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme (FAS) basiert im Wesentlichen auf der korrekten Ausrichtung der Umfeldsensoren des Fahrzeugs. Das ist notwendig, damit ein FAS das Umfeld des Fahrzeugs erfassen kann und daher korrekt arbeitet. Im vorliegenden Unterkapitel sollen die wichtigsten Fahrwerkparameter eines Fahrzeugs erläutert werden, um den Zusammenhang zu weiterführenden Kapiteln nachvollziehen zu können. Für diese Arbeit werden nachfolgend die Fahrzeug- und Fahrwerkkoordinatensysteme sowie die Bildung der Fahrwerkparameter dargestellt.

Die meisten Fahrwerkparameter eines Fahrzeugs werden als Winkel im zweidimensionalen Raum beschrieben. Damit diese gebildet werden können, muss jedoch der gesamte Fahrzeugaufbau mit Karosserie und dem Fahrwerk im dreidimensionalen Raum betrachtet werden. Dafür hat man mehrere Koordinatensysteme (KOS) im und um das Fahrzeug festgelegt. Abbildung 2.9 zeigt die Anordnung dieser Koordinatensysteme. Die Koordinatensysteme, deren Bildung und Funktionen werden nachfolgend beschrieben: [DIN13; TEN20b]

- **Ortsfestes Basiskoordinatensystem**
  - Das Basiskoordinatensystem (Basis KOS) ist an einen Ort außerhalb des Fahrzeugs gebunden. Auf dieses KOS lassen sich alle Fahrwerkparameter zusammenführen. Bei einer Vermessung des Fahrzeugs bildet die X-Y-Ebene des Basis KOS die Kontaktfläche der Räder mit dem Boden der Fahrbahn und liegt dabei exakt senkrecht zum Erdgravitationsfeld.
  
- **Fahrzeugfestes Fahrzeugkoordinatensystem**
  - Das Fahrzeugkoordinatensystem (Fahrzeug KOS) ist im Fahrwerk des Fahrzeugs verankert. Innerhalb dieses Koordinatensystems lassen sich die Fahrwerkparameter der Fahrzeughinterachse berechnen, die somit unabhängig von der Lage des Fahrzeugs zum Basis KOS sind. Das Fahrzeug KOS wird bestimmt durch die vier Radmittelpunkte. Dadurch lassen sich die jeweiligen Achsmittelpunkte berechnen. Die X-Achse des Fahrzeug KOS verläuft durch diese beiden Achsmittelpunkte und bildet dadurch die Fahrzeugsymmetrieachse. Der Ursprung des Fahrzeug KOS wurde, wie in Abbildung 2.9 dargestellt, in den Mittelpunkt der Hinterachse gelegt.
  
- **Karosseriefestes Karosseriekoordinatensystem**
  - Das Karosseriekoordinatensystem (Karosserie KOS) ist über die Federung und die Reifen mit dem Fahrzeug KOS verbunden und liegt innerhalb der Fahrzeugkarosse. Bedingt durch den Aufbau liegt es nicht parallel zum Fahrzeug KOS. Das Karosserie KOS gibt die Lage der Karosse zum Fahrwerk wieder und wird zum Beispiel benötigt, um den Fahrzeughöhenstand zu bestimmen. Es ist bei den meisten OEMs durch die Maxima der vier Kotflügelkanten des Fahrzeugs bestimmt. Dadurch lassen sich zwei Karosseriemittelpunkte bestimmen. Die X-Achse des Karosserie KOS verläuft durch diese beiden Karosseriemittelpunkte und bildet daher die Karosseriesymmetrieachse. Die X-Y-Ebene, bestimmt durch die vier Maxima der Kotflügelkanten des Karosserie KOS, gibt demnach die Lage der Karosse relativ zum Basis KOS wieder. Damit lässt sich unter anderem der Wankneigungswinkel (Drehung um die X-Achse), Nickwinkel (Drehung um die Y-Achse) und der Gierwinkel (Drehung um die Z-Achse) der Karosserie ermitteln.

- **Radfestes Radkoordinatensystem**

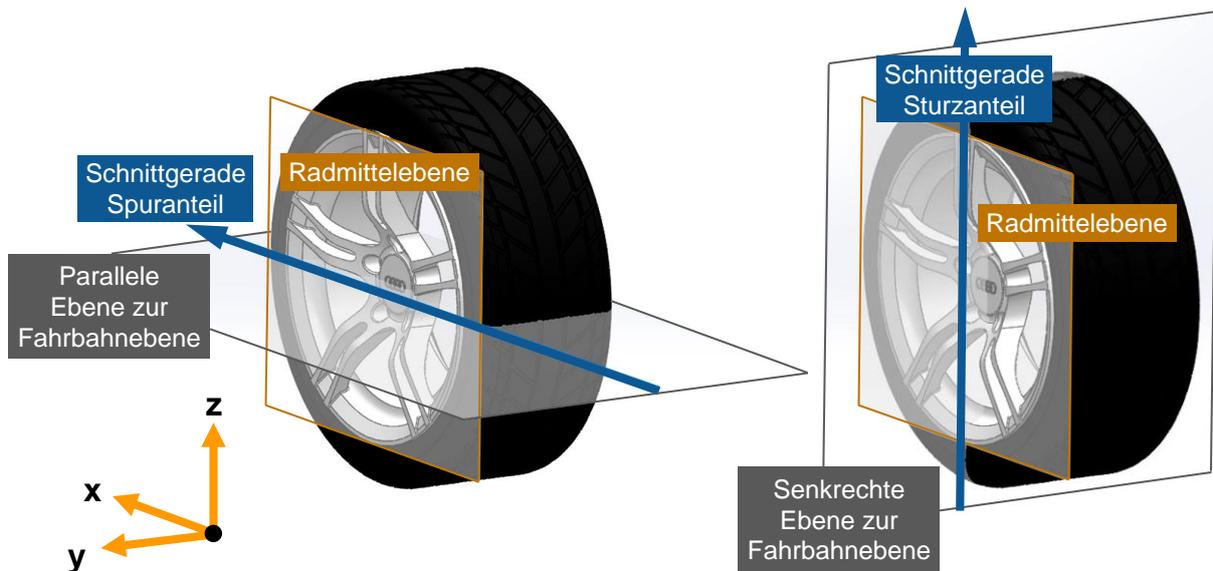
- Die vier Radkoordinatensysteme (Rad VL, VR, HL, HR KOS) sind in jedem Rad des Fahrzeugs zu finden. In Abbildung 2.9 ist ein Rad KOS für das Rad Hinten Links (Rad HL KOS) dargestellt. Das Rad KOS hat seinen Ursprung im Radmittelpunkt und ist so orientiert, dass die X-Z-Ebene des Rad KOS in der Radmittelebene liegt. Zusammen mit dem Fahrzeug KOS und dem Karosserie KOS können mit dem Rad KOS die Spur und Sturzwinkel für jedes Rad berechnet werden.



**Abbildung 2.9: Aufbau der Fahrwerkkoordinatensysteme des Fahrzeugs [DIN13]**

Die zuvor beschriebenen Koordinatensysteme sind primär Elemente für die Fahrwerkgeometrieberechnung an einem Fahrzeug. Zusätzlich gibt es noch weitere Koordinatensysteme und Referenzpunkte am Fahrzeug, die für eine qualitative Bewertung des Fahrzeugfahrwerks benötigt werden. Dabei sind unter anderem das Lenkradkoordinatensystem (Lenkrad KOS), welches durch den Einschlagwinkel  $\varphi$  um die Lenkraddrehachse und durch die Lage und Orientierung der Lenksäule bestimmt wird, zu erwähnen [TEN20b]. Der Einschlagwinkel  $\varphi$  soll für eine Geradeausfahrt des Fahrzeugs Null sein. Dadurch ist gewährleistet, dass das Lenkrad bei Geradeausfahrt horizontal steht. Deshalb muss bei Einstellung der Spurwerte an der Vorderachse der Einschlagwinkel erfasst und mitberücksichtigt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass eine mechanische Lenkübersetzung zwischen dem Einschlagwinkel und den vorderen Spurwinkeln vorliegt. Typischerweise liegt eine solche Übersetzung zwischen 12:1 bis 18:1 bei der Lenkwinkelübertragung auf die Spurwinkel der Vorderachse. [PFE13]

Aus den zuvor beschriebenen Koordinatensystemen können die relevanten geometrischen Winkel im zweidimensionalen Raum für die Fahrwerkgeometrien bestimmt werden. Um den Spur- und Sturzwinkel an jedem Fahrzeugrad bestimmen zu können, müssen Schnittgeraden zwischen der vorliegenden Radmittelebene und einer Ebene zur Fahrbahn gebildet werden. Abbildung 2.10 zeigt links im Bild die Schnittgeradenbildung für den Spur- und rechts im Bild für den Sturzanteil.



**Abbildung 2.10: Schnittgeradenbildung für die Spur- und Sturzberechnung [DIN13]**

Für die Berechnung bildet sich die Schnittgerade der Spur aus der sich schneidenden Radmittelebene (X-Z-Ebene des Rad KOS) und der parallelen Ebene zur Fahrbahn (X-Y-Ebene des Basis KOS) projiziert auf den Radmittelpunkt. Der sich zwischen Schnittgeraden und Fahrzeugsymmetrieachse bildende Winkel ist der Einzelspurwinkel am entsprechenden Hinterrad. Bei den vorderen Rädern bildet er sich zwischen der Schnittgeraden und der geometrischen Fahrachse. Diese wird nachfolgend noch näher erläutert. [DIN13]

Die Schnittgerade für den Sturz bildet sich aus der sich schneidenden Radmittelebene (X-Z-Ebene des Rad KOS) und der senkrechten Ebene zur Fahrbahn (Y-Z-Ebene des Basis KOS) projiziert auf den Radmittelpunkt. Der Winkel der sich zwischen der Schnittgeraden und der Hochachse (Z-Achse Fahrzeug KOS) bildet ist der Sturzwinkel an dem entsprechenden Rad. Die detailliertere Beschreibung des Sturzes wird nachstehend beschrieben. [DIN13]

Nach Bildung der Schnittgeraden und der entsprechenden Referenzbezüge im zweidimensionalen Raum können die einzelnen Winkel aufgetragen werden. Abbildung 2.11 zeigt die Fahrwerkswinkel und die entsprechenden geometrischen Bezüge für das Gesamtfahrzeug an Vorder- und Hinterachse in der Draufsicht von oben.

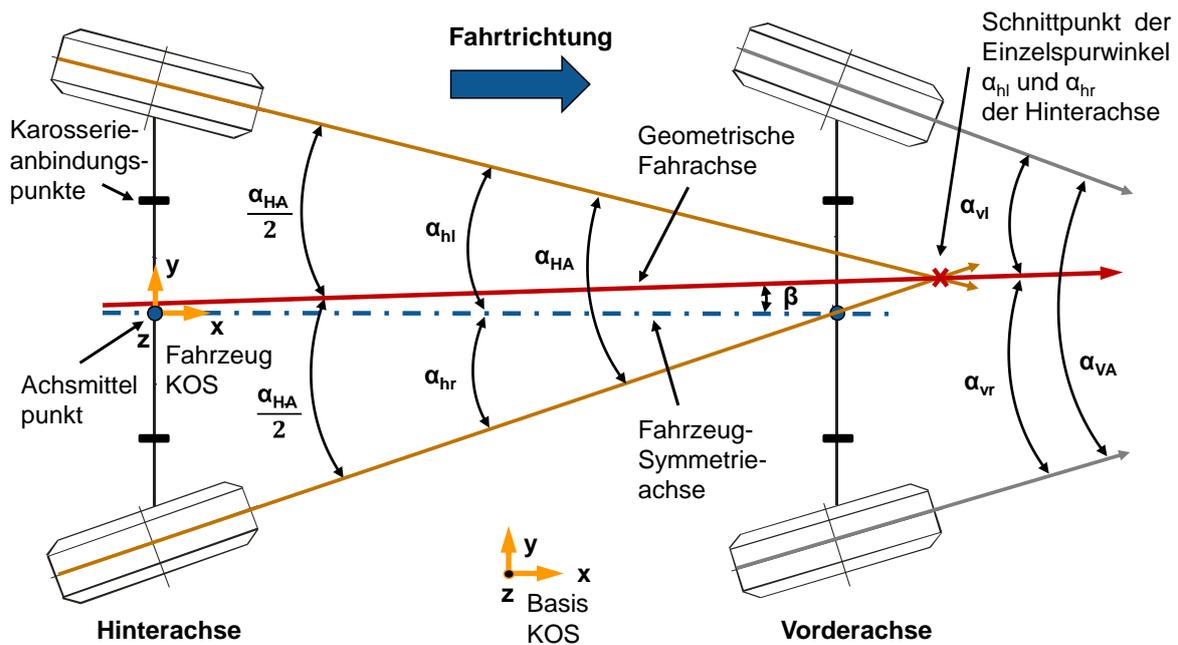


Abbildung 2.11: Spurwinkel und geometrische Bezüge des Fahrwerks [MÜL20a; DIN13]

Folgende Spurwinkel und geometrische Bezüge werden unterschieden: [HEI13; DIN13; DIN92]

- **Einzelspurwinkel  $\alpha_{hl}$ ,  $\alpha_{hr}$  und der Gesamtspurwinkel  $\alpha_{HA}$** 
  - Der Einzelspurwinkel  $\alpha_{hl}$  oder  $\alpha_{hr}$  ist der Winkel der Schnittgeraden auf der Radmittelebene des jeweiligen Fahrzeugrades und der Fahrzeugsymmetrieachse. Der Gesamtspurwinkel  $\alpha_{HA}$  ergibt sich aus der Addition der Einzelspurwinkel der Hinterachse.
- **Fahrzeugsymmetrieachse**
  - Die Fahrzeugsymmetrieachse bildet sich vom Mittelpunkt der Fahrzeughinterachse zum Mittelpunkt der Fahrzeugvorderachse. Die Achsmittelpunkte werden über die zugehörigen Radmittelpunkte bestimmt.
- **Einzelspurwinkel  $\alpha_{vl}$ ,  $\alpha_{vr}$  und der Gesamtspurwinkel  $\alpha_{VA}$** 
  - Der Einzelspurwinkel  $\alpha_{vl}$  oder  $\alpha_{vr}$  ist der Winkel der Schnittgeraden auf der Radmittelebene des jeweiligen Fahrzeugrades und der geometrischen Fahrachse ohne Lenkeinschlagswinkel. Der Gesamtspurwinkel  $\alpha_{VA}$  ergibt sich aus der Addition der Einzelspurwinkel der Vorderachse.
- **Geometrische Fahrachse**
  - Die geometrische Fahrachse ist die fahrtrichtungsgebende Achse bei Geradeausfahrt, die sich an der Fahrzeughinterachse bildet. Sie ist die Winkelhalbierende der Gesamtspur  $\alpha_{HA} / 2$  an der Hinterachse. Außerdem ist die Fahrachse der geometrische Bezug für die Spureinstellung an der Vorderachse, wie auch für die Kalibrierung sämtlicher Umfeldsensoren von Fahrerassistenzsystemen.

- **Dackellaufwinkel  $\beta$**

- Der Dackellaufwinkel  $\beta$  ist der Winkel zwischen der geometrischen Fahrachse und der Fahrzeugsymmetrieachse. Er ist positiv, wenn die geometrische Fahrachse links neben die Fahrzeugsymmetrieachse zeigt. Optimalerweise ist der Winkel sehr klein und die geometrische Fahrachse liegt auf der Fahrzeugsymmetrieachse. Er ist jedoch maßgeblich abhängig von der Spureinstellung der Hinterachse zu ihrer eigenen Symmetrieachse wie auch von der Verbautoleranz zwischen Vorder- und Hinterachse zueinander. Dabei berechnet sich der Dackellaufwinkel wie folgt:

$$\text{Dackellaufwinkel } \beta = \frac{\alpha_{hl} + \alpha_{hr}}{2} - \alpha_{hl} \quad (1)$$

Bei den dargestellten Spurwinkeln unterscheidet man zusätzlich zwischen folgenden zwei Spurarten, die auch das Vorzeichen des Winkels beeinflussen: [HEI13]

- **Vorspur:**

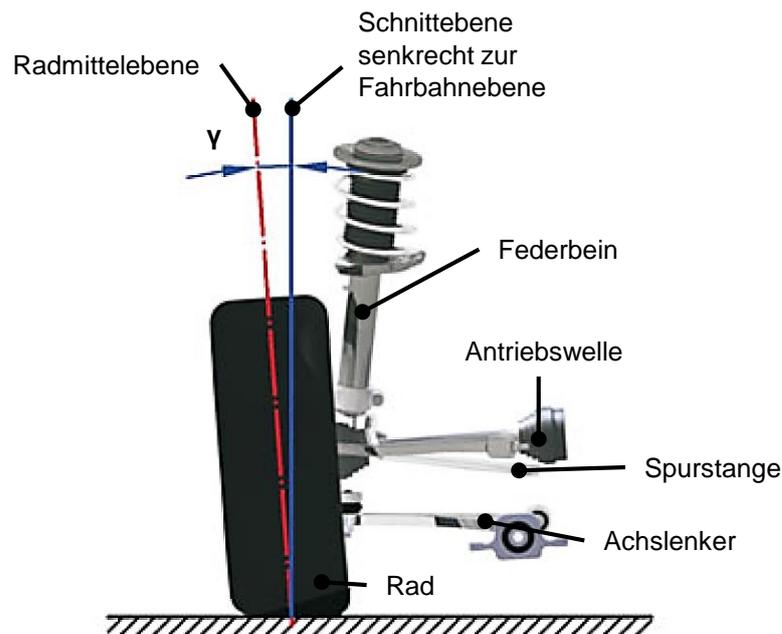
- Abstandsdifferenz der Felgenhörner hinter und vor den Radmittelpunkten der Räder einer Achse, wenn der Abstand vorn kleiner ist als der Abstand hinten. Die Räder zeigen in Fahrtrichtung nach innen und es entsteht ein positiver Spurwinkel.

- **Nachspur:**

- Abstandsdifferenz der Felgenhörner hinter und vor den Radmittelpunkten der Räder einer Achse, wenn der Abstand vorn größer ist als der Abstand hinten. Die Räder zeigen in Fahrtrichtung nach außen und es entsteht ein negativer Spurwinkel.

Die Einstellung der Spurwerte des Fahrwerks beeinflusst das Fahrzeug bei Geradeausfahrt und Kurvenverhalten. Wegen der modernen Fahrwerke werden hochgenaue Fahrwerkeinstellungen im Winkelminutenbereich benötigt. Aktuelle Produktionssysteme zum Vermessen eines Fahrwerks haben eine Genauigkeit von  $\pm 1'$  (Winkelminute). Das entspricht einem Winkel von ca.  $\pm 0,016^\circ$ . [TEN20b] Typische Einstellwerte in der Konstruktionsnulllage (K0-Lage) des Fahrzeugs liegen zwischen  $+30'$  bis  $-30'$  bei einem Einstellfenster von ca.  $10'$  und werden je nach Antriebsart des Fahrzeugs und Herstellers individuell ausgelegt. Die K0-Lage und die Abhängigkeiten von Spur und Sturz werden am Ende dieses Kapitels erläutert.

Analog zum Spurwinkel  $\alpha$  ist der Sturzwinkel  $\gamma$  der einzelnen Fahrzeugräder bedeutsam, da er die Querführung des Fahrzeugs beeinflusst. Der Sturz  $\gamma$ , wie in der Seitenansicht der Hinterachse in Abbildung 2.12 zu sehen ist, ist wie folgt definiert: Er ist der Winkel zwischen der Radmittelebene und einer zur Fahrbahn senkrechten Ebene, die parallel zur Schnittlinie der Radmittelebene mit der Fahrbahnebene verläuft. [HEI13]



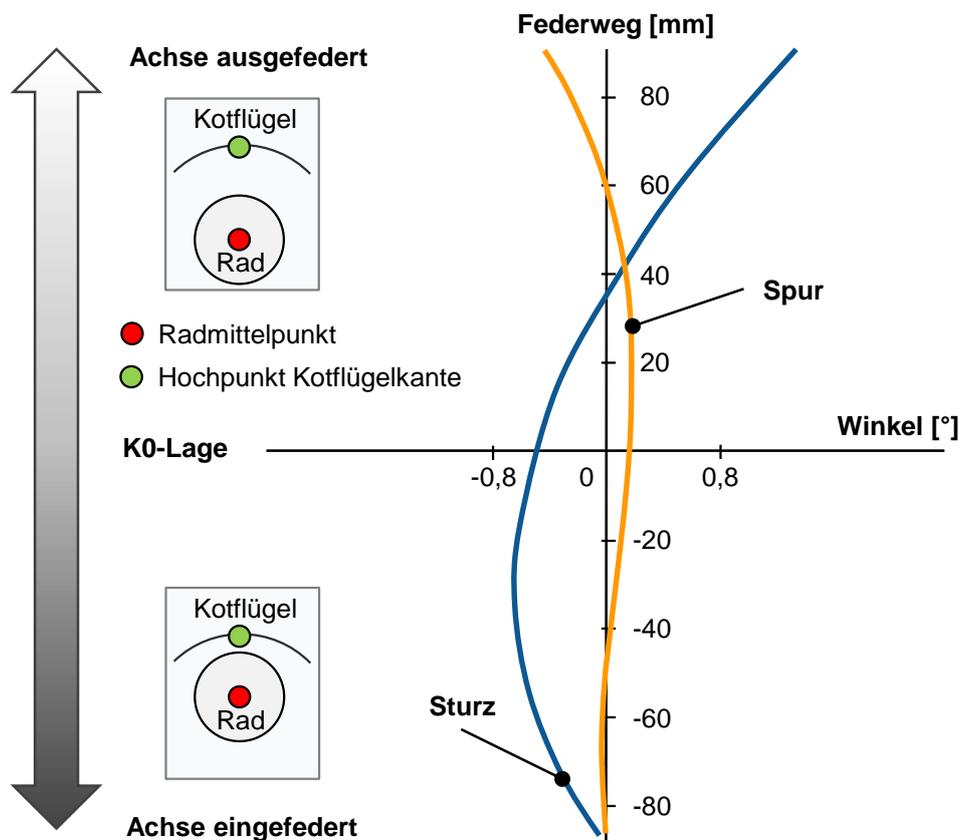
**Abbildung 2.12: Sturzwinkel des Fahrwerks [HEI13]**

Der Sturz ist positiv definiert, wenn das Rad nach außen geneigt ist, negativ, wenn das Rad nach innen geneigt ist. Ein negativer Sturz am Kurvenaußenrad erzeugt Sturzseitenkräfte, die die Querführung der Achse verbessern. Für eine gute Seitenkraftübertragung sollte das Rad auch unter Seitenkraft nie in positiven Sturz gehen. Typische Sturz-Werte in der K0-Lage liegen zwischen  $-2^\circ$  bis  $0^\circ$  und beeinflussen durch Verstellen die Querdynamik, den Rollwiderstand und Reifenverschleiß des Fahrzeugs. [HEI13]

Neben dem Spur- und Sturzwinkel gibt es noch andere Fahrwerkgeometrieparameter, wie die Spreizung und der Nachlauf, die in der Produktion vermessen oder hergeleitet werden. Die Spreizung ist dabei der Winkel zwischen der Z-Achse und der Lenkachse projiziert auf die Y-Z-Ebene des Basis KOS. Sie ist positiv, wenn die Lenkachse oben nach innen geneigt ist. Der Nachlaufwinkel ist der Winkel zwischen der Z-Achse und der Projektion der Lenkachse auf die X-Z-Ebene des Basis KOS. Er ist positiv, wenn das obere Ende der Lenkachse nach hinten geneigt ist. [DIN94] Typischerweise wird das Fahrwerk eines Fahrzeugs wegen stabilisierenden physikalischen Fahreigenschaften immer so ausgelegt, dass eine positive Spreizung und ein positiver Nachlaufwinkel vorliegen.

Abschließend werden der Fahrzeughöhenstand und dessen Bedeutung für die vorgestellten geometrischen Fahrwerkelemente dargestellt. Das Fahrzeugniveau ist für die Erfassung der Fahrwerkgeometriewerte eine wichtige Größe. Sie ist abhängig von dem Einfederzustand des Fahrzeugs. Definiert ist das Fahrzeugniveau über den Höhenstand des Fahrzeugs, der sich zwischen Radmittelpunkt und Kotflügeloberkante ergibt, wie Abbildung 2.13 zeigt. Hieraus ergibt sich für jedes Rad eine Einzelhöhe, die mathematisch über den Fahrzeugschwerpunkt zu einem Gesamtniveau des Fahrzeugs gerechnet werden kann. Auch ein Niveau für die Vorder- bzw. Hinterachse sowie eine Fahrzeugverkipfung kann getrennt festgestellt werden.

Diese Art der Höhenstand-Bestimmung des Fahrzeugs hat sich bei der Fahrzeugproduktion wegen guter äußerer Zugänglichkeit bewährt. Das bedeutet jedoch nicht, dass es die beste Möglichkeit ist, weil die Kotflügelkanten sehr ungenau gefertigt sind und im besten Fall mit einer berührungslosen Messtechnik auf  $\pm 1$  mm detektiert werden können [TEN95]. Weitere Möglichkeiten, den Fahrzeughöhenstand zu messen, sind beispielsweise Referenzpunkte an der Karosserie oder über dem Antriebswellenwinkel. Dieser Winkel an der Fahrzeugachse ändert sich mit dem Fahrzeughöhenstand über den gesamten Federweg und ist für das entsprechende Fahrzeug bekannt. Diese Verfahren werden jedoch in der Produktion nur zu Audits eingesetzt.



**Abbildung 2.13: Spur- und Sturzwinkel in Abhängigkeit vom Fahrzeughöhenstand [DAI10; HEI13]**

Die K0-Lage des Fahrzeugs ist demzufolge ein konstruktives vom Fahrzeughersteller festgelegtes Fahrzeugniveau. Das bedeutet, dass Fahrzeuge mit einer mechanischen Fahrwerkfeder einen festgelegten Einfederungszustand haben, der über eine bestimmte Fahrzeugmasse und über einen genauen Beladeplan bei einem stehenden Fahrzeug auf ebener Straße definiert sind. Bei Fahrzeugen mit einer Luftfederung oder Fahrwerken, die eine Niveaueinstellung vornehmen können, wird die K0-Lage unter gleichen Bedingungen wie vor beschrieben elektronisch über das System angefahren [ISE06, S. 268]. [HEI13]

Wie in Abbildung 2.13 beispielhaft zu sehen ist, sind unter anderem die zuvor beschriebenen Spur-, Sturz- und Nachlaufwinkel vom augenblicklichen Fahrzeugniveau abhängig. Das bedeutet, bei einem ausgefederten Fahrzeug stellt sich für den Spurwinkel Nachspur ein und der Sturzwinkel wird positiv. Wird das Fahrzeug über die K0-Lage eingefedert, richten sich sowohl der Spur- als auch der Sturzwinkel gegen Null. Diese Spur- und Sturzänderungen über den Fahrzeughöhenstand kommen durch die kinematische Auslegung der Fahrzeugachse zustande. Dieses Verhalten trägt zur Fahrstabilität des Fahrzeugs bei. [HE113] Dem OEM sind die konstruktiven Spur- und Sturz-Werte zu jedem Fahrzeugniveau bekannt, dass das Fahrzeug über seinen Federweg erreichen kann. Da diese Werte theoretisch errechnet wurden, verhalten sich die Kurven unter realen Bedingungen nicht linear. Daher ist eine Vermessung der beschriebenen Fahrwerkparameter um die K0-Lage durchzuführen und auch einzustellen. Das setzt beim Messprozess ein eingefedertes Fahrzeug voraus. Für kleinere Höhenstandabweichungen in der K0-Lage, die beispielsweise durch die toleranzbehafteten Fahrwerkfedern entstehen, werden unter anderem die Spur- und Sturzwinkel um die Kurvenwerte eines Diagramms aus Abbildung 2.13 korrigiert.

## 2.3 Eingliederung der Inbetriebnahme in die Fahrzeugproduktion

Folgende Unterkapitel vermitteln einen Einblick in die Inbetriebnahme-Landschaft und deren Betriebs- bzw. Prüfmittel eines OEMs. Zusätzlich wird anhand eines aktuellen Inbetriebnahmebeispiels ein Prozessablauf, der im End-of-Line (EOL) verankert ist, aufgezeigt.

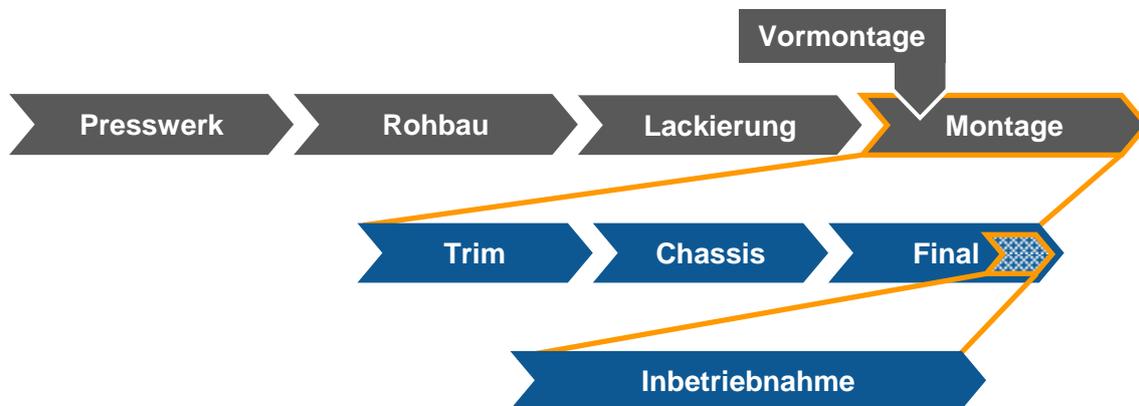
### 2.3.1 Strukturen und Prozesse der Inbetriebnahme

Um zunächst die Bedeutung der Inbetriebnahme besser verstehen zu können, wird nachfolgend der Produktionsprozess im Fahrzeugwerk erläutert und für den Montagebereich immer feiner aufgefächert. Zum Ende des Kapitels wird die Inbetriebnahme detailliert vorgestellt.

Die Automobilproduktion wird in die Bereiche Presswerk, Karosserie Rohbau, Lackiererei und Endmontage unterteilt. Im Bereich des Presswerks werden aus Blechcoils Karosserieteile gestanzt und durch Tiefzieh- und Umformprozesse gefertigt. Beim nächsten Schritt werden im Karosserie-Rohbau die im Presswerk gefertigten Teile zur Gesamtkarosserie gefügt. Da dabei Fügetechniken wie Schweißen, Nieten, Kleben und Verschrauben zum Einsatz kommen, verfügt dieser Bereich des Rohbaus den höchsten Automatisierungsgrad im Fahrzeugwerk. Im Anschluss werden die fertigen Karosserien in der Lackiererei vorbehandelt und lackiert. Nach einer Trocknungsphase in einem Puffer werden die lackierten Karossen in die Endmontage zur Fertigstellung des Automobils sequenziert übergeben. [KLU18]

Die Endmontage verfolgt das Ziel, Fahrzeuge kostengünstig in der gewünschten Qualität und termingerecht zu produzieren. Hinzu kommen Vormontagelinien, die Module, wie zum Beispiel Türen, mit ihrem gesamten Innenleben vormontieren. Diese vormontierten Einheiten werden

der Endmontage zum geeigneten Zeitpunkt „Just in Sequenz“ zugeführt. Die Fahrzeugmontage eines Werks ist wiederum in drei Bereiche Trim, Chassis und Final unterteilt, wie in Abbildung 2.14 zu sehen ist. [GÜN07]



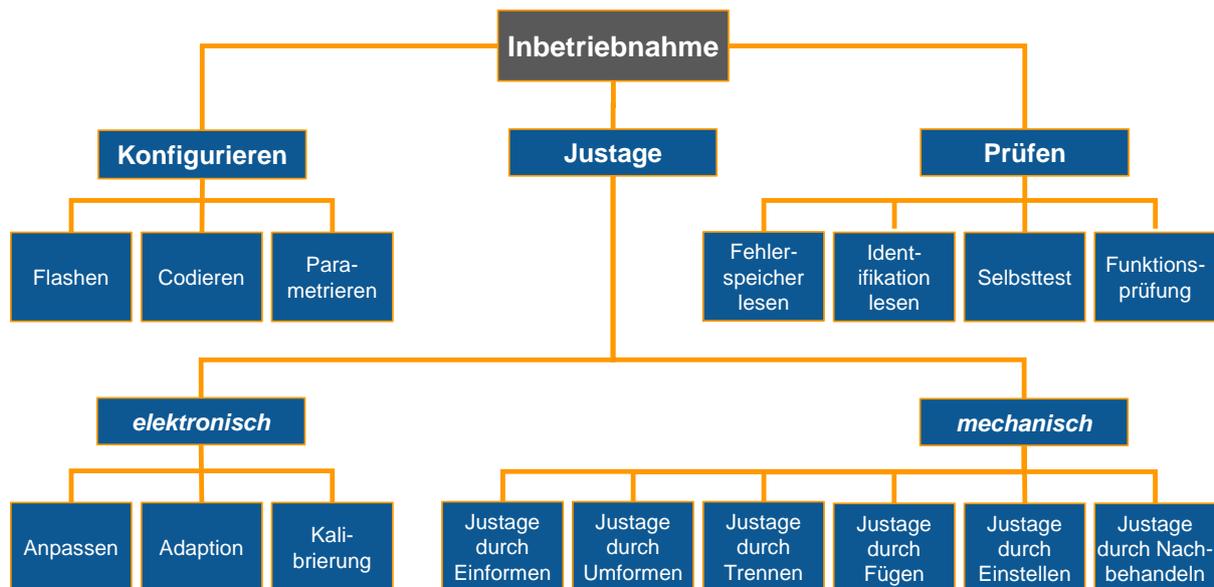
**Abbildung 2.14: Bereiche eines Fahrzeugwerks**

Im Bereich Trim werden Baugruppen aus Vormontagelinien oder von Zulieferern in die lackierte Karosserie eingebaut. Dabei handelt es sich um Kabelbäume, Sitze, Cockpit, Steuergeräte und weitere Elemente im Fahrzeuginnenraum, dem Motorraum und teilweise dem Unterboden. Der Antriebsstrang und das Fahrwerk werden im Chassis Bereich eingebaut. Hier wird die Karosserie mit dem auf einem Werkstückträger vormontierten Fahrwerk und Motor verschraubt. Dieser teilweise sehr komplexe Prozess wird als „Hochzeit“ bezeichnet. Der letzte Bereich im Fahrzeugwerk ist der Final Bereich. In diesem Bandabschnitt werden abschließende Fügevorgänge ausgeführt und das Fahrzeug mit sämtlichen Betriebsstoffen befüllt. [MÜL20a]

In selben Bandabschnitt ist auch der Fahrzeuginbetriebnahme-Bereich angesiedelt. Die Inbetriebnahme ist erforderlich, um das fertig produzierte Fahrzeug auf eventuell vorliegende Montagefehler zu überprüfen und sie gegebenenfalls zu dokumentieren. Dadurch wird eine spätere Produkthaftung des OEMs minimiert bzw. ausgeschlossen. Der Ausdruck Inbetriebnahme umfasst die Gesamtheit aller Tätigkeiten, die das zusammengebaute Produkt entsprechend den Vorgaben in einen betriebsfähigen Dauerzustand versetzt. [MÜL13] Dabei muss die Fahrzeug-Inbetriebnahme im Allgemeinen folgenden Zielstellungen erfüllen: [WEB19, S. 11]

- Nachweis der tatsächlichen Leistungsparameter
- Kurze Inbetriebnahmezeiten und geringe Kosten
- gezielter Know-how-Gewinn über das Produkt
- Beseitigung von Fehlern und Mängeln aus allen Produktionsphasen
- Nachweis der Betriebssicherheit im Kundenbetrieb

Um die zuvor genannten Zielsetzungen in der Fahrzeugproduktion sicherstellen zu können, müssen bei der Inbetriebnahme unterschiedliche Aufgaben umgesetzt werden. Wie die Abbildung 2.15 zeigt, sind die Teilfunktionen in Konfigurieren, Justage und Prüfen unterteilt. [REI15]



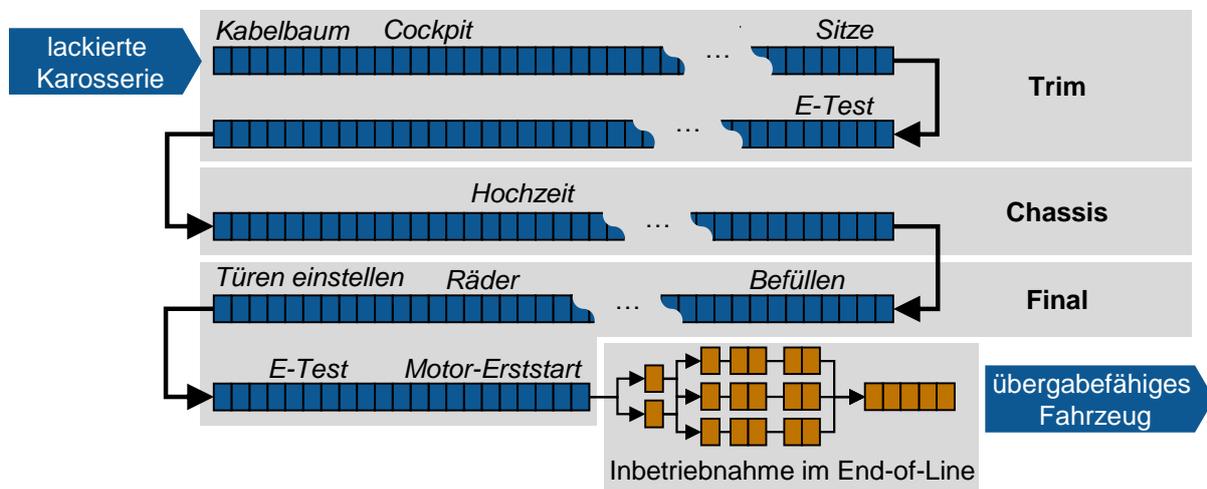
**Abbildung 2.15: Aufgaben und Inhalte einer Inbetriebnahme [REI15; MÜL13]**

Nachfolgend werden diese Teilfunktionen erläutert: [REI15; MÜL20a; MÜL13]

- **Konfigurieren** bezeichnet das Übergeben und Speichern von Werten zur Definition des Betriebsverhaltens. Darunter fällt das Flashen, Codieren und Parametrieren. Beim Flashen werden beispielsweise komplette Anwendungen auf Steuergeräte geladen. Softwareschalter zum Aktivieren oder Deaktivieren von Steuergerätfunktionen werden codiert. Unter Parametrieren wird zum Beispiel das Laden von Parametern auf Steuergeräte verstanden sowie die länderabhängigen Einstellungen der Fahrzeugsoftware.
- **Justage** ist die Gesamtheit aller während oder nach dem Zusammenbau von Erzeugnissen planmäßig notwendigen Tätigkeiten. Das gilt dem Ausgleich fertigungstechnisch unvermeidbarer Abweichungen mit dem Ziel, geforderte Funktionen, Funktionsgenauigkeiten oder Eigenschaften von Erzeugnissen innerhalb vorgegebener Grenzen zu erreichen. Dabei unterscheidet man zwischen elektronischen und mechanischen Justagen. Für die Inbetriebnahme von Umfeldsensoren des Fahrzeugs sind vor allem die elektronischen Justagen relevant. Darunter fällt das Anpassen, Adaptieren und die Kalibrierung. Das Anpassen kennzeichnet die Einschreibung externer Justagewerte und Daten in das Steuergerät. Beim Adaptieren werden beispielsweise bestimmte Zustände angelernt, wie das Erkennen der maximalen oder minimalen Gaspedalstellung. Die Kalibrierung ist der Abgleich von Messgrößen auf die zugeordnete Referenzgröße, wie es beispielsweise bei der Umfeldsensor-Kalibrierung der Fall ist.
- **Prüfen** im Rahmen der Inbetriebnahme versteht sich als Prüfung des fertig- oder teilmontierten Produkts. Dabei können Fehlerspeicher und Identifikationen gelesen wer-

den. Auch eigenständige On-Board Diagnosen gehören dazu. Das kann, je nach Komplexität des Produkts und der Sicherheitsrelevanz der einzelnen Funktionen, von einem kurzen manuellen Ein- und Ausschalten bis hin zu einer automatisierten Überprüfung reichen. Dabei gilt es wertschöpfend zu prüfen, ob die durchgeführten Montageumfänge in der Produktion korrekt ausgeführt worden sind.

Nachfolgende Abbildung 2.16 zeigt noch einmal die gesamte Vernetzungsstruktur einer Automobilendmontage mit den drei Bereichen Trim, Chassis und Final. Wie daraus zu ersehen ist, sind alle Bereiche meistens in Form des Fließprozesses gestaltet. Beim Bandabschnitt Inbetriebnahme ist das aus Gründen der aufwendigen Prüfumfänge nicht möglich, so dass parallele Strukturen angewendet werden. Aus diesem Grund ist das EOL eines Automobilwerks immer sehr kostenintensiv und der OEM ist stets bestrebt, Optimierungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung vorzunehmen.



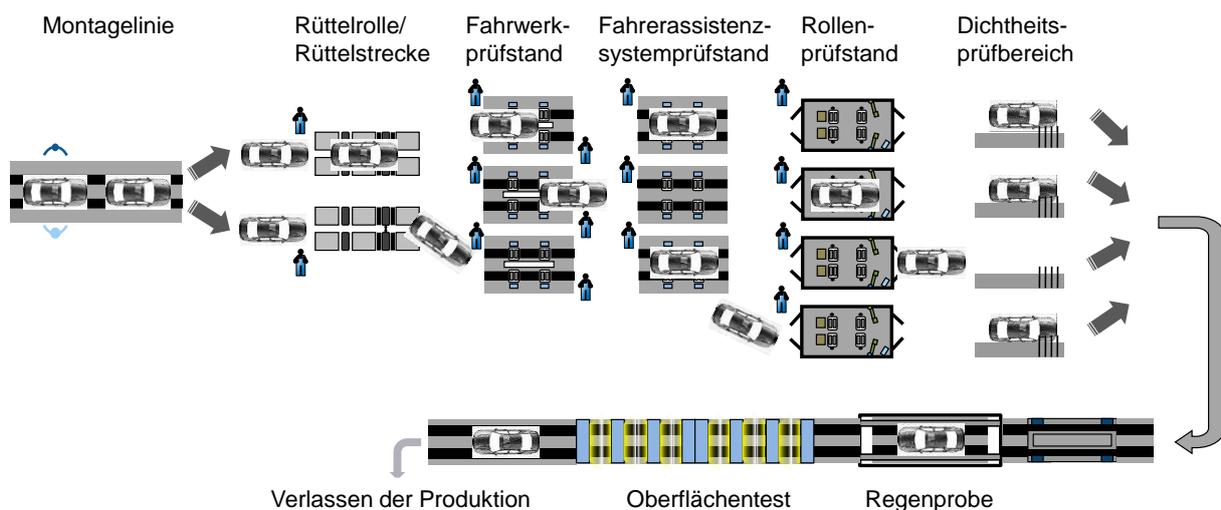
**Abbildung 2.16: Übersicht einer Fahrzeug-Endmontage [MÜL20a]**

Nach Beendigung der Fahrzeugmontage folgen Inbetriebnahmeprozesse verschiedener Art. Das Fahrzeug kommt nach Verlassen der getakteten Montagelinie und nach erfolgtem Motorerstart in die Fahrzeuginbetriebnahme. Aufgrund zeitintensiver Prozesse auf den Prüfständen ist die Linientaktzeit, die zwischen ca. 1 bis 2 Minuten liegt, in der aktuellen Produktion moderner Fahrzeuge nicht einzuhalten. Daher müssen die Linien des EOL in parallele Strukturen aufgefächert werden.

Die parallelen Linienstrukturen führen dazu, dass die notwendigen Prüfmittel mehrmals benötigt werden. Auch die Werkerdichte ist wegen der manuellen Arbeitsumfänge und dem Fahrzeugtransport sehr hoch, da je Prüfstand und Linie 1 bis 2 Werker benötigt werden. Je nach Funktionalität und Ausstattung der Prüfstände kommen demzufolge hohe Investitions- und Betriebskosten auf den Fahrzeughersteller zu. Je nach Vorgehen und Hersteller-Philosophie kann die Ausstattung eines EOL unterschiedlich ausfallen. [OTT17] Abbildung 2.17 zeigt beispielhaft die Struktur eines derartigen Bereichs.

Die wichtigsten Prüfstände in diesem Bereich sind:

- Fahrwerkgeometrieprüfstand
- Fahrerassistenzsystemprüfstand (meistens auch kombiniert mit dem Fahrwerkgeometrieprüfstand)
- Fahrdynamikrolle (Rollenprüfstand)
- Mediendichtheitsprüfbereich
- Regenprobe
- Abschlusskontrollen



**Abbildung 2.17: Beispielhafte Gliederung einer Fahrzeuginbetriebnahme [MÜL20a]**

Auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand werden in erster Linie Parameter wie Spur und eventuell Sturz eingestellt. Diese Fahrwerkeinstellungen sind nach aktuellen Prozessen bei OEMs so ausgelegt, dass sie in einer Zeit von 1,5 bis 3 Minuten abgehandelt werden können. Auf einem nachgelagerten Fahrerassistenzsystemprüfstand werden Kalibrierungen der Umfeldsensoren durchgeführt. Die Basis dafür bildet der Fahrwerkprüfstand, da dort die benötigten Parameter, wie die geometrische Fahrachse, ermittelt werden. Aus diesem Grund können die Sensoren entweder bereits auf dem Fahrwerkprüfstand oder aber auf dem Fahrerassistenzsystemprüfstand kalibriert werden. Die Auslegung ist dabei meistens von den benötigten Prozesszeiten und Arbeitsumfängen auf den Prüfständen abhängig.

Der Fahrwerkeinstellung und den Sensorkalibrierungen ist der Rollenprüfstand nachgelagert. Er wird vor allem für Fahrzeugprüfungen mit konventionellem Antriebsstrang benötigt. Bei einer Fahrt auf den Rollen werden unter anderem der Verbrennungsmotor, das Getriebe und das Bremssystem getestet. [DAN17] Anschließend folgen Prüfstationen für die Mediendichtheit, Fahrzeugdichtheit und abschließende Fahrzeugkontrollen. Diese Prüfstationen werden aufgrund der geringeren Prozesszeit häufig wieder in die Einlinigkeit zusammengeführt.

Nach aktuellen Angaben der OEMs benötigt beispielsweise ein Fahrzeug mit maximaler Ausstattung an unterstützenden Systemen eine Prozesszeit von bis zu 5 Minuten auf einem Prüfstand. Daher ist die Linientaktzeit nicht zu erreichen. Es verbleibt nur die Möglichkeit der parallelen Anordnung der Prüfstände, um die Grundtaktzeit halten zu können.

### 2.3.2 Prüftechnologien des End-of-Lines

Im folgenden Kapitel werden Aufbau und Messtechnik des Fahrwerkgeometrieprüfstands (FWS) und des Fahrerassistenzsystemprüfstands (FAS) näher erläutert, da sie für diese Arbeit relevant sind. Nachstehende Abbildung 2.18 zeigt einen konventionellen Fahrwerkgeometrieprüfstand, wie er heute innerhalb des EOLs mehrfach verbaut ist. Der Fahrwerkgeometrieprüfstand dient in erster Linie der Fahrwerkeinstellung, die ein essentielles Qualitätsmerkmal ist. Dabei handelt es sich um die in Kapitel 2.2 vorgestellten Parameter. Folgende Aufgaben werden daher in der Produktion des EOLs auf diesem Prüfstand verfolgt: [KAU15]

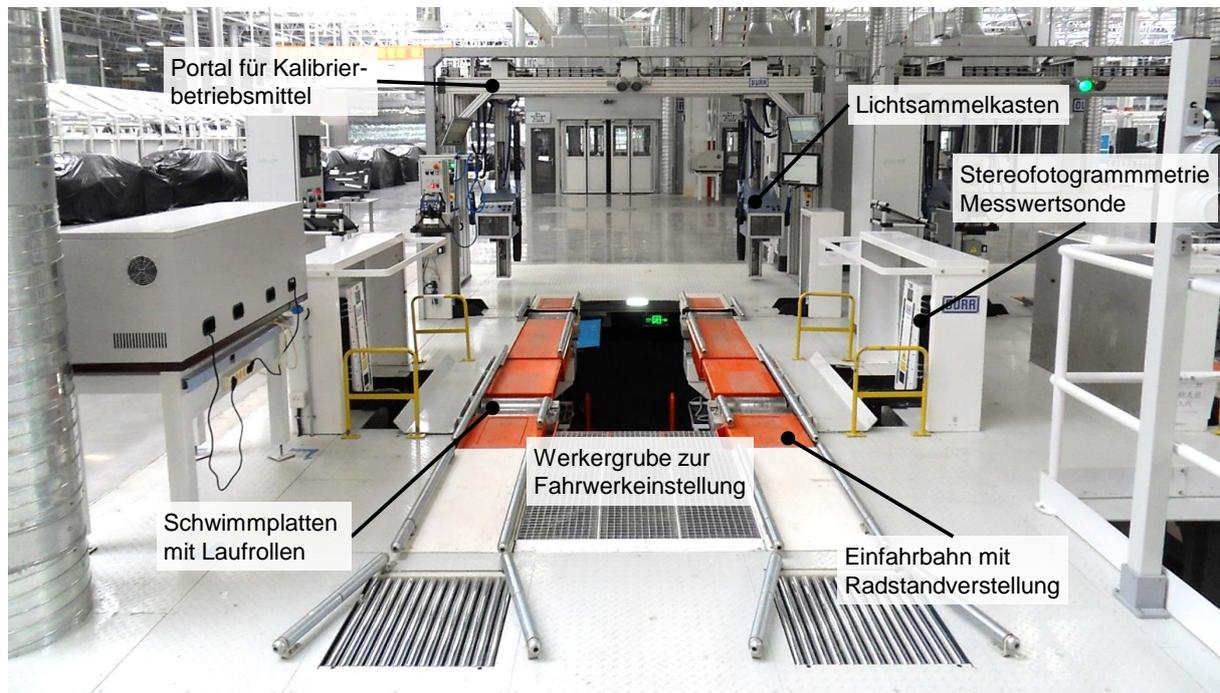
- Sicherstellung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit
- Gewährleistung des Geradeauslaufs der Fahrzeugräder bei exakt horizontaler Lenkradstellung
- Reduzierung des Reifenverschleißes
- Qualitätskontrolle des Fahrzeugzusammenbaus, speziell im Bereich des Fahrwerks
- Kalibrierung des Fahrzeughöhenstands bei aktiven Fahrwerken

Der Prüfstand besteht, wie in Abbildung 2.18 zu sehen ist, aus Einfahrbahnen mit darin verbauten Laufrollen auf Schwimmsplatten, der darunter liegenden Werkergrube und den Messaufnehmern. Diese Elemente bilden die primären Baugruppen. Zusätzlich können je nach Inbetriebnahmeumfänge diverse weitere Betriebsmittelkomponenten verbaut sein. In Abbildung 2.18 ist beispielsweise ein Portal vor dem Prüfstand verbaut. Dort können unterschiedliche Kalibrierbetriebsmittel aufgenommen werden. In diesem Beispiel sind Lichtsammelkästen daran verbaut, die für die Scheinwerfereinstellung, aber auch für die Radarsensoreinstellung für Sensoren des Herstellers Bosch, benötigt werden [TEN20a].

Ein Werker fährt das Fahrzeug über die Einfahrbahnen auf den Prüfstand. Da es sich dabei um unterschiedliche Baumuster einer oder mehrerer Produktionslinien handelt, existieren unterschiedliche Radstände. Durch die Radstandverstellung des Prüfstands passen sich die hinteren Laufrollen an den Radstand des jeweiligen Fahrzeugs an, so dass alle vier Räder in den Laufrollen stehen. Die Laufrollen des Prüfstands sind schwimmend gelagert. Nach dem Einfahren des Fahrzeugs können diese Schwimmebenen freigeschaltet werden. Hierdurch wird eine Entspannung des Fahrwerks erreicht, so dass beim Messvorgang keine Fehler durch Fahrwerkverspannungen entstehen können. Daher sollte der Messprozess reproduzierbar stattfinden.

An jeder Radposition des Prüfstands ist einer der vier Messaufnehmer verbaut, die je nach Hersteller mit unterschiedlichen Messtechniken arbeiten. Die in Abbildung 2.18 dargestellten

Messaufnehmer sind Systeme, die nach dem Stereofotogrammetrie-Prinzip arbeiten. Die unterschiedlichen Arten der möglichen verbauten Messtechniken werden nachfolgend in diesem Kapitel noch näher erläutert.



**Abbildung 2.18: Aufbau eines Fahrwerkgeometrieprüfstands [KAU15]**

Mit Hilfe der vier Messaufnehmer, die einen festen Bezug haben und über eine Kalibrierlehre relativ eingemessen sind, werden die Räder auf den Laufrollen der Schwimmplatten vermessen. Dabei werden der Mittelpunkt des jeweiligen Rades und die Ausrichtung bestimmt, und dadurch ein Radkoordinatensystem für jedes Rad angelegt. Bei der Vermessung wird eine Radumschlagkompensation durch mehrere Messungen bei einer vollen Radumdrehung vorgenommen, um eventuelle Planlauffehler oder Felgenschlag zu kompensieren. Dieser Vorgang wird später noch näher erläutert. Aus den Radkoordinatensystemen lassen sich sowohl die Position des Fahrzeugs im Prüfstand als auch die Fahrwerkgeometrien ermitteln. Zusätzlich sind die Messaufnehmer des Prüfstands in der Lage, den Fahrzeughöhenstand über die vier Kotflügelkanten bestimmen zu können. Aus den aufgenommenen Punkten kann ein Karosseriekoordinatensystem bestimmt werden, das die Lage der Karosserie relativ zu dem Fahrwerk wiedergibt. Daraufhin können die Gesamtspuren an Vorder- und Hinterachse, die Einzelspuren und der Sturz an den Einzelrädern, die Fahrzeugsymmetrieachse, der Dackelauflaufwinkel und die daraus errechnete geometrische Fahrachse des Fahrzeugs, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, aus den ermittelten Daten bestimmt werden.

Innerhalb der EOL Produktion werden auf dem Fahrwerkprüfstand die Einstellarbeiten des Fahrwerks vorgenommen. Je nach Fahrzeughersteller und Fahrwerkausführung werden die Einzelspuren und der Sturz der Räder an Vorder- und Hinterachse eingestellt. In den meisten Fällen werden lediglich die Spurwerte eingestellt, da sie wesentlich enger als der Sturz der

Einzelräder toleriert sind. Die Fahrzeughinterachse wird dabei nur selten eingestellt, da sie im EOL nur schwer zugänglich ist und das mit erhöhten Prozesszeiten verbunden wäre. Um das zu umgehen, haben die meisten OEMs einen Regelkreis für die Hinterachsspureinstellung eingeführt. Dabei wird bei eingeschwungener Produktion ein Vorhaltewert aus den Prüfständen des EOLs in das Achswerk, das die Hinterachsen produziert, übermittelt. Im Achswerk werden dann die vormontierten Achsen auf einen Vorhaltewert voreingestellt. Bei späterer Montage im Fahrzeug ist in fast allen Fällen nur noch eine Überprüfung erforderlich, so dass auf einen zeitintensiven Einstellprozess verzichtet werden kann. Nur bei einer sehr kleinen Anzahl der produzierten Fahrzeuge muss die Hinterachsspur eingestellt werden, weil sie nicht innerhalb der Toleranzvorgaben liegt. [EIL11; EIL15]

Im Gegensatz zur Fahrzeughinterachse muss die Vorderachsspur bei allen OEMs zu hundert Prozent eingestellt werden, da sie sich auf die Fahrzeughinterachse referenziert. Da die Vorderachse keine Achse im Verbund ist, bietet sie keine Voreinstellmöglichkeiten innerhalb eines Regelkreises wie beim Hinterachskörper. Daher wird im Fahrwerkgeometrieprüfstand eine Eingangsmessung durchgeführt, um die Fahrwerksymmetrieachse und die sich darauf beziehenden Geometrien der Hinterachse zu bestimmen. Liegen diese innerhalb der Toleranzvorgaben des OEMs, dann kann die Vorderachsspur zur geometrischen Fahrachse der Hinterachse eingestellt werden.

Bevor der Werker in der Grube des Fahrwerkgeometrieprüfstands die Spurwerte an den Spurstangenköpfen einstellt, muss die augenblickliche Lenkradstellung, d.h. der aktuelle Einschlagwinkel  $\varphi$ , um die Lenkraddrehachse erfasst werden. Das geschieht mit einer sogenannten Lenkradwaage, die den Winkel der Lenkradschiefstellung zu der Horizontalen erfassen kann. Wäre das Lenkrad exakt horizontal ausgerichtet, entspräche es einem Einschlagwinkel  $\varphi$  von Null Grad. In diesem Zustand sollen die vorderen Spurwinkel denen vom OEM vorgegebenen für eine Geradeausfahrt entsprechen. Durch die in das Lenkrad eingelegte Lenkradwaage wird die Schiefstellung erfasst und an den Fahrwerkgeometrieprüfstand gesendet. Dabei wird die Lenkgetriebeübersetzung je Fahrzeugtyp berücksichtigt. Mit erfasster Lenkradschiefstellung und der Lenkgetriebeübersetzung werden die Solleinzelspurwinkel für die aktuelle Lenkradschiefstellung errechnet. Nach der Spureinstellung entspricht daher eine spätere Horizontalstellung des Lenkrades einer Geradeausfahrt des Fahrzeugs. [JAN13]

Zur zuvor beschriebenen klassischen Ermittlung der Lenkradschiefstellung gibt es nach aktuellem Stand der Technik noch weitere Verfahren, die jedoch nicht in der Breite Anwendung finden. Dabei werden bildverarbeitende Messsysteme eingesetzt, die das Lenkrad im Fahrzeug detektieren können. Alle aktuellen Verfahren beruhen auf einem Kamerasystem, das durch die Fahrerscheibe auf das Lenkrad blicken kann. Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen müssen durch Bildverarbeitung Merkmale am Lenkrad erfasst werden. Dazu gibt es folgende Strategien: 1) Projizieren von Lichtlinien auf das Lenkrad und Ermittlung dieser Linien zu einem hinterlegten Muster für eine horizontale Lenkradstellung [AHR13]. 2) Erfassung von Merkmalen, wie Schalter oder Knöpfe am Lenkrad, zu einem hinterlegten Referenzbild des

verbauten Lenkrades aus den CAD Daten des OEMs [PRE17]. 3) Ermittlung eines im Lenkrad befestigten Referenzobjekts mit Hilfe eines Stereokamerasystems [MÜL16]. Alle vorgestellten Verfahren ermitteln die Lenkradschiefstellung und übermitteln diese an den Fahrwerkgeometrieprüfstand. Eine Lenkradwaage ist daher nicht mehr erforderlich. Es müssen aber Referenzobjekte ins Lenkrad eingebracht oder Referenzmerkmale des Lenkrades aus den Herstellerdaten im Bildverarbeitungssystem hinterlegt werden. Durch diese Verfahren wird es ermöglicht, den aktuellen Lenkwinkel bereits innerhalb der Montagelinie dem Fahrzeug mitzuteilen und diesen auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand wieder abzurufen. Das wird erreicht, weil die meisten Fahrzeuge einen Lenkwinkelsensor verbaut haben, der bereits in der Montagelinie mit den zuvor genannten Verfahren kalibriert werden kann. Dieser kann zu einem späteren Zeitpunkt in der Produktion wieder ausgelesen werden. [JAN13; JAN15] Eines der neuen vorgestellten Verfahren wird in das spätere Gesamtkonzept dieser Arbeit einfließen.

Im Anschluss an die Bestimmung des Solleinzelspurwinkels und Erfassung des Isteinzelspurwinkels durch die Messtechnik des Fahrwerkgeometrieprüfstands kann eine manuelle oder automatische Spureinstellung an der jeweiligen Fahrzeugachse erfolgen. Dabei öffnet sich die Grubenabdeckung des Prüfstands, damit ein Zugang zum Fahrzeugunterboden besteht. Bei manueller Einstellung öffnet ein Werker die Kontermutter des Spurstangengelenks und verdreht die Spurstangen solange in positive oder negative Richtung, bis die Visualisierung des Prüfstands ihm anzeigt, dass er im vorgegebenen Toleranzbereich ist. Das setzt eine permanente Messung des Prüfstands bei der Einstellung voraus. Danach wird die Kontermutter mit dem vorgegebenen Drehmoment angezogen. Um beide Einzelspurwinkel einzustellen, wird dieser Prozess für die linke und rechte Spurstange durchgeführt.

Die automatisierte Spureinstellung läuft analog zum manuellen Prozess ab. Dabei befindet sich ein Roboter oder eine kinematische Einheit mit einem speziellen Einstellwerkzeug in der Prüfstandsgrube. Das Werkzeug wird für die Einstellung zur Spurstange geführt. Das kann mittels festgelegter Koordinaten oder über ein optisches Messsystem, das die Spurstangenposition ermittelt, erfolgen. Darauf folgt der Einstellprozess im Regelkreis mit dem Prüfstand. Durch diese vollautomatische Spureinstellung sollen erforderliche Prüf- und Einstellkapazitäten am Bandende reduziert werden. [DÜR15] Diese Einstellform ist jedoch nur dann geeignet, wenn der entsprechende OEM eine permanente Zugänglichkeit zu den Einstellpunkten der Spurstangen, auch über mehrere Modellreihen hinweg, sicherstellen kann.

Um die zuvor beschriebenen Fahrwerkgeometrien auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand ermitteln zu können, benötigt er hochgenaue Messtechniken. Diese haben sich historisch und nach unterschiedlichen Herstellern entwickelt. In Abbildung 2.19 sind die bekannten Messaufnehmer vom Beginn der Fahrwerkmesstechnik bis zum heutigen Zeitpunkt dargestellt.



**Abbildung 2.19: Messaufnehmerarten für die stationäre Fahrwerkvermessung im EOL [SIE10; TEN20b; BUR20; VIS20; POL86]**

Bevor die optische Messtechnik Bedeutung erlangte, wurden die Fahrwerke mit einer berührenden Messtechnik vermessen, wie Abbildung 2.19 oben links zeigt. Das Fahrzeug steht dabei mit seinen Rädern auf Schwimmebenen und die Räder werden taktil angetastet. Um eine Ebene des Rades darstellen zu können, sind drei Messtaster notwendig. Dabei beeinflussen zwei Messtaster links und rechts die Spur in der Horizontalen. Der Mittelwert dieser Beiden, einschließlich dem darüber liegenden Messtaster, beeinflussen den Sturz in der Vertikalen des Rades.

Mit wachsenden Anforderungen an die Genauigkeit und Prozessstabilität der Fahrwerkvermessung kamen optische Messsysteme zum Einsatz. Dabei wurden zuerst Laserlinientriangulationssensoren eingesetzt. Sie nehmen den Linienquerschnitt des Reifens auf und können dadurch Hoch- und Tiefpunkte über eine Mittelwertberechnung ausgleichen. Die Anordnung ähnelt mit drei Sensoren je Rad der taktilen Messtechnik. Es kommt zusätzlich noch ein vierter Sensor je Rad zum Einsatz, der in der Lage ist, die Kotflügelkante und damit den Höhenstand des Fahrzeugs zu bestimmen [TEN95]. Diese Messtechnik ist noch heute bei den OEMs im Einsatz, hat aber, bei großer Varianz innerhalb des Messbereichs, zum Beispiel bei variierenden Felgen und Reifengrößen, erhebliche Nachteile [SIE10].

Auf den Einsatz von Triangulationssensoren folgten Messsonden, die auf dem Prinzip der Stereofotogrammetrie basieren. Die Unterschiede je Hersteller liegen dabei in der Projektionsausführung von Merkmalselementen auf das Rad. Dabei gilt es zu unterscheiden, welches Merkmal gerade projiziert wird. Je nach Hersteller der Messtechnik werden mehrere Linien

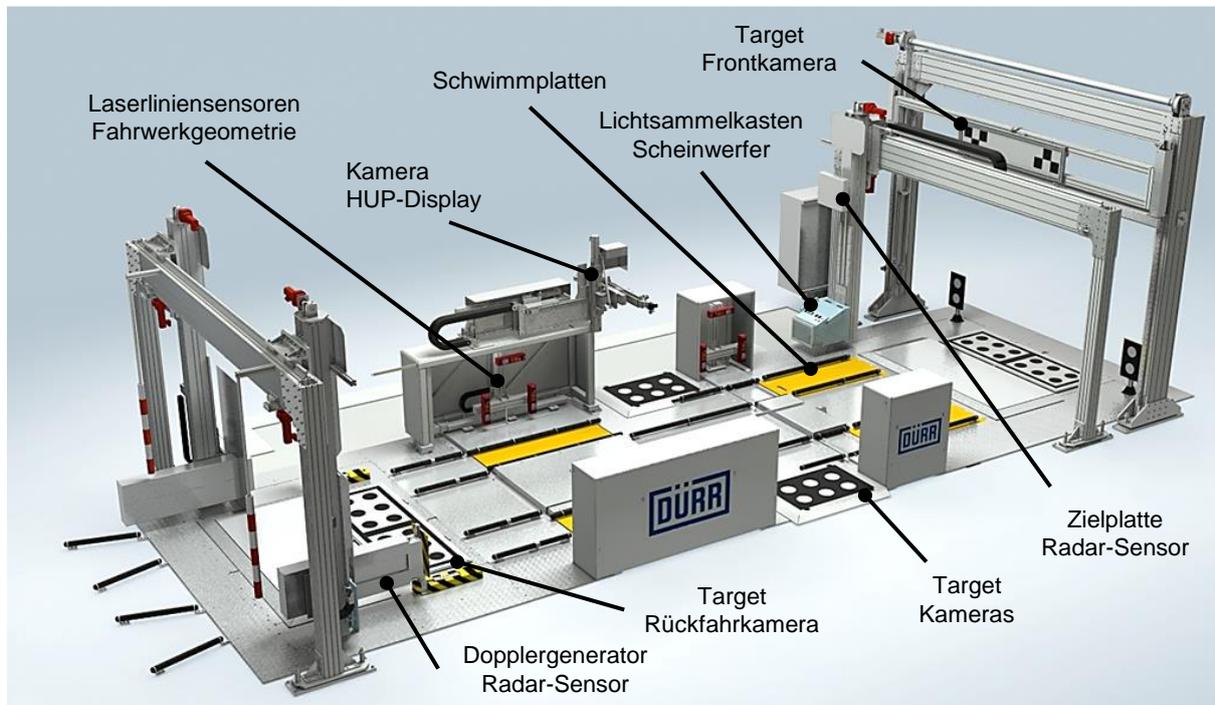
mittels Projektor oder Lasertechnik auf das Rad projiziert, die entweder farblich codiert oder nacheinander ein- und ausgeschaltet werden. Mittlerweile können auch LED Projektoren genutzt werden, um Muster in den Radhausausschnitt des Fahrzeugs zu projizieren. Folglich können mit einer Messsonde pro Rad die Fahrwerkgeometrien und der Fahrzeughöhenstand bestimmt werden. Um auch bei unterschiedlichen Radständen der Fahrzeuge die notwendigen Messdaten des Messausschnitts generieren zu können, werden sämtliche vorgestellten Messtechniken gemeinsam mit der Radstandverstellung des Prüfstands bewegt. [SIE10; TEN06; TEN08]

Da die Fahrwerkgeometrien sich auf das gesamte Fahrzeug beziehen, müssen die Messdaten der einzeln gemessenen Fahrzeugräder und Höhenstände zueinander in Verbindung gebracht werden. Daher ist es notwendig, dass die Messtechnik für eine Berechnung der Daten innerhalb eines gemeinsamen Koordinatensystems arbeitet. Um die Messtechnik auf einen gemeinsamen Bezug zu referenzieren, ist daher die Kalibrierung über einen Kalibrierkörper für den Fahrwerkgeometrieprüfstand unumgänglich. Als Kalibrierkörper wird eine Rahmenkonstruktion genutzt, die in den Prüfstand eingelegt werden kann und dabei starre Fahrzeugachsen im Prüfstand darstellen. Dabei ist die Kalibrierlehre zu ihrem eigenen Koordinatensystem hochgenau vermessen und bringt ihren eignen Datensatz mit. Wenn die Lehre für eine Kalibrierung in den Prüfstand eingelegt ist, messen die zuvor aufgezeigten Messaufnehmer die Flächen der Kalibrierlehre an. Durch einen Abgleich des Lehrendatensatzes mit den Messwerten der Prüfstandsensoren kann für jeden Messaufnehmer eine Transformation des Sensorkoordinatensystems in das Lehrenkoordinatensystem berechnet werden. Nach der Kalibrierung ermitteln somit alle Messsysteme ihre Messwerte zu einer gemeinsamen Referenz, was für eine Fahrzeuggeometrie-Vermessung zwingend erforderlich ist [DÜR17b]. In der laufenden Produktion wird eine Kalibrierung bzw. eine Überprüfung der Kalibrierung täglich oder wöchentlich, meistens zum Produktionsende, durchgeführt.

Nach korrekter Einstellung und Festlegung der Fahrwerkgeometrien erfolgt die Kalibrierung der Umfeldsensoren der Fahrerassistenzsysteme. Diese Arbeiten können dort ausgeführt werden, wo die geometrische Fahrachse bekannt ist. Dazu bietet sich der Fahrwerkgeometrieprüfstand durch Aufrüsten mit benötigten Betriebsmitteln an, um ein Kalibriernormal darstellen zu können. Aufgrund wachsender Kalibrierumfänge und der schwierigen Zugänglichkeiten auf dem Prüfstand ist in den häufigsten Fällen ein separater Fahrerassistenzsystemprüfstand dem Fahrwerkgeometrieprüfstand nachgelagert.

Der Fahrerassistenzsystemprüfstand verfolgt dabei das Ziel, die Vielzahl der verbauten Umfeldsensoren aktueller Fahrzeuge einem Prüf- und Kalibrierprozess zu unterziehen. Dabei muss er flexibel auf die verschiedenen Anforderungen unterschiedlicher Sensorhersteller reagieren, denn es gibt aktuell noch keinen einheitlichen Standard für die Prüf- und Kalibrierung der Fahrzeugsensorsysteme. Beispielsweise müssen Zielplatten mit abweichenden Mustern je Kamerahersteller und -system aufgenommen werden. Gleiches gilt auch für die Kalibrierung der Radarsensoren. [DÜR17a] Hier gibt es verschiedene Kalibrierverfahren, die im folgenden

Kapitel noch beschrieben werden. Für Lidarsysteme gibt es bislang noch wenig verfügbare Kalibriertechnik, da diese Systeme in der Fahrzeugindustrie noch nicht weit verbreitet sind. Daher kann der Fahrerassistenzsystemprüfstand nach auf ihm lastenden Inbetriebnahme- und Kalibrierumfängen different ausgestattet sein. Abbildung 2.20 gibt den beispielhaften Aufbau eines solchen Prüfstands wieder.



**Abbildung 2.20: Beispielhafter Aufbau eines Fahrerassistenzsystemprüfstands [PET17]**

Die einzelnen Teilbetriebsmittel zur Inbetriebnahme der Fahrzeugsysteme können je nach OEM oder Zulieferer der Sensorsysteme sehr unterschiedlich ausfallen oder auch an verschiedene Anforderungen bei der Kalibrierung gebunden sein. Die Kernelemente des Fahrerassistenzsystemprüfstands sind jedoch Portalsysteme, an denen diverse Kalibriereinrichtungen wie Targets befestigt sind, die damit ein Kalibriernormal bilden. In Abbildung 2.20 sind diese biegesteifen Portale vor und hinter dem Prüfstand zu erkennen. Daran sind beispielsweise Targets mit unterschiedlichen Kalibriermustern, Zielplatten, Heizplatten, Lichtsammelkästen oder Dopplergeneratoren befestigt. Diese Einrichtungen können meistens in Y- / Z-Achse und um die Z-Drehachse auf dem Portalsystem bewegt werden. Das ist zum einen notwendig, um das Ein- und Ausfahren des Fahrzeugs auf den Prüfstand sicherzustellen, zum anderen, um die Kalibrierelemente zum geometrischen Bezug des Fahrzeugs im Prüfstand ausrichten zu können. [PET17]

Die bedruckten Targetplatten gehören für die Kalibrierung der Kamerasysteme im Fahrzeug dazu. Aber auch einige aktuelle Lidarsensoren werden durch Bestimmung der Hell- / Dunkel-feldgrenzen mit gedruckten Treppenstufenmustern auf Targetplatten kalibriert [TEN20a]. Des Weiteren können die Targets für eine Kalibrierung der Fahrzeugnachtsichtkameras auch mit Heizspiralen bestückt sein. Zielplatten und Dopplergeneratoren dienen zur Kalibrierung der

Radarsensoren LRR und MRR. Die Verfahren werden im nächsten Kapitel noch genauer beschrieben. Der Lichtsammelkasten dient zur Justage der Scheinwerfer, aber auch er kann je nach System für die Radarsensor-Kalibrierung mitgenutzt werden. Er wird dabei vor den jeweiligen einzustellenden Scheinwerfer positioniert und zu einem Referenzbezug ausgerichtet. Eine Fresnel-Linse bündelt dabei die Lichtstrahlen des Scheinwerfers und bildet sie auf einer Mattscheibe ab. Eine Kamera im Lichtsammelkasten erfasst die Abbildung der Hell- / Dunkel-feldgrenzen und kann daher die Ausrichtung des Scheinwerfers für eine manuelle oder automatische Einstellung erfassen. [MÜL20a]

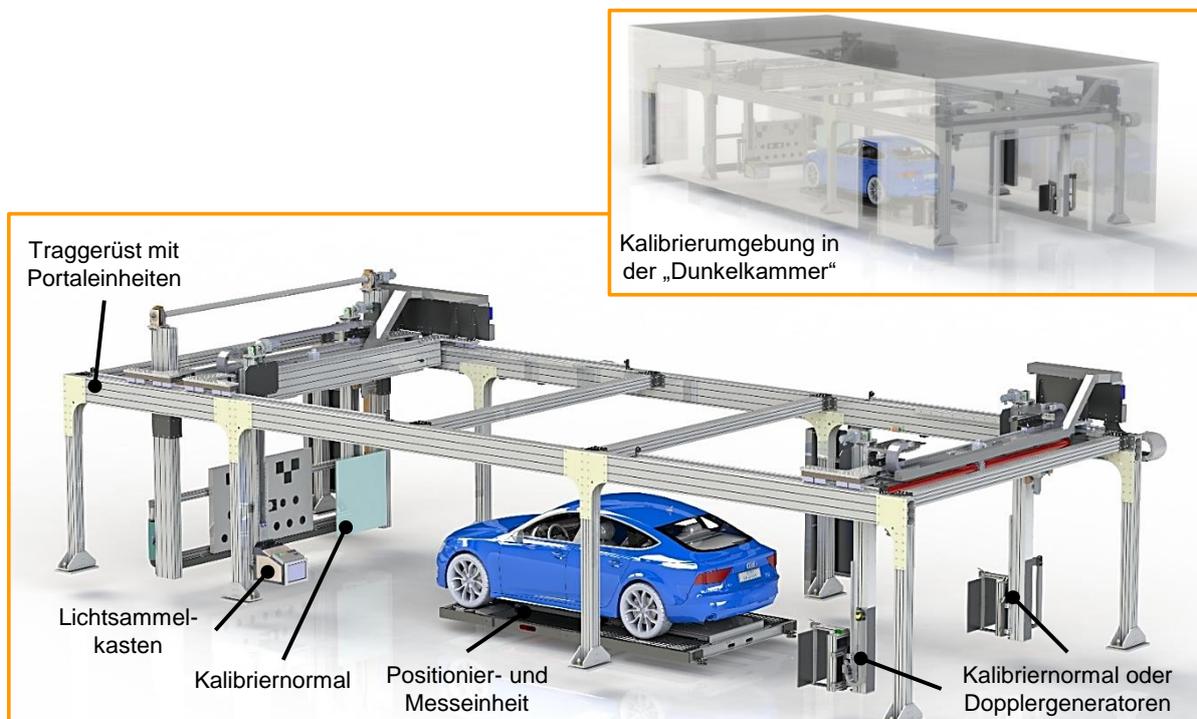
Da sich alle genannten Kalibrierungen auf die geometrische Fahrachse beziehen, müssen, wie beim Fahrwerkgeometrieprüfstand, die Fahrwerkgeometrien erfasst werden. [GEH18] Dazu hat der Prüfstand Schwimm- und Positioniereinheiten, um das Fahrzeug in eine spannungsfreie Fixposition auf dem Prüfstand zu positionieren. Auch die Messtechnik an den Fahrzeugrädern ist wie beim Fahrwerkgeometrieprüfstand vorhanden. Dabei kann die Messtechnik je nach Gesamtsystemaufbau unterschiedlich ausgeführt sein. Da die geometrische Fahrachse als Referenzbezug ermittelt werden muss, sind die Spurwinkel der Hinterachse und der aktuelle Höhenstand von Bedeutung. Aus diesem Grund ist das dargestellte Messsystem in Abbildung 2.20 mit drei Laserlinientriangulationssensoren je Fahrzeugrad ausgestattet. Dabei sind die zwei unteren in der Lage, den Spurwinkel und der obere den Höhenstand über die Kotflügelkante zu erfassen. Ein vierter Sensor, wie beim Fahrwerkgeometrieprüfstand zur Ermittlung des Sturzwinkels oder der Radebene für eine Felgenschlagkompensation, wird nicht benötigt.

Da die Messsysteme für den Fahrwerkgeometrieprüfstand und dem nachgelagerten Fahrerassistenzsystemprüfstand benötigt werden, können die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten für den OEM sehr hoch sein. Es gibt aber noch eine weitere Messtechnikvariante für den Gesamtsystemverbund. Bei einem vorgelagerten Fahrwerkgeometrieprüfstand werden bereits bei der Fahrwerkeinstellung sämtliche geometrischen Werte des Fahrzeugs ermittelt. Dazu gehört auch die Ausrichtung der benötigten geometrischen Fahrachse innerhalb des Prüfstandkoordinatensystems. Wird diese Ausrichtung der Achse mit einem Merkmal, beispielsweise an der Karosserie des Fahrzeugs, verknüpft, ist die Ausrichtung zu diesem Merkmal bekannt. Das ist gegeben, da nach dem Fahrwerkgeometrieprüfstand die Einstellung des Fahrwerks fix ist und sich über nachfolgende Produktionsprozesse nicht mehr ändert. Folglich kann die Ausrichtung der geometrischen Fahrachse, beispielsweise an ein Merkmal der Fahrzeugkarosserie „angeheftet“, in den Folgeprüfstand mitgegeben und dort wieder ausgelesen werden.

Ein derartiges Merkmal ist der Hochpunkt der Kotflügelkanten, die für die Höhenstandmessung des Fahrzeugs mit den oberen Messwertaufnehmern erfasst werden. Mit Hilfe der vier Hochpunkte kann das Karosseriekoordinatensystem ermittelt und darin die Ausrichtung der geometrischen Fahrachse bereits auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand bestimmt werden. In dem

darauf folgenden Fahrerassistenzsystemprüfstand wird daher nur ein Messwertaufnehmer benötigt, der die Hochpunkte je Kotflügel wieder bestimmt. Durch die nachgelagerte Bestimmung des Verschiebevektors kann die aktuelle Ausrichtung der geometrischen Fahrachse auf dem Prüfstand bestimmt werden. Dadurch lassen sich die Kosten für die Anschaffung der Prüfstandsyste me einsparen. Dieses Verfahren ist jedoch nur anwendbar, wenn eine fixe Position auf dem stationären Prüfstand gegeben ist.

Da immer mehr Sensoren der Assistenzsysteme im Fahrzeug kalibriert werden müssen, werden von den Prüfstandherstellern auch Neuentwicklungen auf den Markt gebracht. Dabei stehen die Flexibilität, um auf ständig neue Fahrzeugsensoren reagieren zu können und das Fehlervermeidungspotenzial, im Vordergrund. Große Portalsysteme sollen sämtliche zu kalibrierende und überprüfende Fahrerassistenzsysteme im Fahrzeug aktiv überprüfen können. Dies soll durch bewegte Targets im Raum realisiert werden, um für die Fahrzeugsysteme aktive Fahrsituationen zu simulieren. [KIM14]



**Abbildung 2.21: Beispielhafter Aufbau eines zukünftigen Fahrerassistenzsystemprüfstands um das Fahrzeug [TEN20a]**

Da eine derartige Überprüfung der Systeme zur Vermeidung menschlicher Fehler vollständig automatisiert sein soll, gibt es abgeschottete Prüfstände, die in einer Dunkelkammer agieren. Die Abbildung 2.21 zeigt beispielhaft diesen Prüfstands Aufbau. Neben der größtenteils automatisierten Prüfung der Systeme gibt es auch keine Einwirkung von Fremdlicht. Dadurch sollen Fehler, die aktuell immer wieder bei der Kalibrierung und Überprüfung der Systeme auftreten, vermieden werden, wie in Kapitel 2.4. aufgezeigt. Speziell bei der Kalibrierung von optischen Sensoren ist die streulichtarme Umgebung von Vorteil, da Targets gezielt beleuchtet werden können. [PET16]

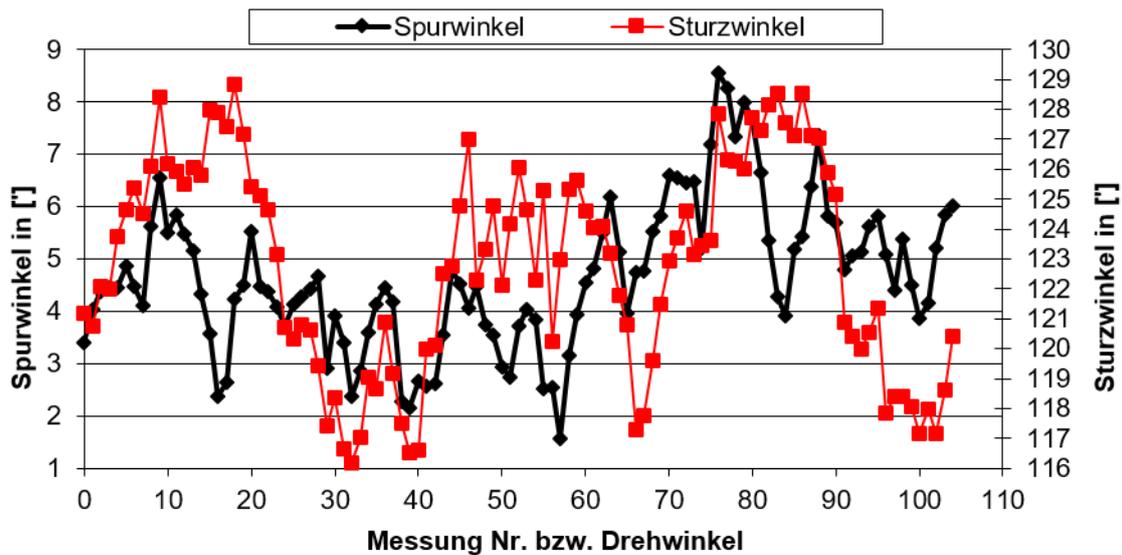
Bislang sind diese Prüfstandsysteme für Fahrerassistenzsystem-Inbetriebnahmen bei einem OEM nicht im Einsatz. Die Technik trägt zur flexiblen Inbetriebnahme der Fahrzeugsensorsysteme bei, die Effizienz geht aber aufgrund der hohen manuellen Rüst- und Prozesszeiten wie bei den aktuellen Prüfständen verloren. Hinzu kommt der hohe Platzbedarf für die Prüftechnik im EOL, das ohnehin schon an seine Auslastungsgrenzen kommt.

### 2.3.3 Aktuelle Inbetriebnahmeprozesse am Beispiel der Umfeldsensorik

In diesem Kapitel werden die wichtigsten unterschiedlichen Prozesse vorgestellt, die auf den beschriebenen Prüfständen stattfinden. Bevor die Inbetriebnahmeprozesse auf dem Fahrerassistenzsystemprüfstand stattfinden können, müssen die Fahrwerkgeometrien vermessen werden. Wie zuvor ausgeführt, werden diese auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand gemessen und später auf den Fahrerassistenzsystemprüfstand mitgenommen. Bei der Vermessung der Spur- und Sturzwinkel der Einzelräder können die Radebenen und damit die Radkoordinatensysteme nicht direkt bestimmt werden. Das liegt am Spielraum, den das Rad in seinen Freiheitsgraden hat, aber auch an der Beschriftung des Reifengummis und den Felgen, die keine hochgenauen Planlaufeigenschaften besitzen. Für eine optimale Messung müsste das Fahrzeugfahrwerk ohne Räder direkt an den Fahrzeugradnaben gemessen werden, um die negativen Einflüsse auf die Messung zu minimieren. Da das Fahrzeug im EOL bereits final montiert ist und auf seinen eigenen Rädern steht, ist eine Vermessung nur mit Rädern möglich. Um die genannten Einflüsse aus der Messung ermitteln zu können, muss eine Radumschlagmessung oder auch Felgenschlagkompensationsmessung genannt durchgeführt werden.

Bei der Radumschlagmessung wird jedes Rad auf dem Prüfstand um  $360^\circ$  gedreht und dabei mehrere Messungen durchgeführt. Beispielsweise werden alle  $5^\circ$  der Raddrehung ein Schnitt über das Reifenprofil aufgenommen. Dadurch ergäben sich 72 Einzelmessungen. Bei jeder Einzelmessung werden dabei die Radebene, der Radmittelpunkt und das Radkoordinatensystem bestimmt. Durch die ermittelten Werte wird bei jeder Messung auch die Position des Fahrzeugs im Prüfstand berechnet. Das ist wichtig, weil sich das Fahrzeug aufgrund der synchron angedrehten vier Räder im Prüfstand auf den Schwimmlatten bewegen könnte und sich damit die Symmetrieachse des Fahrzeugs bei jeder Messung verändert. Daher ist es wichtig, dass die Messsysteme im gleichen Aufnahmetakt arbeiten und alle vier Messaufnehmer an den vier Rädern bei einer Messung gleichzeitig getriggert werden. [TEN20b]

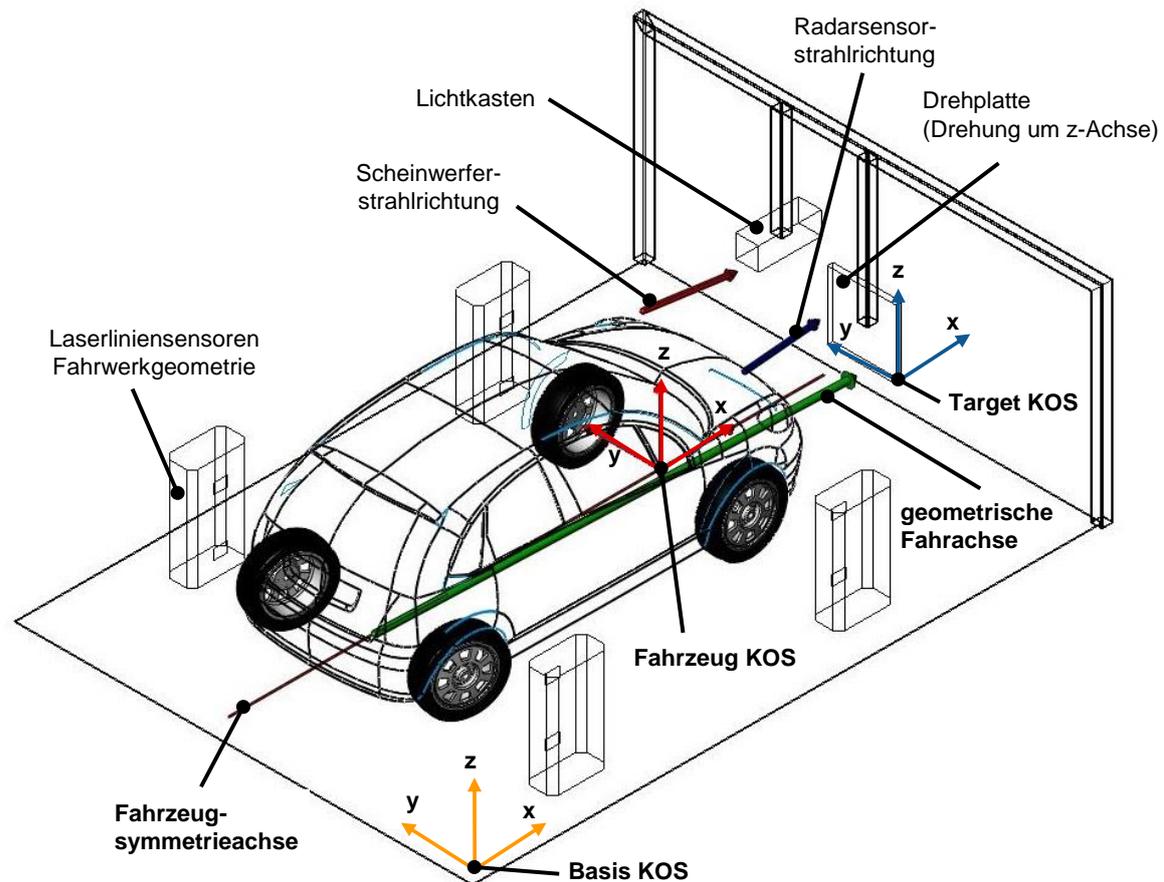
Aus den aufgenommenen Messwerten einer oder mehrerer Raddrehungen lassen sich zu jeder Einzelmessung die Spur- / Sturzwinkel und auch alle weiteren Fahrwerkparameter berechnen. Abbildung 2.22 zeigt in einem Diagramm die Spur- und Sturzwinkel, aufgetragen über die Anzahl der Messungen bzw. über den Drehwinkel des Rades. Dabei ist zu erkennen, dass die Amplitude für den Spurwinkel ca. 8 Winkelminuten beträgt. In der realen Produktion liegt diese Amplitude zwischen 5 bis 30 Winkelminuten. Aufgrund der geforderten Messgenauigkeit der OEMs von teilweise unter einer Winkelminute, wäre daher nur eine Messung am Fahrzeugrad in nur einer Position undenkbar.



**Abbildung 2.22: Radumschlagmessung mit Laserlinientriangulationssensoren [TEN20b]**

Die Messkurven, analog zu denen aus dem Diagramm der Abbildung 2.22, existieren nach jeder Radumschlagmessung für jedes Fahrzeugrad. Aus den über eine Raddrehung ermittelten Kurven kann der Mittelwert für Spur- und Sturzwinkel des Rades bestimmt werden. Aus der Summe der Einzelspuren an der Hinterachse ergibt sich deren Gesamtspur. Die Winkelhalbierende der Gesamtspur an der Hinterachse gibt die Ausrichtung der geometrischen Fahrachse zur Hinterachsensymmetrie wieder. Wenn die Ausrichtung der geometrischen Fahrachse durch Vermessung innerhalb des Prüfstands oder durch Mitnahme der Daten von einem anderen Prüfstand über ein Fahrzeugmerkmal, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, bekannt ist, kann die Kalibrierung der Umfeldsensoren erfolgen.

Die Umfeldsensoren des Fahrzeugs wurden bereits beim Zulieferer einer intrinsischen Kalibrierung unterzogen. Dabei wurde ein Sensorkoordinatensystem angelegt, in dem spezifische Messpunkte des Sensors ermittelt und als Datensatz auf dem Sensorsystem hinterlegt werden. Beim OEM wird auf dem Fahrerassistenzsystemprüfstand die extrinsische Kalibrierung des jeweiligen verbauten Sensors zum Fahrzeug durchgeführt. Dabei müssen die Strahlrichtung der Sensoren zu der geometrischen Fahrachse kalibriert werden. Abbildung 2.23 zeigt die Achsen, die zueinander kalibriert werden müssen. Bei einem Fernbereichsradar LRR muss beispielsweise eine Kalibrierung des Sensors im Elevations- und Azimutwinkel durchgeführt werden. Dazu muss ein Kalibriernormal zur geometrischen Fahrachse ausgerichtet werden, damit der Radarsensor im Fahrzeug seine Nullposition als Offset anlernen kann. Vorgegebene Toleranzwerte für die Ausrichtung des Kalibriernormals zu der geometrischen Fahrachse liegen im Azimut bei  $90^\circ \pm 0,05^\circ$ , was  $\pm 3$  Winkelminuten entspricht. [DAI19] Die Ausrichtung des Kalibriernormals zu der Fahrbahn liegt in der Elevation bei  $90^\circ \pm 0,1^\circ$ , was  $\pm 6$  Winkelminuten entspricht. [GRE18, S. 122]



**Abbildung 2.23: Ausrichtung von Produkt und Betriebsmitteln bei der Kalibrierung auf dem Fahrerassistenzsystemprüfstand [TEN20b]**

Als Kalibriernormal können unterschiedliche Betriebsmittel je nach Sensorhersteller genutzt werden. Für die Kalibrierung der Sensoren kommen aktuell folgende Techniken zum Einsatz: [TEN20a]

### Fernbereichsradar LRR

- Drehplatte
  - Eine Metallplatte wird vor dem Fahrzeug im Azimut zur geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs, im Prüfstand durch die Drehung um die Z-Achse rechtwinklig ausgerichtet. Ihre Elevation, Drehung um die Y-Achse, ist fix zur Prüfstandfahrbahn angegeben. Erkennt der Sensor die Platte als Primärziel unter einem Winkel, wird dieser Wert als Offset auf dem Sensor gespeichert. Das ist möglich, weil bei der vorgegebenen Prüfstandsituation der Sensor das Ziel bei  $0^\circ$  detektieren soll.
- Umlenkspiegel mit Radarreflektor (Cornerreflektor)
  - Ein Umlenkspiegel wird vor dem Fahrzeug im Azimut zur geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs, im Prüfstand durch die Drehung um die Z-Achse rechtwinklig ausgerichtet. Ihre Elevation, Drehung um die Y-Achse, ist fix zur Prüf-

standfahrbahn angegeben. Oberhalb des Umlenkspiegels ist ein Cornerreflektor befestigt. Die Sensorstrahlen treffen durch den Umlenkspiegel auf den Cornerreflektor und werden an den Radarsensor zurück reflektiert. Dabei wertet er das reflektierte Sensorsignal aus, woraus ein Offset für die Kalibrierung errechnet wird.

- Hilfsspiegel
  - Der Lichtsammelkasten wird vor dem Fahrzeug im Prüfstand positioniert. Dabei ist seine Position zur geometrischen Fahrachse im Prüfstand bekannt. Auf dem Radarsensorgehäuse befindet sich ein Referenzspiegel, zu dem die Sensormesszelle bereits intrinsisch beim Zulieferer kalibriert worden ist. Aus dem Lichtsammelkasten leuchtet eine Punktlichtquelle auf den Referenzspiegel, die in den Lichtsammelkasten zurückgeworfen und erfasst wird. Die Differenz zwischen ausgesendetem und reflektiertem Lichtstrahl bildet das Offset für die Kalibrierung des Radarsensors.

### Mittelbereichsradar MRR

- Dopplergenerator
  - Die Dopplergeneratoren dienen unter anderem zur Kalibrierung der MRR Sensoren, die im Fahrzeugheck für die Spurwechselsysteme benötigt werden. Dabei werden die Dopplergeneratoren hinter dem Fahrzeug positioniert, deren Position zur geometrischen Fahrachse im Prüfstand bekannt ist. Die Dopplergeneratoren simulieren folglich künstliche Zielobjekte, die von den Radarsensoren des Fahrzeugs erfasst werden. Die Zielobjekte werden entsprechend zur geometrischen Fahrachse dargestellt. Demgemäß sind die erfassten Radarsensordaten die Offsetwerte zur Kalibrierung der Radarsensoren.

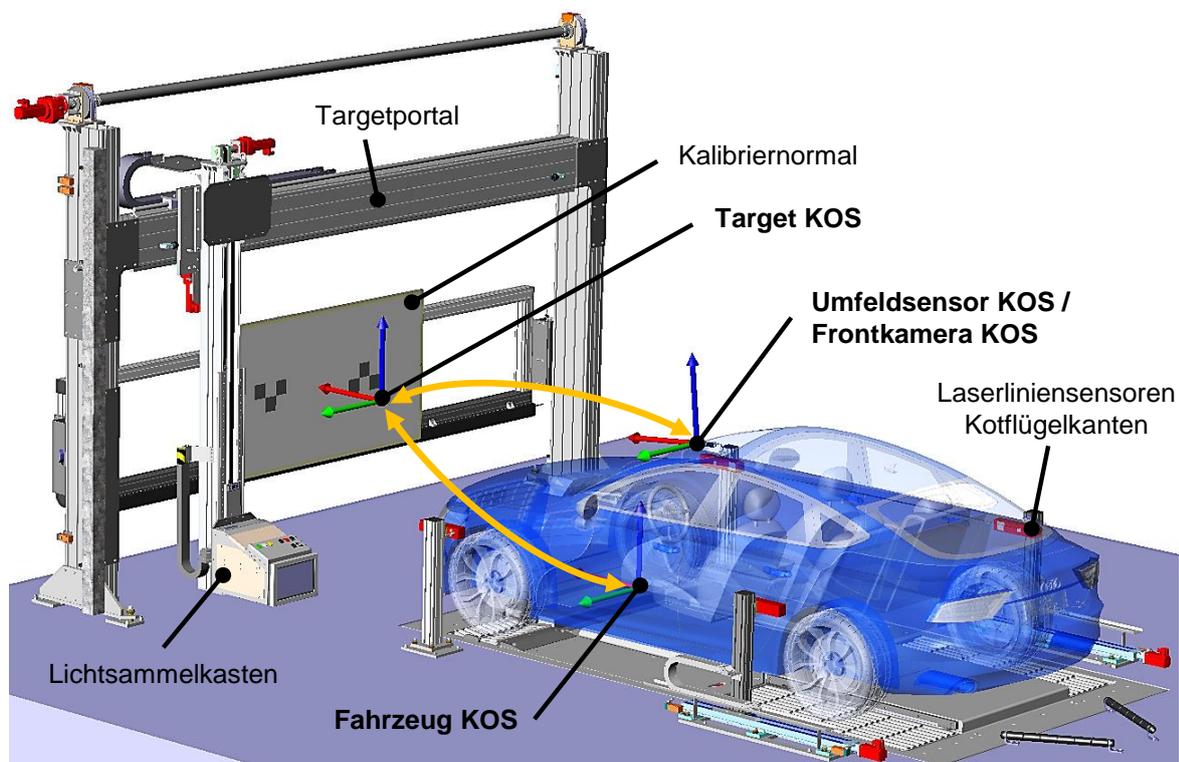
### Kamera

- Referenzzielplatte mit Kalibriermustern
  - Ein Referenztarget nach Vorgabe des Kamerasystemherstellers wird im Sichtfeld der Kamera positioniert. Dabei ist seine Position zur geometrischen Fahrachse im Prüfstand bekannt. Die Fahrzeugkamera macht ein Bild des Referenztargets mit seinem aufgedruckten Kalibriermuster und vergleicht es mit dem Referenzbild aus der intrinsischen Kalibrierung. Daraus wird die Verschiebung der aktuellen Kameraposition zu der vorgegebenen Targetposition errechnet. Damit kann der Offsetwert für das Kamerasystem bestimmt und abgespeichert werden.

## Lidar

- Referenzzielplatte mit Stufenmustern
  - Ein Referenztarget nach Vorgabe des Lidarsystemherstellers wird im Sichtfeld des Lidarsensors positioniert. Dabei ist seine Position zur geometrischen Fahrachse im Prüfstand bekannt. Der Lidarsensor scannt dabei das Treppenmuster durch Unterscheidung der Hell-/Dunkelfeldgrenzen und der damit verbundenen Laufzeitmessung. Daraus wird die Verschiebung der aktuellen Lidarsensormposition zu der vorgegebenen Targetposition errechnet. Damit kann der Offsetwert für das Lidarsensorsystem bestimmt und abgespeichert werden.

Bei den vorgestellten Sensorkalibrierungen erfolgt immer ein Abgleich der Koordinatensysteme untereinander. Abbildung 2.24 zeigt den Zusammenhang der Koordinatensysteme bei einer extrinsischen Kalibrierung am Beispiel einer Frontkamera-Kalibrierung.



**Abbildung 2.24: Schema einer extrinsischen Frontkamera-Kalibrierung [TEN20a]**

Das Fahrzeug befindet sich im Prüfstand auf einer Schwimm- und Zentriereinrichtung. Das gezeigte Messsystem für die Fahrwerkgeometrien dient zum Anmessen der Kotflügelkanten als Merkmal zur Mitnahme der Geometriedaten aus dem Fahrwerkgeometrieprüfstand, wie zuvor beschrieben. Vor dem Fahrzeug in Abbildung 2.24 befindet sich ein Targetportal mit Lichtsammelkasten und Zielplatte. Die Referenzzielplatte bildet das Kalibriernormal für die Frontkamera-Inbetriebnahme. Die Sensorkoordinatensysteme des Prüfstands und das Koordinatensystem der Zielplatte auf dem Targetportal sind durch eine Kalibrierlehre in Bezug zueinander gebracht und innerhalb des Lehrenkoordinatensystem bekannt. Dadurch kann das Fahrzeugkoordinatensystem beim Vermessen des Fahrzeuges bestimmt werden, das durch die

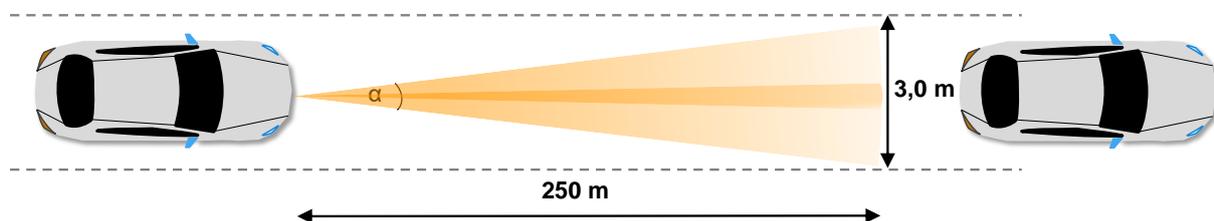
bekannte Transformation auch im Koordinatensystem der Zielplatte bekannt ist. Daher ist klar, wie die geometrische Fahrachse des Fahrzeugs sich zur Zielplatte verhält.

Die Kamera wurde bereits intrinsisch zu einem Referenzbild kalibriert und ein Kamerakoordinatensystem gebildet. Dieses ist jedoch in Bezug zum Fahrzeug noch nicht bekannt. Durch Aufnahme eines Zielplattenbildes mit der extrinsisch zu kalibrierenden Kamera kann die Koordinatensystemverschiebung und –drehung des Kamerakoordinatensystems zum Targetkoordinatensystem bestimmt werden. Demzufolge sind sämtliche Bezüge untereinander angeleitet, die für die Kalibrierung dieser Systeme notwendig sind.

Einige OEMs kalibrieren ihre Umfeldsensoren nicht zur geometrischen Fahrachse, sondern zur Karoseriesymmetrieachse. Dazu müssen weder Daten vom Fahrwerkgeometrieprüfstand mitgenommen werden, noch muss ein komplettes Messsystem vorhanden sein. Es ist ausreichend, die vier Kotflügelkanten wie in Abbildung 2.24 zu erfassen. Dadurch können Investitions- und Betriebskosten eingespart werden. Das setzt jedoch voraus, dass die Toleranzgrenzen für die Kalibrierung der Systeme groß genug gewählt werden. Des Weiteren muss eine akzeptable Reproduzierbarkeit zwischen der geometrischen Fahrachse und der Karoseriesymmetrieachse des produzierten Fahrzeugs liegen. Diese Toleranzen können aufgrund der zukünftigen Anforderungen an die Systeme wohl nicht mehr gehalten werden, was im nächsten Kapitel dargestellt wird.

## 2.4 Aktuelle und zukünftige Anforderungen an das Bandende

In diesem Unterkapitel sollen die Anforderungen an das Bandende und die damit verbundenen Problematiken dargestellt werden. Dabei werden jeweils das Produkt, der Inbetriebnahmeprozess und das aktuell verwendete Betriebsmittel betrachtet. Nachfolgend werden die Anforderungen für ein Fernbereichsradarsystem LRR aufgezeigt. Der Fernbereichsradarsensor stellt unter anderem aufgrund der großen Entfernungsmessung, die er bewerkstelligen muss, ein Extremszenario für die Kalibrierung des Systems dar. Die Abbildung 2.25 macht das deutlich.



**Abbildung 2.25: Einfluss der Umfeldsensor-Kalibrierung auf die korrekte Kundenfunktion**

Aktuelle LRR Sensoren haben einen üblichen Detektionsbereich von 250 Metern. Zukünftige Systeme sollen mittels eines Fernlaserradars sogar einen Erfassungsbereich von 500 Metern haben [FLÖ20]. Das wird jedoch mit einer Herausforderung an die Kalibrierung des Systems verbunden sein. Damit der Radarsensor ein Objekt direkt vor dem Fahrzeug detektieren kann,

ist es wichtig, dass die ausgesendete Radarkeule auf die Fahrspur gerichtet ist, in der sich das Fahrzeug bewegt. Eine falsche Ausrichtung könnte dabei fatale Folgen haben, was für ein verkehrssicheres Fahrzeug inakzeptabel ist. Typische Messgenauigkeiten eines solchen Radarsensors liegen bei  $\pm 0,3^\circ$  bei einer Sichtrichtung von  $0^\circ$  [CON14]. Die aktuelle Kalibrierung des Sensors liegt bei einer bestmöglichen Genauigkeit von  $\pm 0,05^\circ$  [GRE18]. Aus diesem Grund kann ein gesamter Ungenauigkeitsfehler von zweifach  $0,3^\circ$  durch den Radarsensor selbst und zweifach  $0,05^\circ$  durch die Kalibrierung entstehen. Um den Erfassungsbreitenfehler des Gesamtverbundes in der maximalen Detektionsweite von 250 Metern zu bestimmen, werden sie zusammen mit den Winkelfehlern in folgende Formel 2 eingesetzt. [OTT20]

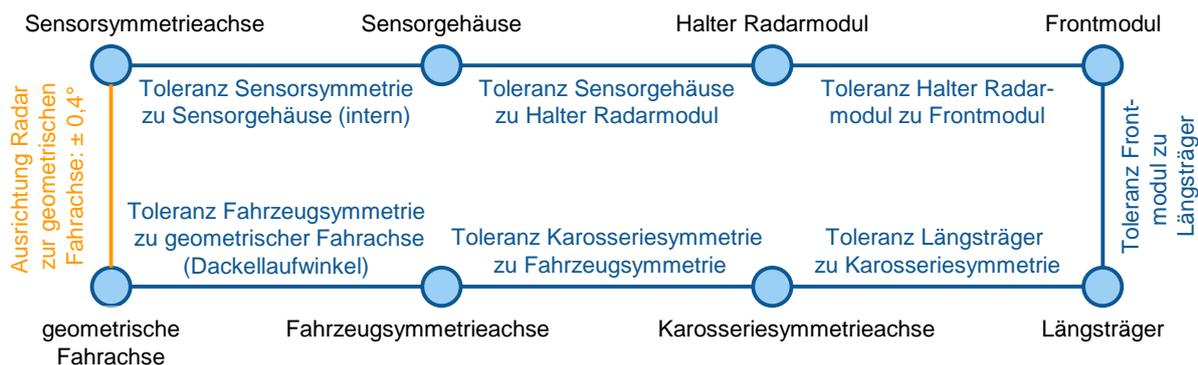
$$\begin{aligned} \text{Messungenauigkeit des Sensors} &= 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot \text{Erfassungsweite} & (2) \\ &= 2 \cdot \tan(0,3^\circ) \cdot 250 \text{ m} \approx 2,6 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Messungenauigkeit der Kalibrierung} &= 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot \text{Erfassungsweite} \\ &= 2 \cdot \tan(0,05^\circ) \cdot 250 \text{ m} \approx 0,4 \text{ m} \end{aligned}$$

Aus der Berechnung ergibt sich in 250 Metern Entfernung ein Fehler von 2,6 Metern durch den Sensor und 0,4 Meter durch die Kalibrierung. Dadurch kommt ein Messfehler in der Summe von 3 Metern zu Stande, wie die Abbildung 2.25 zeigt. Damit ist die Kundenfunktion, zu deren Erfüllung der Sensor beiträgt, gerade noch realisiert, denn der Erfassungsbereich liegt noch innerhalb der Fahrbahnbreite. Würde man gleiche Werte auf einen Radarsensor mit 500 Metern Erfassungsbereich spiegeln, dann läge der maximale Messfehler bei über 6 Metern, so dass das Assistenzsystem des Fahrzeugs keine korrekte Funktion sicherstellen könnte. Gleiches gilt auch für die Kalibrierung des Systems, die keine schlechteren Werte annehmen darf. Bei diesen Betrachtungen sind weitere Fehlereinflüsse nicht berücksichtigt, was die Problematik noch mehr verdeutlicht.

Dass die Kalibrierung durch die externen Betriebsmittel zwingend notwendig ist, soll die Toleranzkette des mechanischen Verbaus des Radarsensors aus Abbildung 2.26 aufzeigen. Toleranzketten sind dabei ein einfaches Werkzeug zur Visualisierung des Gesamtprozesses und zur Identifikation der relevanten Toleranzen sowie Abweichungen. Anhand einer Toleranzkettenanalyse können wirtschaftliche Gestaltungen für Komponenten und Auswahl der Betriebsmittel nach Anforderungen getroffen werden. Weiterhin lassen sich relevante Toleranzen identifizieren. Jeder Knoten symbolisiert ein Merkmal. Jede Kante in der Toleranzkette, also die Verbindung zweier Knoten, beschreibt dabei eine Abweichung oder eine Prozessunsicherheit zwischen den Merkmalen. Die Verbindung der offenen Toleranzkette zu einer geschlossenen Kette bildet am Ende das Schließmaß. Das Schließmaß ist das Zielmerkmal, es gibt die maximal zulässige Toleranz an, die größer sein muss als die Summe der einzelnen Knoten der Toleranzkette. Dabei stellt die Summe der einzelnen Knoten die „Worst Case“ Berechnung der zulässigen Toleranz dar. Nur so kann ein stabiler Prozess und die Systemfunktion sichergestellt werden. [MÜL09; MÜL12, S. 100; BOH13]

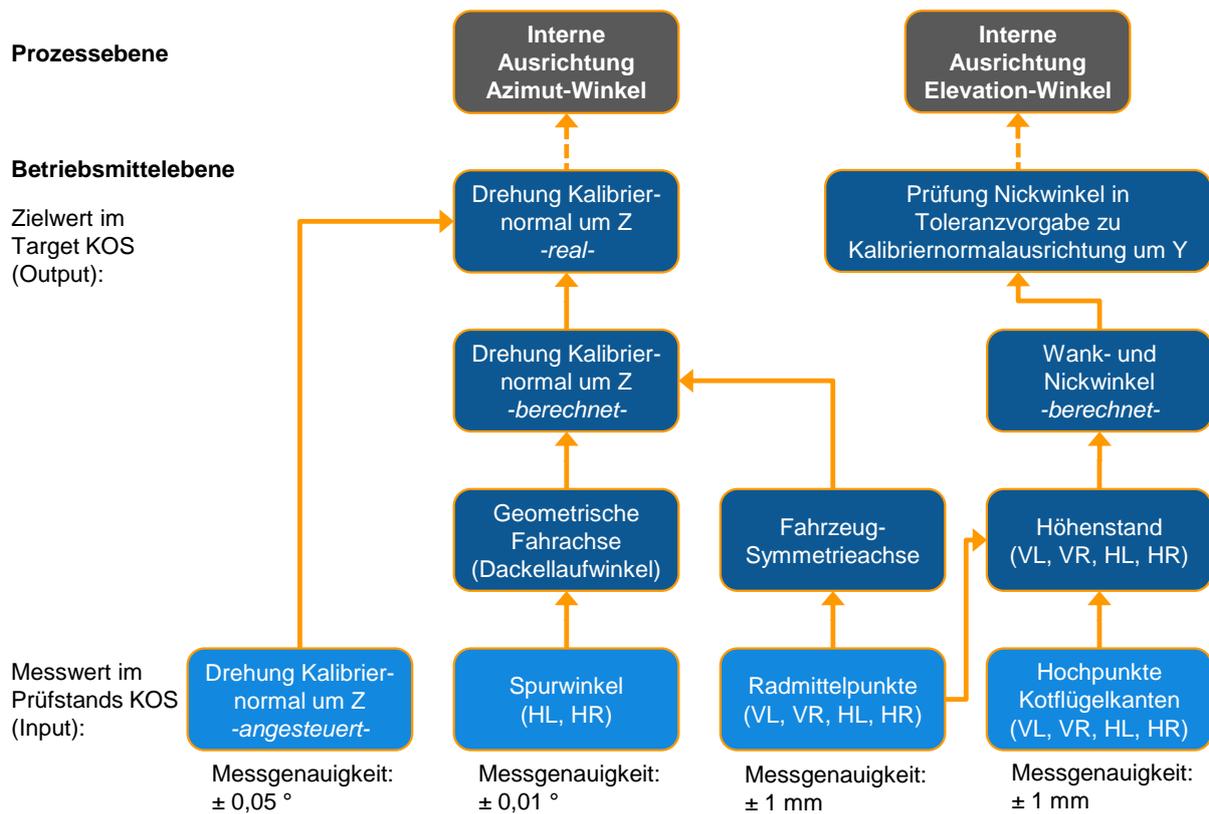
Das dargestellte Zielmerkmal in der Toleranzkette aus Abbildung 2.26 stellt den zulässigen Toleranzbereich zwischen der geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs und der Symmetrieachse des Radarsensors dar. Um die Kundenfunktion des Assistenzsystems sicherstellen zu können, benötigt der Radarsensor eine Ausrichtung im Azimut zur geometrischen Fahrachse von ca.  $\pm 0,4^\circ$  [MÜL20b]. Da die Elevation des Radarsensors mit  $\pm 0,6^\circ$  wesentlich größer toleriert ist, wird nachfolgend nur die Darstellung für die Azimut-Ausrichtung des Radarsensors betrachtet. Um ohne eine Kalibrierung des Radarsensors auskommen zu können, müssten die Summen der dargestellten Toleranzmerkmale aus Abbildung 2.26 kleiner sein als das Zielmerkmal. Die Symmetrieachse des Radarsensors hat, bedingt durch Ihren mechanischen Verbau im Fahrzeug, insgesamt sieben Verbindungen zwischen den einzelnen Merkmalen bis zur geometrischen Fahrachse. Das bedeutet: Jede Merkmalsverbindung dürfte nur eine maximale Toleranz von einem Siebtel der Zieltoleranz aufweisen, um die Toleranz des Zielmerkmals nicht zu überschreiten. Im dargestellten Fall wäre daher je Knoten eine maximale Toleranz von  $\pm 0,057^\circ$ , was ca.  $\pm 3$  Winkelminuten entspricht, zulässig. Da diese Toleranz durch die Montage der Komponenten aus Abbildung 2.26 nicht sichergestellt werden kann, ist eine Kalibrierung nach der Montage des Radarsensors zwingend erforderlich. [OTT20]



**Abbildung 2.26: Beispielhafte Toleranzkette für den produktseitigen Verbau eines Radarsensors [OTT20; MÜL20b]**

Die Kalibrierung des Radarsensors unterliegt nach seiner Montage ebenfalls sehr kleinen Toleranzen wegen der zuvor aufgezeigten Problematik zur Sicherstellung der Kundenfunktion. Um die Einflüsse der einzelnen Betriebsmittel-Merkmale bei der Kalibrierung des Radarsensors untereinander besser zu verstehen, wurden diese in einem Wirkungsbaum in Abbildung 2.27 visualisiert. Der Wirkungsbaum stellt auch Merkmale dar, die nicht einem quantifizierbaren Merkmal entsprechen. Anders als bei einem Key Characteristic (KC) Flowdown sind hier auch Wirkbeziehungen dargestellt, die nicht direkte inakzeptable Abweichungen auf die Kundenfunktion haben. Die Merkmale und deren Beziehungen können sowohl produkt-, prozess- als auch betriebsmittelseitig dargestellt werden. Aus den Beziehungen und Beeinflussungen der Merkmale untereinander lassen sich später die Toleranzbeziehungen herleiten. [THO04; GRE18; MEN20]

Da nachfolgend die Toleranzbeziehungen des aktuell genutzten Betriebsmittels für die Radarsensor-Inbetriebnahme aufgezeigt werden sollen, sind diese in Abbildung 2.27 dargestellt. Dabei sind die die Prozessebene beeinflussenden Betriebsmittel Inputs und Outputs berücksichtigt. Die Messwerte, die der Prüfstand unter den angegebenen Messgenauigkeiten aufnehmen kann, sind als Inputs abgebildet. Darauf aufbauend werden nach oben hin die Einflussgrößen bis zu den Stellwerten als Outputs wiedergegeben, die für die Kalibrierung in der Prozessebene benötigt werden.



**Abbildung 2.27: Betriebsmittelseitige Toleranzbeziehungen bei der Radarsensor-Kalibrierung [GEZ17; GRE18]**

Beim dargestellten Wirkungsbaum handelt es sich um eine Azimut- und Elevations-Kalibrierung eines Radarsensors, der mittels Drehplatte, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, kalibriert wird. Für die Azimut-Kalibrierung werden die Spurwinkel der Fahrzeughinterachse als Eingangsgrößen benötigt, um die geometrische Fahrachse zu bestimmen. Diese kann auf  $\pm 0,01^\circ$  ermittelt werden. Weiterhin werden die Radmittelpunkte bestimmt, aus denen die Fahrzeugsymmetrieachse festgelegt wird, was die Position des Fahrzeugs im Prüfstand wiedergibt. Die Radmittelpunkte können durch die Messtechnik mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\text{ mm}$  errechnet werden. Damit ergibt sich ein Winkelfehler für die Symmetrieachsenbestimmung, der von der Radstandlänge des Fahrzeugs abhängig ist. Bei einem Mittelklassefahrzeug mit einer Radstandlänge von ca. 2900 mm liegt der resultierende Winkelfehler bei ca.  $\pm 0,04^\circ$ . Aus diesen toleranzbehafteten ermittelten Werten kann innerhalb des Prüfstandkoordinatensystems die

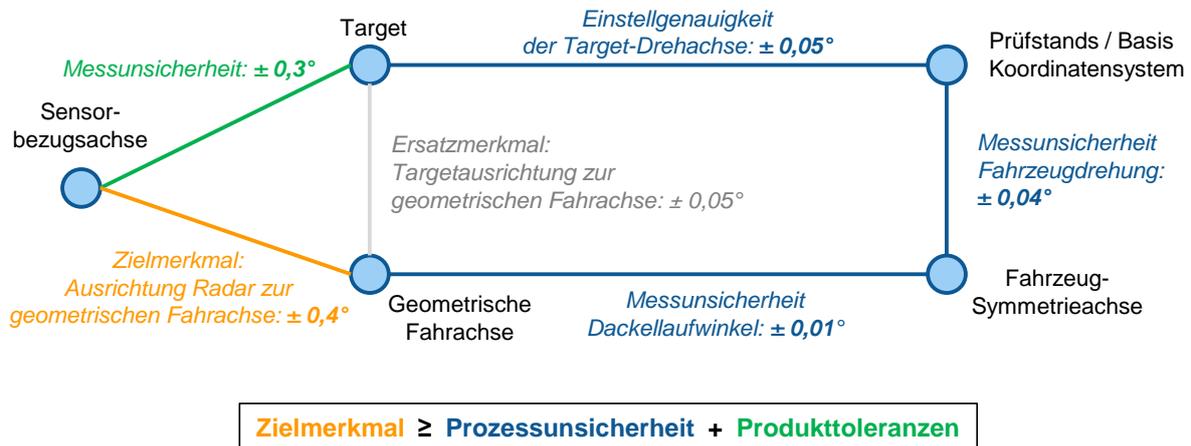
Drehung für die Drehplatte, die als Kalibriernormal für den Radarsensor dient, berechnet werden. Die Drehplatte kann mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05^\circ$  angesteuert werden. Daraus ergibt sich für die Drehung der Drehplatte um Z ein realer Einstellwert. [GRE18, S. 125]

Um die Ausrichtung in der Elevation sicherstellen zu können, muss der Höhenstand des Fahrzeugs bestimmt werden. Dieser ergibt sich aus den Merkmalen Radmittelpunkte und den Hochpunkten der Kotflügelkanten, die wie die Radmittelpunkte mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm erfasst werden können. [GRE18, S. 125] Aus dem Merkmal des Höhenstands der vier Räder kann der Wank- und Nickwinkel des Fahrzeugs im Prüfstand bestimmt werden. Da die Drehplatte für die Drehung um Y einen festen Einstellwert hat, wird bei der Elevation lediglich geprüft, ob Wank- und Nickwinkel innerhalb eines Toleranzfensters zur statischen Targetausrichtung liegen. Die Elevation des Radarsensors hat jedoch einen kleineren Einfluss auf die spätere Kundenfunktion, weshalb diese auch größer als die Azimut-Ausrichtung toleriert ist. Daher wird nachstehend nur die Toleranzkette für die Azimut-Kalibrierung hergeleitet.

Aus den Wirkbeziehungen der Merkmale für die Azimut-Kalibrierung des Radarsensors wurde die entsprechende Toleranzkette abgeleitet und in Abbildung 2.28 dargestellt. Dabei wurden fünf Merkmale als Knoten definiert, zwischen denen sich die Toleranzbeziehungen erstellen lassen. Das Zielmerkmal (orange) zur Sicherstellung der Kundenfunktion ist zwischen Sensorbezugsachse und der geometrischen Fahrachse mit einer Toleranz von  $\pm 0,4^\circ$  definiert. Dieser Wert muss, wie in der Abbildung 2.28 dargestellt, für eine Worst Case Betrachtung größer oder gleich der Summe aus der Prozessunsicherheit (blau) und der Produkttoleranz (grün) sein. Die Prozessunsicherheit besteht dabei aus den erbrachten Messgenauigkeiten zwischen den Merkmalen, die bei den Wirkbeziehungen in Abbildung 2.27 bereits dargestellt wurden. So ergeben sich eine Messunsicherheit beim Bestimmen der geometrischen Fahrachse zur Fahrzeugsymmetrieachse und eine beim Bestimmen der Fahrzeugsymmetrieachse im Prüfstandkoordinatensystem. Die Drehplatte, die vor dem Radarsensor ausgerichtet wird, kann zum Prüfstandkoordinatensystem mit einer Einstellgenauigkeit ausgerichtet werden. Die Summe aus diesen Prozessunsicherheiten beträgt dabei  $\pm 0,1^\circ$ . Die Produkttoleranz des Radarsensors von  $\pm 0,3^\circ$  fließt bei diesem Kalibrierprozess komplett in die Gesamtsumme der Messunsicherheiten mit ein. Damit ergibt sich eine Gesamtunsicherheit für ein Worst Case Szenario bei der Kalibrierung des blauen und des grünen Pfads in der Abbildung 2.28 von  $\pm 0,4^\circ$ . Dieser Wert entspricht dem Zielmerkmal und stellt deshalb gerade noch einen zielführenden Kalibrierprozess dar. [MÜL20b; OTT20]

Das Ersatzmerkmal in Abbildung 2.28 gibt die Ausrichtung des Targets zur geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs wieder. Dieses Ersatzmerkmal wird in der Regel vom OEM für den Kalibrierprozess vorgegeben. [DAI19] Allerdings bezieht das Ersatzmerkmal weder das Produkt noch den Gesamtprozess mit ein. Dabei sind die hohen toleranzseitigen Anforderungen der Produktentwicklung an dieses Ersatzmerkmal technisch kaum noch umsetzbar. Das zeigt die Dimensionierung des Ersatzmerkmals mit  $\pm 0,05^\circ$  zur Summe aus den Prozessunsicherheiten des blauen Pfads von  $\pm 0,1^\circ$ . Bei den dargestellten Toleranzberechnungen handelt es

sich zwar um Worst Case Berechnungen, die aber aufgrund der sicherheitskritischen Funktionen der betrachteten Systeme nach derzeitigem Stand der Technik gerechtfertigt sind. [BOH13; MÜL20b] Damit ist klargestellt, dass bei Betrachtung der gesamten Toleranzkette das Zielmerkmal unwissentlich gerade noch erfüllt wird, aber das definierte Ersatzmerkmal den heutigen Anforderungen an den Kalibrierprozess der Fahrzeugsysteme nicht mehr gerecht wird. [OTT20]



**Abbildung 2.28: Beispielhafte produkt- und betriebsmittelseitige Toleranzkette für die Radarsensor-Kalibrierung [GRE18; OTT20; MÜL20b]**

Die vorgestellten Wirkbeziehungen und die daraus resultierenden Toleranzketten zeigen, dass die Inbetriebnahme der sicherheitsrelevanten Fahrzeugsysteme prozess- wie auch betriebsmittelseitig an einer technischen Grenze angekommen ist. Aufgrund der vorgestellten Auslegung der Inbetriebnahme ist es wichtig, dass keine umweltbedingten Störungen bei dem Kalibrierprozess auftreten. Hinzu kommen Abweichungen vom Standardprozess, die sich weiterhin ungünstig auf die Toleranzkette bei der Kalibrierung auswirken. Dabei ist beispielsweise die Kalibrierung der Umfeldsensoren zur Fahrzeugsymmetrieachse und nicht zur geometrischen Fahrachse zu erwähnen, wie bereits im vorherigen Kapitel ausgesagt. Durch dieses Vorgehen erhöhen sich die Prozessunsicherheiten um einen weiteren produktseitigen Einfluss, was nach heutigem Stand für moderne und zukünftige Fahrzeugsysteme nicht tragbar ist.

Dass die Kalibrierung der Umfeldsensoriken erhöhtes Fehlerpotenzial zur Folge hat, machen folgende drei Beispiele sowohl produkt-, prozess- als auch betriebsmittelseitig deutlich, die im Rahmen einer Forschungsarbeit untersucht wurden: [GRE18, S. 117–119]

### Produkt

Im Rahmen einer Prozessentwicklung wurden mit einem Radarsensor 30 Wiederholkalibrierungen durchgeführt. Dabei wurde am Prozess- und Betriebsmittelumfeld nichts geändert, um für die Sensorkalibrierungen gleichbleibende Bedingungen zu schaffen. Bei den 30 Kalibrierungen wurden zwei Ausreißer bei den Kalibrierwerten festgestellt. Nachforschungen ergaben,

dass ein Fehler im Kalibrieralgorithmus des vom Zulieferer kommenden Radarsensors dafür verantwortlich war.

### **Prozess**

Bei Inbetriebnahme eines Radarsensors mittels Drehplatte in der Bandende-Produktion finden weitere manuelle Arbeitsumfänge am Fahrzeug statt, weshalb Werker sich vor dem Fahrzeug befinden. Dabei wurde festgestellt, dass ein Werker sich während des Kalibrierprozesses vor dem Target befand. In einem nachgestellten Betriebsversuch zeigten die Kalibrierwerte, dass es signifikante Abweichungen im Verhältnis zu einer ordnungsgemäßen Kalibrierung gibt. Die Problematik besteht darin, dass der Radarsensor bei seiner Kalibrierroutine nicht unterscheiden kann, ob die Kalibrierung korrekt oder fehlerhaft war. Daher könnten dem Kunden Fahrzeuge übergeben werden, die als korrekt kalibriert gelten, es aber nicht sind.

### **Betriebsmittel**

Beim Produktionsstart einer neuen Fahrzeugbaureihe wurde ein Fahrzeug über mehrere Prüfstände gefahren und dabei jedes Mal der gleiche Radarsensor mit unterschiedlichen Prüfständen kalibriert. Dabei zeigten sich wegen unterschiedlicher Betriebsmittel, die am EOL mehrmals verbaut sind, verschiedene Kalibrierwerte für den gleichen Radarsensor. Das zeigt, dass mehrfach verbaute Betriebsmittel starken Einfluss auf den Kalibrierwert haben können. Dies kann nur durch Kalibrierungen der Prüfstände untereinander abgestellt werden. Als beste Absicherung an dieser Stelle käme ein einziges Betriebs- und Messmittel in Frage, um gleichbleibende Qualität erreichen zu können.

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass es deutliche Herausforderungen bei der Inbetriebnahme der Umfelderkennungssysteme gibt. Diese wurden zwar am Beispiel von Radarsystemen aufgezeigt, lassen sich jedoch auch auf die anderen Erfassungssysteme übertragen. Nach aktuellem Stand der Technik gibt es massive Absicherungsschwächen in der Produktion, die für zukünftige Anforderungen an hochautomatisierte Fahrzeugsysteme nicht mehr tragbar sind. Auch produktseitige Anforderungen, wie geforderte Toleranzen aus der Produktentwicklung, müssen überdacht und klarer definiert werden. Aus diesem Grund müssen Absicherungsmaßnahmen getroffen werden, um auch zukünftigen Fahrzeugsystemen mit höheren Anforderungen an Kundenfunktionen und –sicherheit gerecht zu werden. Um neben einer Effizienzsteigerung für das EOL auch eine Absicherung sicherzustellen, müssen automatisierte und redundante Prüfsysteme frühzeitig eingesetzt werden. Die aktuellen wie auch zukünftige Anforderungen und Problemstellungen sollen nachfolgend durch das übergeordnete Ziel dieser Arbeit beantwortet werden.

Die gleiche Problemstellung ergibt sich auch für die Wiederinbetriebnahme der Umfeldsensoren des Fahrzeugs über den gesamten Produktlebenszyklus. Da die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel im After-Sales-Bereich über wesentlich geringere Genauigkeiten verfügen, ist eine Wiederinbetriebnahme zukünftiger hochautomatisierter Fahrzeugsysteme nach heutigem Stand ausgeschlossen. Zwar verfügen die Systeme über eine Online-Kalibrierung und

Nachführung der Ausrichtungen im Werkstatt- und Kundenbetrieb, jedoch kann dies keine produktionsseitige Kalibrierung der Systeme ersetzen [KÜH09]. Unter anderem fehlt es dabei auch an gesetzlichen Vorgaben, wie hochautomatisierte Fahrfunktionen über ihren Lebenszyklus zu behandeln sind. [KNA20]. Die Problemstellung im After-Sales-Bereich bedarf noch weiterer Forschung, um zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch nur auf die produktionsseitigen Inbetriebnahmen, die zuvor dargestellt wurden.

## 2.5 Bisherige Ansätze zur Gestaltung eines effizienten Bandendes

In diesem Kapitel werden die bisherigen Ideen, Konzepte und Betriebsmittel zum Thema Fahrzeuginbetriebnahme in der Produktionslinie vorgestellt. Dabei werden zuerst Konzepte zu In-Line-Systemen aufgezeigt, die in der Produktion bislang nicht zur Anwendung gekommen sind. Anschließend wird ein existierender In-Line Fahrwerkgeometrieprüfstand vorgestellt, der selten in der Fahrzeugproduktion eingesetzt wurde. Kern dieser Systeme ist die Nabengreifer-technologie, die diskutiert wird, aber auch Konzepte zur berührungslosen Inbetriebnahme der Fahrzeugsysteme. Abschließend wird ein Konzept für ein Radadaptionssystem vorgestellt, das ein Dehnungsgreifer-Spannprinzip nutzt und als existierendes Prototypsystem besteht.

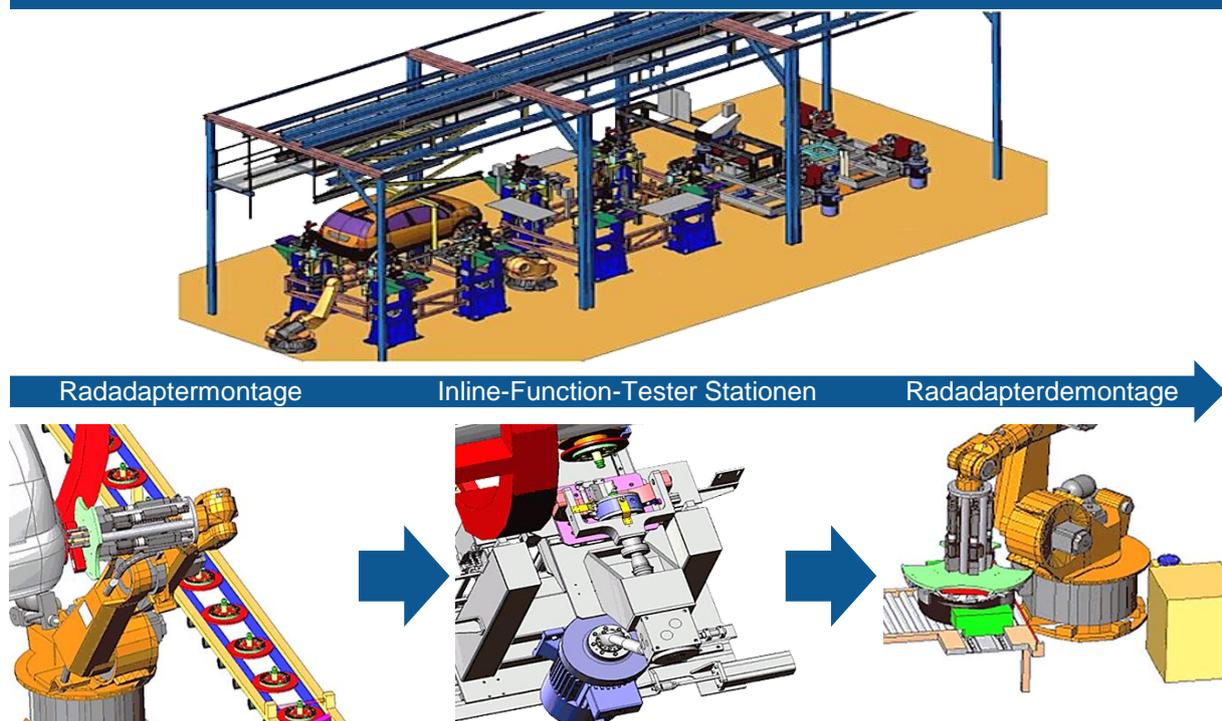
### 2.5.1 Betriebsmittel und Konzepte für eine Inbetriebnahme in der Produktionslinie

Die Überlegungen Teilprozesse aus dem EOL in die Hauptmontagelinie zu verlagern, gibt es schon länger. Daher haben einige Betriebsmittelhersteller bereits Konzepte oder auch Betriebsmittel in ihrem Portfolio, um Einstell- und Prüfumfänge auf Betriebsmitteln in der Montagelinie durchzuführen. Ein derartiges Einstell- und Prüfkonzert wurde im Rahmen einer ehemaligen Forschungsarbeit mittels eines In-Line Function Testers umgesetzt [SCH07]. Wie die Abbildung 2.29 zeigt, besteht dieses System aus mehreren Stationen in der Montagelinie. Damit sollen In-Line die Fahrwerkeinstellung, die Einstellung von Fahrerassistenzsystemen und die Prüfumfänge, die auf dem Rollenprüfstand lasten, bewältigt werden. Des Weiteren können durch den In-Line Function Tester straßenähnliche Fahrsituationen nachgestellt werden. [SCH07; SCH06; TEN05] Die drei Prozessstationen sind in der Abbildung 2.29 oben dargestellt.

Wie bereits in vorherigen Kapiteln aufgezeigt, sind bei einer Fahrwerkvermessung die Geometriedaten der Fahrzeugräder erforderlich. Da in der Montagelinie zu diesem Zeitpunkt noch keine Räder am Fahrzeug montiert sind und das Fahrzeug sich hängend in einem Montagegestell befindet, müssen straßenähnliche Bedingungen simuliert werden. Dazu müssen mittels taktlicher Einheiten die Fahrzeugradnaben des Fahrzeugs gegriffen und das Fahrwerk in die konstruktive Nulllage eingefedert werden. Dazu wird eine Greifertechnologie benötigt, um die Hubkräfte aufzunehmen. Da der In-Line Function Tester auch Fahrsituationen darstellen kann, bei denen Brems- und Beschleunigungsmomente übertragen werden, müssen auch größere

rotatorische Momente zwischen Betriebsmittel und Fahrzeugradnabe übertragen werden können. Aus diesem Grund arbeitet das dargestellte System mit einer Nullpunktspanner-Technologie, die die benötigten Anforderungen erfüllt. Dazu müssen aber Adapterscheiben an den Fahrzeugradnaben befestigt werden. Diese werden wie ein Fahrzeugrad angeschraubt. An den Adapterscheiben können dann, je In-Line Teststation in der Montagelinie, unterschiedliche Betriebsmittel mit Hilfe des Nullpunktspanners an der Fahrzeugradnabe andocken und sich fix verbinden. Nach der Verbindung können die Inbetriebnahmeroutinen stattfinden. [TEN05; SCH07]

### Inline-Function-Tester Landschaft in der Endmontagelinie



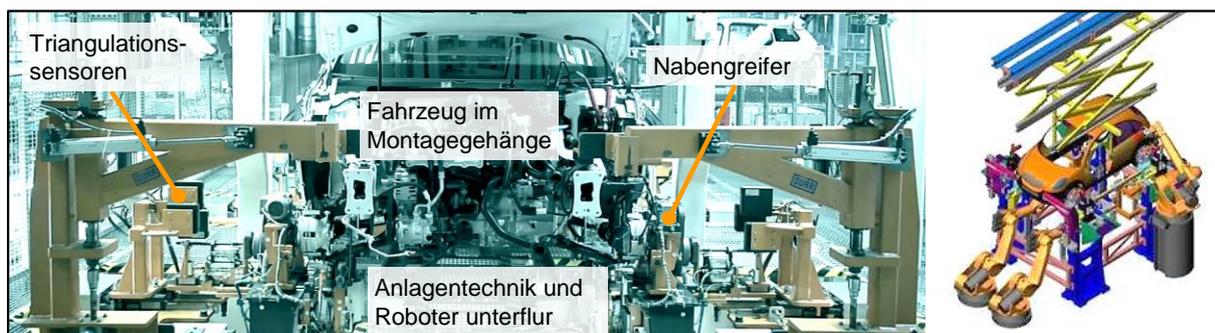
**Abbildung 2.29: Ganzheitliches Einstell- und Prüfkonzept in der Montagelinie [SCH07]**

Um die Adapterscheiben an den Radnaben des Fahrzeugs verschrauben und im Nachgang wieder entfernen zu können, benötigt das In-Line-System zwei automatisierte Roboterschraubstationen. Abbildung 2.29 unten zeigt die automatischen Montagen und Demontagen mittels Roboter sowie die Integration in die Montagelinie. Eine manuelle Verschraubung ist zwar möglich, wird aber aus wirtschaftlichen und prozesstechnischen Gründen in der Montagelinie nicht angewendet. Die Adapterscheiben werden daher von Robotern auf die Radnabe des im Montagegehänge befindlichen Fahrzeugs geschraubt und nach Ausführung der Einstell- und Prüfprozesse wieder abgeschraubt. Da das System ausschließlich für die getaktete Produktion ausgelegt werden konnte, werden zusätzlich zu den Stationen Fahrwerkgeometrieprüfstand, Fahrerassistenzsystemprüfstand und In-Line-Function Tester zwei weitere Stationen mit insgesamt acht Robotern benötigt. Sie dienen der Montage und Demontage der Adapterscheiben an den vier Fahrzeugradnaben. Nach der Demontage werden diese Adapterscheiben dem Montagetak, an dem die Verschraubung mit der Radnabe stattfindet, wieder

zugeführt. Bei den Adapterscheiben handelt es sich daher um ein Umlaufteil, das mehrfach benötigt wird. [SCH07]

Dieses ganzheitliche Konzept ist ein guter Ansatz, um die Prozesse aus dem EOL in die Montagelinie zu verlagern. Dabei treten jedoch integrative und wirtschaftliche Hürden auf. Einerseits wird in der Montagelinie sehr viel Platz über mehrere Produktionstakte benötigt. Hinzu kommt die Rückführung der an die Radnaben verschraubten Adapterscheiben. Neben dem erhöhten Platzbedarf, der fast ausschließlich in einem Green-Field Werk gegeben ist, muss der Taktbetrieb ebenfalls über mehrere Produktionstakte realisiert werden. Eine Notfallstrategie für einen Teilsystemausfall ist bei laufender Produktion nur unter großen Effizienzeinbußen zu realisieren. Andererseits sind die Investitions- und Instandhaltungskosten für das dargestellte Gesamtsystem sehr hoch. Sie werden unter anderem durch die benötigten Adapterscheiben verursacht, da allein dafür acht Roboter mit Schraubwerkzeugen benötigt werden. Dieses Gesamtkonzept wurde bisher bei keinem OEM implementiert.

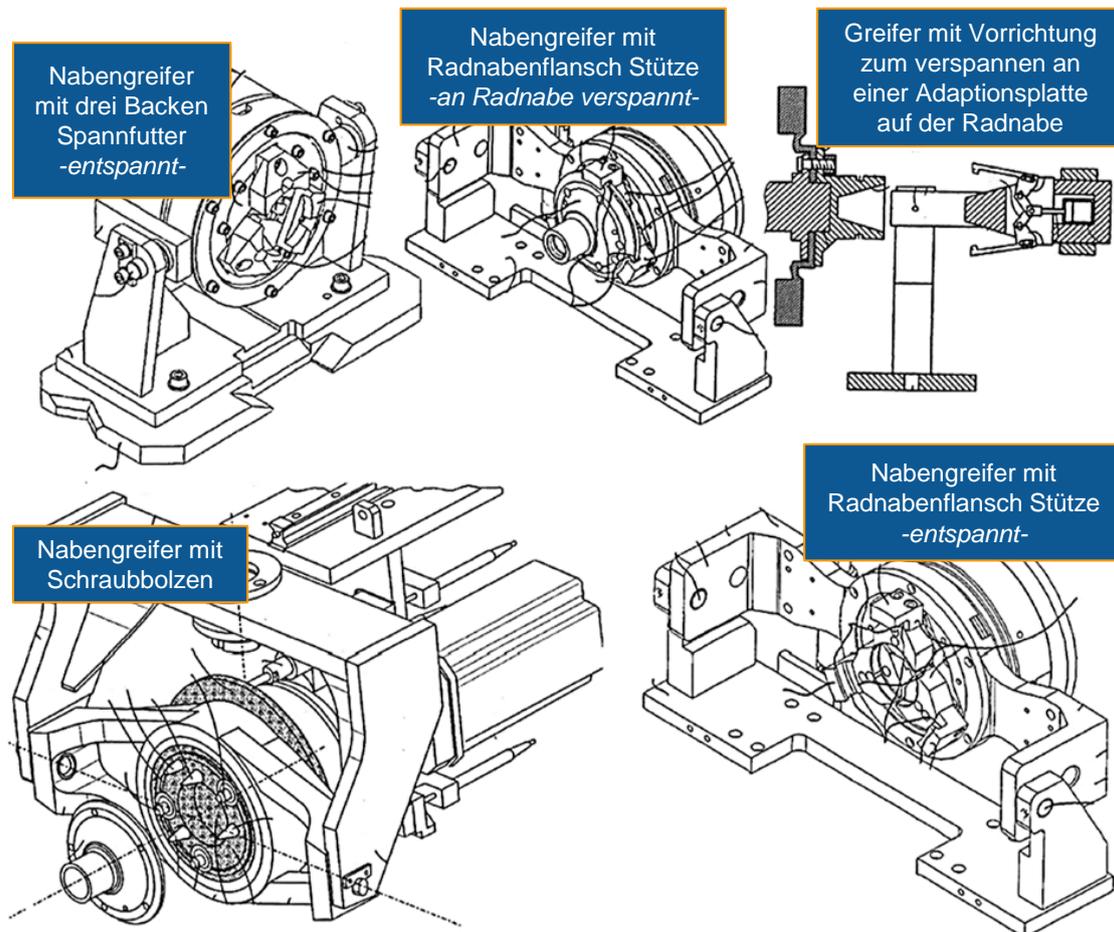
Um nicht das gesamte EOL in der Montagelinie abzubilden, wurde ein Betriebsmittel auf den Markt gebracht, das die FahrwerkgeometrieEinstellung in einer Station der Montagelinie durchführt. Durch den In-Line Fahrwerkgeometrieprüfstand sollen die Prozessumfänge im EOL reduziert werden. Das soll eine Alternative zu den herkömmlichen Durchfahrprüfständen sein. Während das Fahrzeug im Montagegehänge fixiert ist, wird seine Fahrwerkgeometrie vermessen und vollautomatisch eingestellt. Dabei können, wie am EOL, auch die Fahrwerkgeometrien eingestellt werden. Das wird von Robotern übernommen, die ein Einstellwerkzeug zu den jeweiligen Einstellpunkten führen. Das erfordert jedoch Zugänglichkeit zum Fahrzeug. [DÜR15] Das Gesamtsystem mit konzeptioneller Darstellung wird in Abbildung 2.30 gezeigt.



**Abbildung 2.30: Fahrwerkgeometrieprüfstand in der Montagelinie [DÜR15]**

Das dargestellte System ist ein reiner Fahrwerkgeometrieprüfstand zur Spur- und Sturzeinstellung an Vorder- und Hinterachse des Fahrzeugs im Montagegehänge. Dabei ist das System für den stationären Prozessbetrieb in der getakteten Montagelinie ausgelegt. Aufgrund des komplexen Aufbaus ist ein Fließbetrieb ausgeschlossen. Eine Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme ist bei diesem Prüfstand nicht möglich, da er sich rein auf die Fahrwerkeinstellung bezieht. Auch weitere Inbetriebnahmeprüfungen, die auf dem Rollenprüfstand lasten und in Richtung der Bremsen- und Antriebsstrangprüfung abziehen, sind aufgrund der hier verwendeten Greifertechnologie nicht umsetzbar. Der Fahrwerkgeometrieprüfstand benötigt

keine Adapterscheiben, die, wie beim In-Line Function Tester System, an die Fahrzeugradnaben geschraubt werden müssen. Bei dem hier gezeigten Fahrwerkgeometrieprüfstand in der Montagelinie kommen Nabengreifer zum Einsatz. Das hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Prozessstationen und Adapterscheiben benötigt werden. Jedoch können durch die Radnabengreifer keine großen Drehmomente übertragen werden, ohne dabei die Radnabe nicht zu beschädigen. Der Nabengreifer arbeitet mit einem Backenspannfutter, das sich am Zentrierring der Fahrzeugradnabe verklebmt. Da dieser nur eine sehr geringe Fläche hat, muss der Backengreifer eine hohe Spannkraft auf den Zentrierring ausüben, um ein Drehmoment übertragen zu können. Dabei entstünden nicht tragbare Beschädigungen an der Fahrzeugradnabe. Um eine Umschlagmessung bei der Fahrwerkgeometrievermessung durchzuführen, sind die benötigten Drehmomente gerade noch übertragbar, weshalb die Nabengreifertechnologie bei diesem Prüfstand zum Einsatz kommt. Durch die zuvor erwähnten Punkte hat sich der In-Line Fahrwerkgeometrieprüfstand in der Automobilindustrie nicht stark etabliert und ist bisher in Deutschland nur bei einem OEM in Betrieb.



**Abbildung 2.31: Radnabengreifer-Technologien für die taktile Fahrwerkvermessung in der Montagelinie [GRE01; TEN04; KAM09; HOH03]**

Um eine taktile Verbindung mit der Fahrzeugradnabe einzugehen, gibt es Greifertechnologien in unterschiedlichen Ausführungen. Die Abbildung 2.31 zeigt einige dieser patentierten Tech-

nologien. Die gezeigten Systeme spannen entweder mit einem Nabengreifer mit Backenspannfutter, einem Nullpunktspanner an einer Adaptionplatte oder führen eine Verschraubung am Radanschlussflansch durch. Dabei hat jedes System Vor- und Nachteile. Die Nabengreifer können sich ohne weitere Betriebsmittel schnell an den Radnaben des Fahrzeugs adaptieren, können jedoch kaum große Drehmomente übertragen. Dabei werden schon bei Radumschlagmessungen erhöhte Drehmomente benötigt, weil die angetriebenen Radnaben über die bereits verbauten Antriebswellen den Antriebsstrang mitbewegen. Dadurch muss das Trägheitsmoment des Antriebsstrangs aufgebracht werden.

Im Gegensatz dazu können die Spannsysteme, die sich mittels Nullpunktspanner an einer Adapterscheibe adaptieren, sehr hohe Drehmomente übertragen. Diese Scheiben müssen aber an den Radnaben montiert und wieder demontiert werden. Das erfordert nicht tragbare Prozesszeiten und Investitionskosten. Gleiches gilt auch für Technologien, die sich am Radanschlussflansch verschrauben. Neben der sehr guten Drehmomentübertragung werden jedoch lange Prozesszeiten für das Anziehen und Lösen der Verschraubungen zwischen Adaptionkopf und Radnabe benötigt. Ein weiterer Nachteil ist die Baugröße des Adaptionkopfs, die aufgrund der Schraubtechnologie sehr groß ausfällt. Neben diesen Technologien bietet der Dehngreifer eine Alternative zur taktilen Verbindung zwischen Adaptionkopf und Fahrzeugradnabe. Das System wird im nächsten Kapitel noch näher ausgeführt.

Ein weiterer Forschungsansatz ist die berührungslose Fahrwerkvermessung. Das System existiert bisher nur als experimentelles Prototypensystem und ist auf dem Markt nicht verfügbar. Abbildung 2.32 zeigt den Aufbau dieses Vermessungssystems. Dabei befinden sich zwei Lasermesseinheiten direkt neben dem Fahrzeug, das sich auf einer Fördertechnik befindet. Die Achsen des Fahrzeugs sind dabei ausgefedert und die Räder noch nicht montiert.



**Abbildung 2.32: Prototyp eines berührungslosen Fahrwerkvermessungsverfahrens in der Montagelinie [JON19]**

Nach dem Einfördern des Fahrzeugs in die Prozessstation erfassen die Messsysteme, die sich auf Linearachsen befinden, die Zentrierringe der Radnaben. Das geschieht durch das Verfahren der Messtechnik auf den hochgenauen Linearachsenantrieben. Die Zentrierringe der Radan-

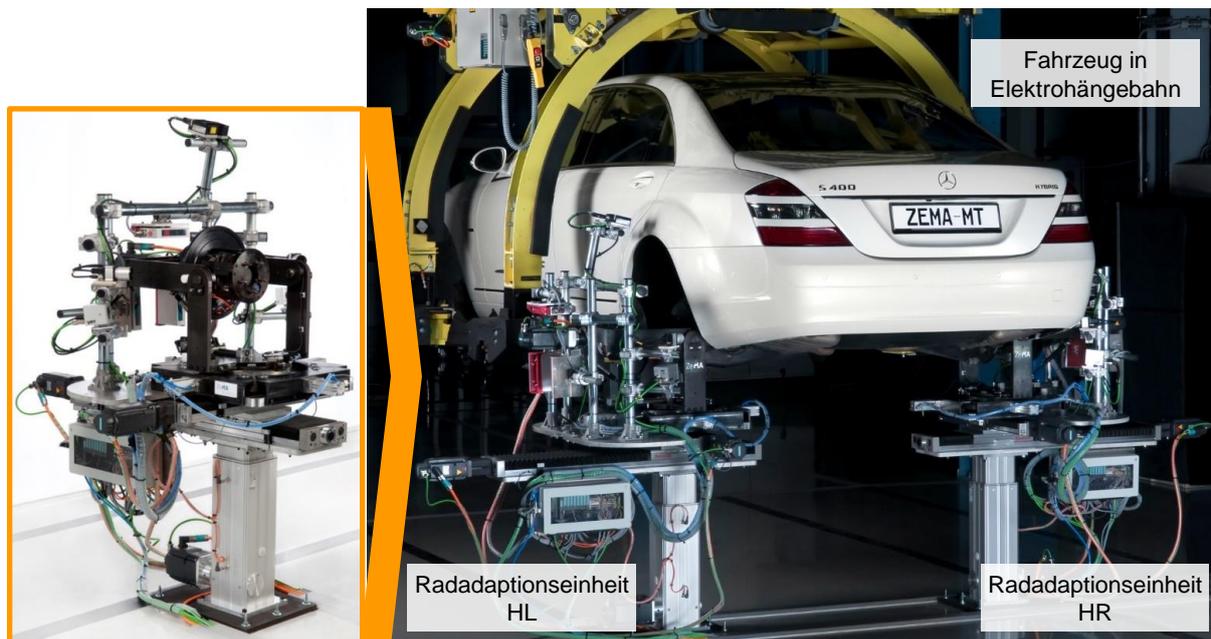
schlussflansche haben nur einen sehr geringen Querschnitt und sind daher schwer zu erfassen. Eine andere Messoberfläche ist nicht nutzbar, da die Bremsscheiben auf den Radnaben montiert sind. Untersuchungen mit der berührungslosen Fahrwerkgeometriemesstechnik zeigen, dass die Ergebnisse plausibel sind, allerdings einiger Korrekturen der Einflussfaktoren bedürfen. Das sind unter anderem die Kompensation des Planlaufs und der Oberflächengegebenheiten der Radnaben, da keine Radumschlagmessung stattfinden kann. Des Weiteren müssen die Fahrwerkgeometrien mittels Kennlinien aus der Fahrzeugentwicklung bestimmt werden, denn die Achsen sind ausgefedert und haben keinen definierten Zustand. Durch Schwingungen und Vibration des Fördersystems in der Montagelinie entstehen zusätzlich negative Einflussfaktoren auf den Messprozess, die für eine ordnungsgemäße Vermessung nicht tragbar sind. [JON19]

Die vorgestellten Betriebsmittel, Prototypen und Konzepte aus Forschung und Industrie zeigen einen Ansatz für die In-Line Fahrwerkgeometrievermessung in der Montagelinie. Dabei wird ersichtlich, dass die berührungslose Messtechnik einen immensen Vorteil hat, da der komplette kinematische Systemaufbau entfallen kann. Durch die negativen Einfluss- und benötigten Korrekturfaktoren ist das System für einen Einsatz in aktiver Produktionsumgebung allerdings ungeeignet. Deshalb qualifiziert sich nur eine taktile Messtechnik für die In-Line Fahrwerkgeometrievermessung. Wie bereits vorgestellt, besteht noch weiterer Optimierungsbedarf im Bereich der Greifertechnologie und des Gesamtsystemaufbaus. Eine Optimierung zu den genannten Punkten soll das Radadaptionssystem (RAS) leisten, das im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

### 2.5.2 Konzept eines Radadaptionssystems für ein effizientes Bandende

Das Radadaptionssystem ist innerhalb einer Forschungsarbeit am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) entstanden. Das konzeptionelle System ist dabei in der Lage, sich In-Line mit den Fahrzeugradnaben über eine Dehnungsgreifer-Technologie zu verbinden. Dabei war das Ziel, einen kleinen und modularen Systemaufbau umzusetzen. Eine Radadaptionseinheit (RAE) besteht aus dem Radadaptionsskopf, der Kopfaufhängung, der Schwimmeinheit und der kinematischen Bewegungseinheit. Diese Teilsysteme erfüllen die Prozessanforderungen intelligentes Verbinden mit der Radnabe und spannungsfreies Einfedern bis in die konstruktive Nulllage des Fahrzeugs. Der Radadaptionsskopf (RAK) kann über Dehnelemente aus Polyurethan-Hülsen (PUR-Hülsen) eine prozesssichere Verbindung zum Radanschlussflansch der Radnabe herstellen. Durch die kinematischen Freiheitsgrade der Kopfaufhängung und Schwimmeinheit nach dem Kraftschluss zwischen Adaptionsskopf und Radnabe ist eine spannungsfreie Einfederungsbewegung der Fahrzeugachse in die Nulllage möglich. Dadurch werden gleiche Bedingungen wie auf einem heutigem Fahrwerkgeometrieprüfstand geschaffen. Durch Rotation der Radnabe über den Radadaptionsskopf können eine Umschlagkompensationsmessung erfolgen und die Fahrwerkparameter in der Nulllage

des Fahrzeugs vermessen werden. [OTT17] Der prototypische Systemaufbau der Radadaptationseinheiten für eine Fahrzeugachse ist in der Abbildung 2.33 dargestellt.



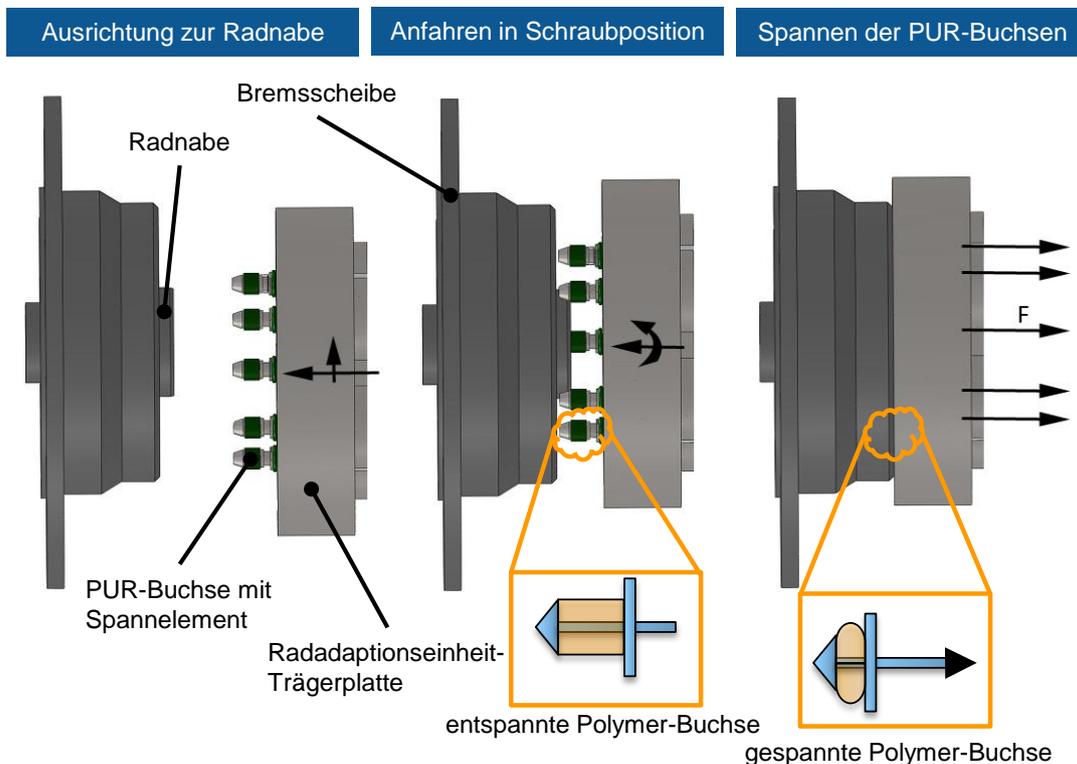
**Abbildung 2.33: Prototyp des Radadaptationssystems**

Der dargestellte Prototyp kann für eine taktile In-Line Messung der Fahrwerkgeometrien genutzt werden. Durch den kompakten Systemaufbau und die intelligente Greifertechnologie bietet das System beste Voraussetzungen. Das Radadaptationssystem ist aber noch nicht messfähig. Aus der wissenschaftlichen Vorarbeit existieren lediglich das Konzept und ein prototypischer Aufbau der kinematischen Radadaptationseinheiten, wie in Abbildung 2.33 gezeigt wird. Um eine Fahrwerkgeometrievermessung in der Montagelinie mit dem gezeigten System durchführen zu können, wurde es mit mehreren Teilmesssystemen ausgerüstet. Das Messsystem besteht aus einem Stereokamerasystem zur Ermittlung der Adaptionenkoordinaten, einem Sensor zum Erfassen der Fahrzeughöhenlage und drei Punktriationssensoren zur Fahrwerkgeometriemessung. [OTT17] Damit sind zwar hardwareseitig alle Voraussetzungen erfüllt, es existiert aber kein mathematisches Modell für das Messkonzept. Langzeitversuche oder eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung für einen Produktionseinsatz sind ebenfalls nicht vorhanden.

Der zuvor beschriebene Kern des Radadaptationssystems ist die entwickelte Greifertechnologie. Der Adaptionkopf jeder Einheit muss eine feste Verbindung mit den Fahrzeugradnaben herstellen können, weil diese Verbindung Druck-, Zugbelastung und rotatorische Momente aufnehmen muss. Die Verbindung muss schnell hergestellt bzw. wieder gelöst werden können, um einen Adaptionvorgang in einem Montagetakt durchführen zu können. Der Radadaptationkopf kann die Verbindung zur Radnabe über eine spezielle Hülse aus Kunststoff herstellen. Bei dem Werkstoff handelt es sich um einen extrem robusten und elastischen Kunststoff aus

Polyurethan. Das Funktionsprinzip folgt dem eines Flaschenverschlusses. Wird die Kunststoffhülse zusammengestaucht, dehnt sie sich aus, wird sie entlastet, entspannt sie sich wieder. [OTT14; MÜL11; JÄG11]

Die Polyurethan Hülse wird, wie im Adaptionprozess in Abbildung 2.34 gezeigt, durch eine Zugstange entlastet oder gestaucht. Die Hülse ist mit der zugehörigen Zugstange fünf Mal im Adaptionkopf verbaut. Der Lochkreis der Anordnung muss dem der Radnabe des Fahrzeugs entsprechen. Nach Platzierung der entspannten Hülsen in den Gewindelöchern der Radnabe, an denen sonst das Rad verschraubt wird, werden die Zugstangen gezogen. Hierdurch weitet sich die Polyurethan-Hülse im Gewindeloch auf und verspannt sich im Gewindegang des Lochs. Das Verspannen und Lösen der Hülsen ist im Adaptionprozess in Abbildung 2.34 dargestellt. Da es sich um einen elastischen Kunststoff handelt, bleiben nach dem Entspannungsprozess keine Schäden am Gewinde der Radnabe zurück. Die Kraftübertragung ist durch die vollkommene Aufweitung der Hülse im Gewindegang sichergestellt. [OTT14]



**Abbildung 2.34: Funktion des Dehnungsgreifers des Radadaptionkopfs [OTT14; JÄG11]**

Der Radadaptionkopf muss, nach dem Anfahren an den Radanschlussflansch der Radnabe, den Bund des Mittelloch-Zentrierings aufnehmen. Damit ist eine Zentrierung der Elemente zueinander sichergestellt. Des Weiteren ist durch den Auflagebund des Mittelloch-Zentrierings eine Kraftübertragung  $F_{\text{Hub}}$  in Hubrichtung der Z-Achse sichergestellt. Dadurch wird die Kraftübertragung beim Einfedern der Achse über den Auflagebund und nicht über die PUR-Hülsen mit Zugstange eingeleitet. Die PUR-Hülsen sollen lediglich zum Spielausgleich und für die rotatorischen Drehmomentübertragungen genutzt werden. [OTT14]

Durch die Greifertechnologie und den kompakten Aufbau des Radadaptionssystems sind sie zur Umsetzung des Ziels dieser Arbeit geeignet. Das Radadaptionssystem soll dabei als In-Line Fahrwerkgeometriemesssystem für die Fahrerassistenzsystem Inbetriebnahmen dienen. Damit das Gelingen kann, muss das System modifiziert und messfähig gemacht werden. Anschließend müssen Untersuchungen zur Eignung des Systems in der Fahrzeugproduktion gemacht werden. Dieser Forschungsteil der vorliegenden Arbeit ist in Kapitel 5 beschrieben. Nachfolgend wird der strukturelle Aufbau des Radadaptionssystems näher erläutert.

## 2.6 Ansatz des Radadaptionssystems in der Produktionsumgebung

In den folgenden zwei Unterkapiteln soll der strukturelle Aufbau des bestehenden Prototyps des Radadaptionssystems dargestellt werden. Dabei werden die mechanischen und kinematischen Zusammenhänge erläutert, weil sie für das später erstellte mathematische Modell von Bedeutung sind. Die zur Verfügung stehende Messtechnik der Radadaptionseinheiten wird erläutert und abschließend der konzeptionelle Prozessablauf mit dem System aus der bestehenden Vorarbeit dargestellt.

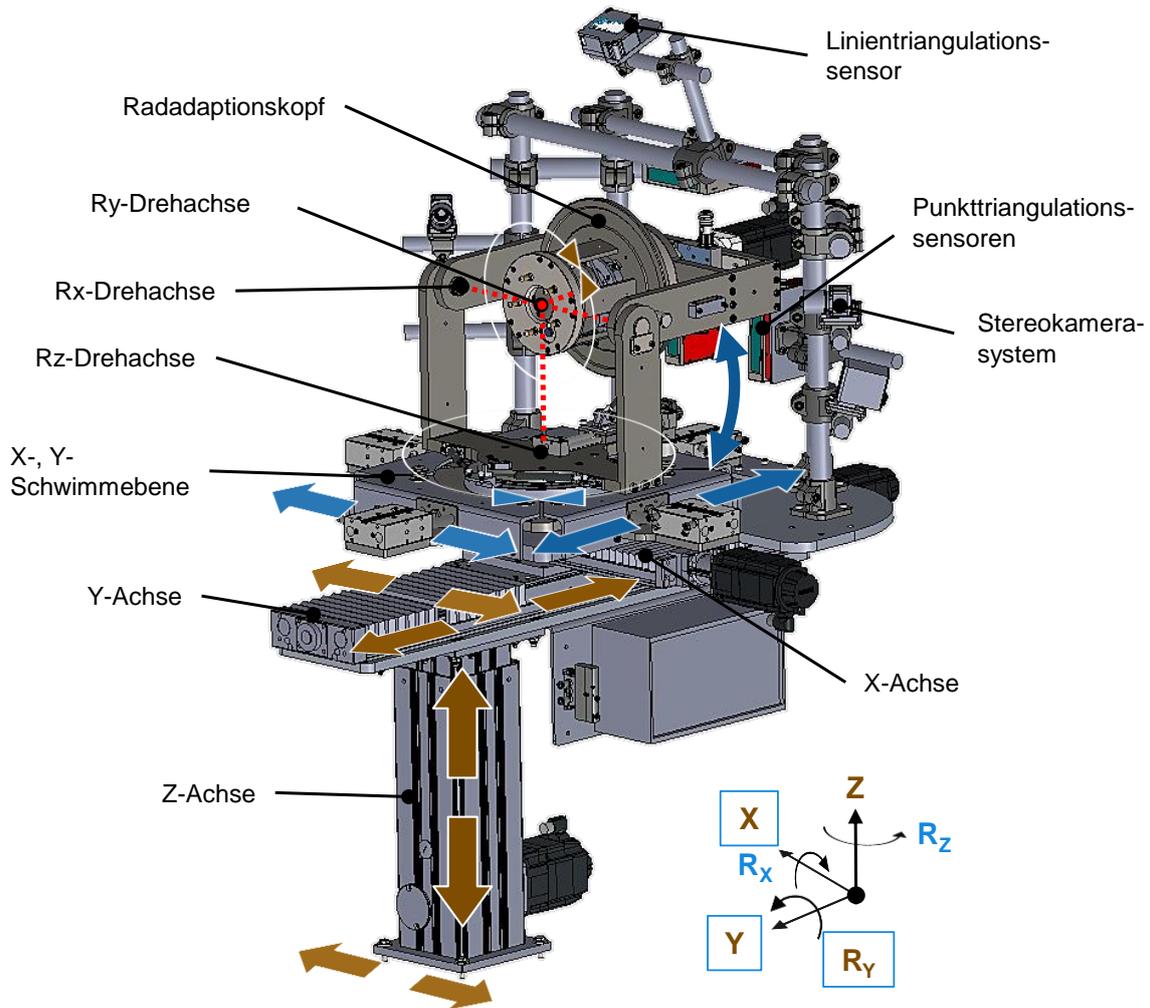
### 2.6.1 Struktureller Aufbau des Prototyps

Beim Adaptionprozess mit dem Fahrzeug müssen einige Anforderungen beachtet werden, um die spätere Messbereitschaft herstellen zu können. Die Anforderungen wirken sich primär auf den kinematischen Aufbau des Radadaptionssystems aus, wie nachfolgend beschrieben. Nach dem Adaptionvorgang mit der Fahrzeugradnabe muss das System eine Hubbewegung ausführen, um die Achsen des Fahrzeugs bis in die K0-Lage einzufedern. Dadurch wird sichergestellt, dass sich das Fahrzeug in einem kundenspezifischen Zustand befindet, der der gleichen eingefederten Situation wie der auf der Straße entspricht. Des Weiteren dürfen keine Kräfte oder Momente in die Fahrzeugachse und damit in die Radaufhängung eingeleitet werden. Das würde den späteren Messprozess verfälschen, denn es entspricht nicht den gleichen Bedingungen der Spannungsfreiheit wie bei einem Fahrzeug auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand. Letztlich könnte eine zu hohe Belastung der Radaufhängung sogar eine Beschädigung der Achse nach sich ziehen. Die Fahrzeugachsen folgen beim Ein- und Ausfedern einer parabelähnlichen Hubbewegung. Der Radadaptionkopf muss dieser Bewegung exakt folgen, um Verspannungen auszuschließen. Da aber dieses Bewegungsverhalten eine unbekannte Variable ist, müssen bei der Bewegungseinheit des Radadaptionssystems kinematische Freiheitsgrade eingesetzt werden. Eine weitere Anforderung ist die Position der Krafteinleitung. Sie muss genau senkrecht zu der Adaptionsebene an der Radnabe erfolgen. Würde die Kraft nicht genau senkrecht unter der Adaptionsebene angreifen, ergäbe sich ein Hebelarm zwischen der Anlagefläche des Radadaptionkopfs und der Radnabe. Das wiederum hätte ein positives oder negatives Wendemoment zur Folge, das zur Achse hin- oder entgegengerichtet ist und dadurch die Achse oder den Adaptionkopf zerstören könnte. [OTT14]

Als eine weitere Anforderung muss auch der Teilprozess der Umschlagmessung in der K0-Lage beachtet werden. Dabei soll der Radadaptionkopf um die  $R_Y$  Drehachse rotieren und exakt den Bewegungen der Radnabe folgen. Parallel dazu soll der Fahrwerkgeometrie Messprozess ablaufen. Einerseits ist eine pulsierende Drehbewegung um den Nullpunkt der  $R_X$  und  $R_Z$  Drehachsen möglich und andererseits eine pulsierende Hubbewegung um den Nullpunkt der Y-Achse. Die müssen unbedingt durch Freiheitsgrade oder Schwimmebenen geringster Lagerreibung ausgeglichen werden, um Verspannungen zu vermeiden und gleiche Bedingungen wie bei einer Vermessung auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand zu schaffen. Außerdem ist mit eventuellen Schwingungen des Montagegehänges in X-Richtung - der Linienflussrichtung - zu rechnen. Da sich auch das Fahrzeug mit seinen Achsen mitbewegt, müssen die Bewegungen ausgeglichen oder mit dem System synchronisiert werden. [OTT14]

Um den Anforderungen für den Messprozess am Fahrzeug gerecht zu werden, wurde jede Adaptionseinheit mit mehreren kinematischen Elementen versehen. Eine Einheit mit ihren Antriebsachsen und Freiheitsgraden ist in Abbildung 2.35 dargestellt. Die Achsen bestehen dabei aus einer Hubsäule, die die Z-Achse bildet und aus zwei Linearachsen, die die X- und Y-Achse des Systems bilden. Dadurch ist eine Positionierung des Radadaptionkopfs in die drei Achsrichtungen X, Y, Z gegeben, weil jede Achse über einen Antriebsmotor angesteuert werden kann. Auf der obersten Bewegungsachse befindet sich eine Schwimmebene, die über ein Pneumatiksystem zu- und abschaltbar ist. Bei Aktivierung kann diese Schwimmebene einen Ausgleich in die X- und Y-Richtung realisieren. Auf der Schwimmplatte befindet sich ein Axiallager, das über zwei Trägerarme und eine Trägerröhre zusammen mit einem Radiallager eine halbkardanische Lagerung des Radadaptionkopfs realisiert. Da sich der Kopf in dieser Lagerungsart frei bewegen kann, ist er über eine Gasdruckfeder in einer Vorposition flexibel gehalten. Der Adaptionkopf ist mit seiner Adaptionfläche, in die die Dehnungsgreifer integriert sind, genau zentrisch in dieser halbkardanischen Lagerung aufgehängt. Dadurch sollen später keine Kräfte oder Drehmomente in die Achse des Fahrzeugs eingeleitet werden. Des Weiteren ist er mit einer Antriebseinheit versehen, die über eine kinematische Verschaltung in der Lage ist, sowohl die Dehnungsgreifer zu betätigen, als auch den Radadaptionkopf um die  $R_Y$  Drehachse rotieren zu lassen. [OTT16a; OTT14]

Durch diese kinematischen Bewegungsarten lassen sich die X-, Y- und Z- Achse sowie die Drehachse  $R_Y$  des Radadaptionkopfs über Antriebseinheiten positionieren. Durch die Schwimmebene kann die X- und Y-Achse des Systems schwimmend geschaltet werden. Zusätzlich sind durch die kardanische Lagerung die  $R_X$  und  $R_Z$  Rotationsachsen schwimmend gelagert und werden durch eine Rückstellfeder in einer Vorposition gehalten. Durch diese Möglichkeiten sind die Positionierung des Radadaptionkopfs zur Fahrzeugradnabe, die Hubbewegung zum spannungsfreien Einfedern der Fahrzeugachse in die K0-Lage und das Folgen des Adaptionkopfs beim Messprozess sichergestellt. [OTT14]



**Abbildung 2.35: Kinematischer Aufbau einer Radadaptionseinheit [OTT16b]**

Die in Abbildung 2.35 dargestellten Pfeile symbolisieren die bewegten Achsen. Dabei sind braune Pfeile über Antriebsmotoren kinematisch bewegbare Achsen, blaue Pfeile stellen die Freiheitsgrade der Achsen und Drehachsen des Systems dar. Die Achsen X und Y sind über Pneumatikzylinder in Nulllage fest oder frei schwimmend schaltbar. Die kardanische Lagerung des Systems, die über die Drehachsen  $R_x$  und  $R_z$  realisiert ist, ist permanent schwimmend geschaltet, aber über Gasdruckfedern in ihre Nulllage rückstellbar. Die Positionierung des Systems über die angetriebenen Achsen X, Y und Z sowie die Drehachse  $R_y$  ist über Servoantriebsmotoren mit Gebersystemen realisiert. Das ist erforderlich, um den Radadaptionsskopf zur Fahrzeugradnabe zu positionieren. Die frei beweglichen Rotationsachsen  $R_x$  und  $R_z$  ermöglichen bei der Positionierung ein Anpassen des Systems an die Radnabe. Bei zusätzlicher Hubbewegung in Z-Richtung werden die Schwimmachsen X und Y freigegeben und können daher einen Positionierungsausgleich des Systems zur Fahrzeugachse hin und mit der Förderrichtung des Montagegehänges ausgleichen. Zusätzlich wird durch die Freiheitsgrade des Radadaptionssystems in den Achsen X, Y und den Drehachsen  $R_x$  und  $R_z$  ein kompletter Ausgleich für die Bewegung des Fahrzeugachsschenkels geschaffen. Damit wird dieser - unter Belastung und Rotation der Radnabe – nicht verspannt, weil er sich durch die reibungsarmen

Freiheitsgrade des Systems ungehindert bewegen kann und der Radadaptionkopf dieser Bewegung folgt. Das ist möglich, weil sich konstruktionsbedingt alle drei Drehachsen  $R_x$ ,  $R_y$  und  $R_z$  im Mittelpunkt der Adaptionfläche schneiden und somit einen Zentralwinkel bilden. [OTT14] Der ist mit roten Strichlinien an der Adaptionfläche in Abbildung 2.35 eingezeichnet.

Neben dem mechanischen Aufbau ist die Prozesssteuerung über eine SPS und eine Antriebssteuerung für die Servomotoren der Radadaptionseinheiten vorhanden. Außerdem ist für das Messsystem ein Industrie-PC (IPC) verbaut, auf dem die Software zur Bildverarbeitung, Messaufnahmerauswertung und Matlab zur Datenberechnung installiert ist. Grundsätzlich verwaltet der IPC zwei Messsysteme. Das Positionierungsmesssystem ermittelt über ein Stereokamerasystem die Adaptionposition der Fahrzeugradnabe und das Fahrzeugniveau über einen Linientriangulationssensor. Das Fahrwerkgeometriemesssystem kann über je drei Punktrianulationssensoren Messpunkte der Radadaptionkopfebene ermitteln. Die verbauten Messsysteme sind in Abbildung 2.35 an jeder Radadaptionseinheit dargestellt. [OTT14]

Bei bisherigen Forschungsarbeiten zum Radadaptionssystem wurden der mechanische und steuerungstechnische Aufbau realisiert. Auch die benötigten Messwertaufnehmer wurden bereits bestimmt, so dass eine Adaption mit dem Fahrzeug verwirklicht werden kann. Es existiert aber kein messtechnischer Ablauf mit der zugehörigen Einzelkinematisierung der Systeme und daher sind auch keine Berechnungen der Fahrwerkgeometriewerte möglich. Das soll nachfolgend in dieser Arbeit realisiert werden, um ein funktionsfähiges Messsystem für das spätere Gesamtkonzept zu erhalten.

### 2.6.2 Konzept zur Vermessung der Fahrwerkgeometrien mittels Radadaption

Um einen ersten Ansatz zur Vermessung des Fahrzeugfahrwerks in der Montagelinie zu geben, wurde dieser bereits in einem möglichen Prozessablaufkonzept in der Vorarbeit aufgezeigt. Der aktuelle Prototyp des Systems ist für einen getakteten Montageprozess ausgelegt. Bei dem Messkonzept wurde unter anderem auch die Fließmontage berücksichtigt. Daher kommen für die Aufgabe der Synchronisierung Lineareinheiten zum Einsatz. Darauf sollen sich die Radadaptionseinheiten befinden und mit dem Fahrzeug in der Montagelinie synchronisiert werden. Für eine Vermessung, nur an der Fahrzeughinterachse, ergäbe sich damit folgender Prozessablauf, der auch in Abbildung 2.36 dargestellt ist: [OTT14]

1. Synchronisation der Radadaptionseinheit mit dem Fahrzeug im Montagegehänge
2. Ermittlung der Radnabenposition der Fahrzeughinterachse
3. Eilfahrt in Vorposition
4. Langsames Andocken der Radadaptionseinheit an die Radnabe
5. Verspannen der Dehnungsgreifer des RAK mit der Fahrzeugradnabe
6. Freischalten der Freiheitsgrade der Radadaptionseinheit (schwimmende Funktion)
7. Spannungsfreies Anheben der Achsschenkel der Hinterachse bis zur konstruktiven Nulllage des Fahrzeugs

8. Durch Drehbewegungen des Adaptionkopfs während und nach dem Hubvorgang sollen zusätzliche Verspannungen des Fahrwerks gelöst und dadurch ein „Setzen“ der Achse erreicht werden
9. Anschließend folgt der Messvorgang in Form einer Umschlagkompensationsmessung und der Messung der Einzelspur- und Sturzwerte
10. Berechnung der geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs
11. Ablassen der Achsschenkel der Hinterachse
12. Verspannung zwischen Adaptionkopf und Radnabe lösen
13. Schließen der Freiheitsgrade des Systems
14. Langsames Abdocken des RAK von der Radnabe
15. Radadaptionssystem in Eilfahrt zur Ausgangsposition zurückgefahren

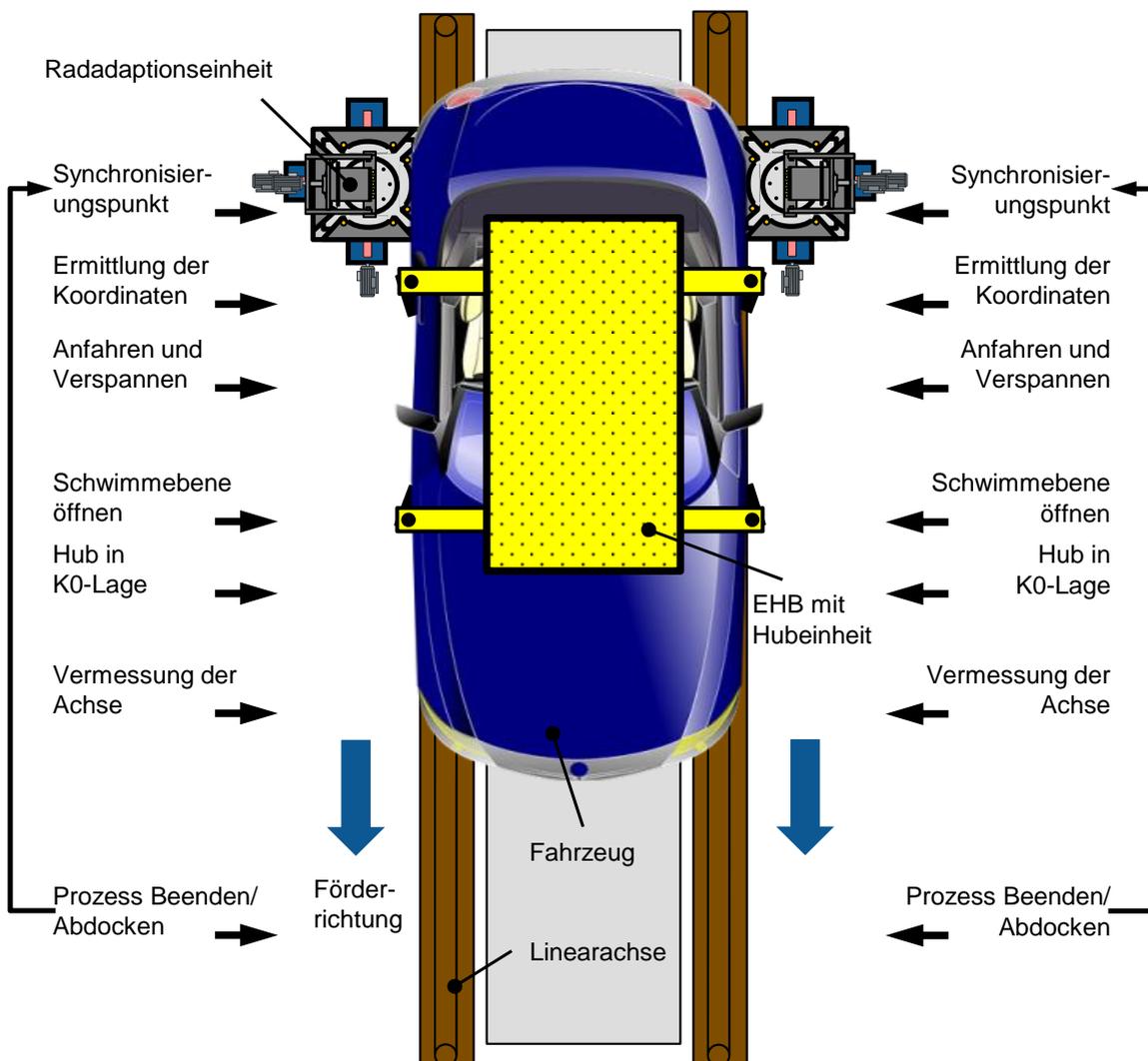


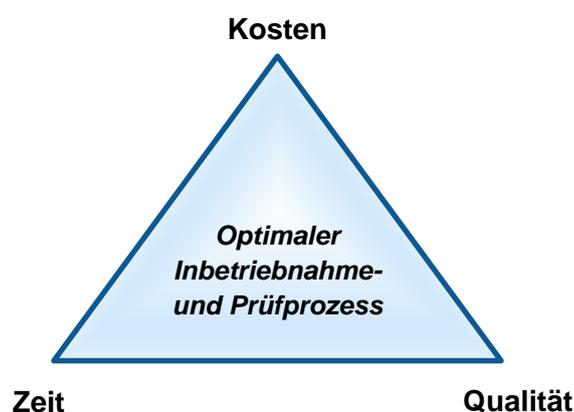
Abbildung 2.36: Konzept zur Vermessung der Fahrzeughinterachse mit dem Radadaptionssystem [OTT14]

### 3 Anforderungen an ein System zur Inbetriebnahme und Prozessabsicherung

Nachdem die Grundlagen zur Fahrzeuginbetriebnahme und die bisherigen Forschungsansätze zu diesem Bereich aufgezeigt wurden, werden die Potenziale für das Vorhaben und Vorgehen zum Erreichen des Gesamtziels in diesem Kapitel dargestellt. Anschließend werden die sich daraus ergebenden Forschungsfragen abgeleitet.

#### 3.1 Potenziale zur Effizienzsteigerung und Absicherung von Inbetriebnahmeprozessen

Die Inbetriebnahme des Fahrzeugs ist ein essenzieller Schritt bei der Fahrzeugproduktion. Dabei ist der optimale Inbetriebnahmeprozess von Interessen und Einflussfaktoren bestimmt, die im Wesentlichen von drei Leistungszielen getrieben sind. Sie stellen das Dreieck aus Kosten, Zeit und Qualität dar, das in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Die Verfolgung dieser Ziele zeigt, dass sie in einem Zielkonflikt zueinander stehen. Bei Planung der Produktions- und Inbetriebnahmeprozesse sollte die Einteilung der Leistungsziele so erfolgen, dass sie das Optimum erreichen. Kosten entstehen dabei vor allem bei den Investitionen für Betriebs- und Prüfmittel, aber auch laufende Betriebskosten sind nicht zu vernachlässigen. Die Zeit, die für die einzelnen Inbetriebnahmeschritte benötigt wird, hängt wiederum vom Umfang und der Tiefe der Prüfungen ab, die zur Absicherung nach der Fahrzeugmontage und Inbetriebnahme notwendig werden. Diese wiederum bestimmen die erzeugte Qualität, die der OEM durch seine Qualitätsansprüche vorgibt. Daraus wird eine direkte Abhängigkeit der drei Leistungsziele Kosten, Zeit und Qualität für einen optimalen Inbetriebnahme- und Prüfprozess ersichtlich [REI15, S. 430; WES06, S. 68f.]



**Abbildung 3.1: Kenngrößen für einen automobilen Inbetriebnahmeprozess [REI15, S. 430]**

Natürlich ist es für den OEM von großer Bedeutung, die Produktionskosten zu senken. In den letzten Jahren sind die Faktoren Qualität und Zeit für eine langfristige Erfolgssicherung des

Unternehmens jedoch immer wichtiger geworden. Gerade bei den heutigen und zukünftigen Fahrzeugtechnologien spielt der Faktor des hohen Qualitätsniveaus eine wichtige und essenzielle Rolle. Dazu gehört es, dem Kunden ein Fahrzeug mit voll funktionsfähigen und dokumentiert überprüften Assistenzsystemen zu übergeben. [REI15, S. 430] Um Zeit und Kosten zu sparen, verlagern einige OEMs auch die Kalibrierungen in das Kundenumfeld. Dabei sollen sich die Umfeldsensoren der Systeme, über mehrere hundert durch den Kunden gefahrene Kilometer, selbst anlernen. Das führt zu einer starken Minderung des Qualitätsniveaus, da keine Absicherung des Produktionsprozesses ab Kilometer Null der Fahrzeuge erfolgen kann. Im Umkehrschluss müsste also eine höhere Qualität mit höheren Kosten und Zeiten innerhalb der Produktion verbunden sein. [WES06, S. 69] Die Ziele dieser Arbeit sollen dem Umkehrschluss entgegenwirken. Es sollen Potenziale aufgezeigt werden, um eine hohe Qualitätsgüte zukünftiger sicherheitsrelevanter Fahrzeugsysteme zu gewährleisten und dabei Kosten und Zeiten auf den Prüfständen nicht weiter zu steigern.

Dass bei zukünftigen Fahrzeuggenerationen keine Qualitätseinbußen durch fehlende Absicherung der Inbetriebnahmeprozesse entstehen dürfen, veranschaulichen die aufgezeigten Anforderungen in Kapitel 2.4. Das wird gerade bei den entwicklungsseitig geforderten Toleranzen ersichtlich, die kaum noch realisierbar sind. Wie darin auch dargelegt wurde, ist es wichtig, den gesamten Entstehungszyklus über Produkt, Prozess und Betriebsmittel zu betrachten, da auf jeder Ebene Fehler entstehen können. Dass zukünftig hohe Qualitätsstandards bei der Verifizierung und Validierung von hochautomatisierten Fahrzeugen benötigt werden, soll anhand der ISO 26262 aufgezeigt werden.

Die ISO-Norm 26262 für Fahrzeuge ist die Definition von vier Automotive Safety Integrity Levels (ASIL). Diese Sicherheitsanforderungsstufen sind Vorgaben für sicherheitsrelevante Funktionen von Fahrzeugsystemen, wie beispielsweise Fahrerassistenzsysteme für das automatisierte Fahren. Die definierten Sicherheitslevels sind in Abbildung 3.2 beschrieben. [BOR14]

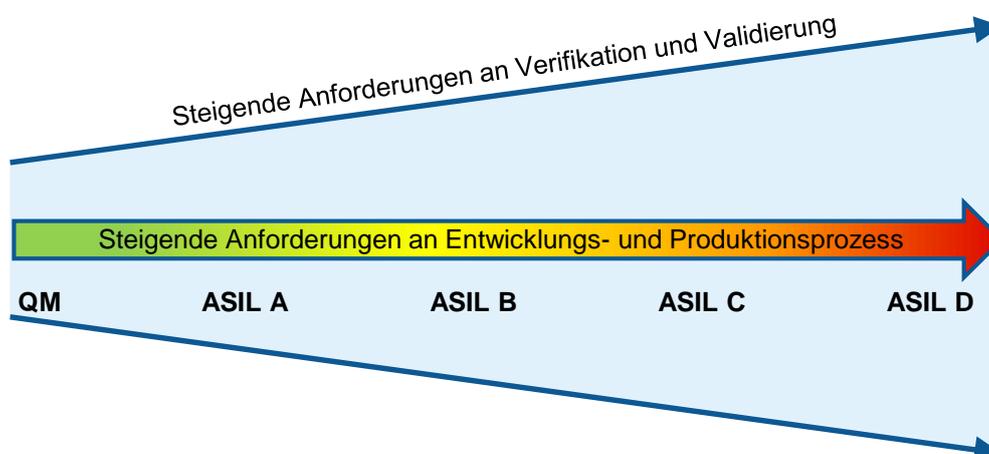


Abbildung 3.2: Sicherheitslevels Automotive Safety Integrity Levels (ASIL) nach ISO 26262 [ISO18; ZEN15]

Die Sicherheitslevels sind definiert von ASIL A bis ASIL D, wobei D der höchsten Anforderungsstufe entspricht. Jede Stufe bringt ein unterschiedlich hohes sicherheitsrelevantes Risiko mit sich. Je höher die Einstufung, desto höher sind die Mindestanforderungen nach ISO 26262 an den Entwicklungs- und Produktionsprozess, was wiederum mit erheblichen Konsequenzen und Kosten verbunden ist. Diese Kosten entstehen unter anderem dadurch, dass mit steigendem Risikolevel auch die damit verbundene Verifikation und Validierung des Produkts zunimmt, wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Entsteht kein Risiko oder ist es unwahrscheinlich, dass ein gefährliches Ereignis auftreten kann, dann wird kein ASIL definiert. In diesem Fall wird die Bezeichnung „Qualitätsmanagement“ (QM) festgelegt. Ist QM definiert, bedarf es keiner Mindestanforderungen aus der Norm an die Fahrzeugsysteme. [BOR14, S. 333; ZEN15]

Um die Klassifizierung der Sicherheitslevels vornehmen zu können, wird ein Fahrzeugsystem basierend auf drei Parametern bewertet. Dabei handelt es sich um die eintretende Unfallschwere (Severity S1 – S3), die situationsbedingte Eintretenswahrscheinlichkeit (Probability of Exposure E1 – E4) und die Kontrollierbarkeit (Controllability C1 – C3) nach einem Versagen oder Ausfall des Fahrzeugsystems. Ob und nach welchem Sicherheitslevel ein Fahrzeugsystem gemäß der Risikoparameter eingestuft wird, zeigt Tabelle 3.1. [ISO18; ZEN15]

**Tabelle 3.1: Klassifizierung der Automotive Safety Integrity Levels (ASIL) nach ISO 26262 [ISO18; KUN19; BOR14; ZEN15]**

Unfall-schwere	Eintretenswahrscheinlichkeit	Kontrollierbarkeit / Beherrschbarkeit des Fehlers		
		C1 Einfach beherrschbar ( ≥ 99 % aller Fahrer können die Situation beherrschen )	C2 Normalerweise beherrschbar ( ≥ 90 % aller Fahrer können die Situation beherrschen )	C3 Schwer oder nicht beherrschbar ( ≥ 90 % aller Fahrer können die Situation beherrschen )
<b>S1</b> Leichte bis mittelschwere Verletzungen	E1 Sehr niedrig	QM	QM	QM
	E2 Niedrig	QM	QM	QM
	E3 Mittel	QM	QM	A
	E4 Hoch	QM	A	B
<b>S2</b> Schwere Verletzungen	E1 Sehr niedrig	QM	QM	QM
	E2 Niedrig	QM	QM	A
	E3 Mittel	QM	A	B
	E4 Hoch	A	B	C
<b>S3</b> Schwerste, wahrscheinlich tödliche Verletzungen	E1 Sehr niedrig	QM	QM	A
	E2 Niedrig	QM	A	B
	E3 Mittel	A	B	C
	E4 Hoch	B	C	D

Die zuvor dargestellte Klassifizierung der Fahrzeugsysteme ist diejenige in aktueller Anwendung. Am Beispiel eines Adaptive Cruise Control (ACC) System eines Fahrzeugs soll eine Klassifizierung nach Tabelle 3.1 vorgenommen werden. Das Gesamtsystem zur Regelung des spezifizierten Abstands zum vorrausfahrenden Fahrzeug mittels LLR Sensors wird nach heutigem Stand für einen Systemausfall wie folgt eingestuft: [ZEN15]

**Risiko bei Systemausfall:** Auffahrunfall mit verzögerndem vorrausfahrendem Fahrzeug.

- **S2** Unfallschwere: Schwere Verletzungen  
→ Auffahrunfall meistens mit geringer Differenzgeschwindigkeit.
- **E4** Eintretenswahrscheinlichkeit: häufig  
→ Häufige Fahrten mit ACC und vorausfahrendem Fahrzeug.
- **C1** Kontrollierbarkeit: einfach beherrschbar  
→ Der Fahrer erkennt das Unterschreiten des Mindestabstands und reagiert darauf.

Bei der entsprechenden Klassifizierung würde dem ACC System die ASIL A zugewiesen werden, wie in Tabelle 3.1 farblich markiert. Das zeigt, dass entwicklungs- und produktionsseitig erhöhte Anforderungen an das System gestellt werden, die daher unter anderem auch Kalibrieraufwände im EOL für den Radarsensor des Systems rechtfertigen. Nach heutigem Stand funktioniert das jedoch nur, da durch Parameter „C“ die Kontrollierbarkeit bei der Risikobewertung gegeben ist. Das System ist deshalb kontrollierbar, weil ein Fahrzeugführer anwesend ist, der das System überwacht und bei Fehlern eingreifen kann.

Bei zukünftigen Fahrzeugsystemen der Stufe 4 oder 5 des autonomen Fahrens sieht das jedoch anderes aus. Dabei muss kein Fahrer mehr anwesend sein bzw. er braucht die Systeme nicht mehr zu überwachen. Der Fahrzeugführer ist nicht mehr Bestandteil in der Regelschleife für die Kontrollierbarkeit des Systems. Daher kann der Parameter C, nach heutigem Stand der ISO 26262, nichts mehr zur ASIL Bewertung beitragen. [ZEN15] Er muss zukünftig neu klassifiziert werden. Stand heute, kann man davon ausgehen, dass bei einer neuen Klassifizierung ein wesentlich höherer Sicherheitslevel ASIL gefordert wird. Daher werden, wie Abbildung 3.2 zeigt, neben erhöhten entwicklungsseitigen Anforderungen auch produktionsseitige Anforderungen und Absicherungen durch Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen gefordert werden.

Die in Kapitel 2.4 dargestellten Anforderungen und die bei der Fahrzeuginbetriebnahme daraus resultierenden Risiken werden daher nicht mehr tragbar sein und müssen produktionsseitig abgesichert werden. Deshalb wird nicht nur eine Inbetriebnahme, sondern auch eine redundante Prüfung auf die korrekt erfolgte Inbetriebnahme bzw. Kalibrierung erfolgen müssen. Dabei muss der Nachweis erbracht werden, dass bei der Verifizierung die festgelegten Anforderungen durch die Entwicklung erfüllt werden, aber auch bei der Validierung die Anforderungen für den spezifischen Anwendungsfall im Kundenbetrieb erfüllt sind [DIN15]. An diesem Punkt entstehen hohe Anwendungspotenziale für das in dieser Arbeit vorgestellte Gesamtkonzept und die dafür entwickelte Technologie.

Neben der zukünftigen zusätzlich benötigten Absicherung der Systeme müssen auch die Produktionskosten und –zeiten optimiert werden, wie in der Abbildung 3.1 anhand der Kenngrößen für einen optimalen Inbetriebnahmeprozess dargestellt worden ist. Diese Kostenreduzierung kann nur durch geringere Prüfzeiten im EOL und einer damit verbundenen Reduzierung der Prüf- und Betriebsmittel sowie der Personalkosten stattfinden. Die Personalkostenreduzierung kann unter anderem durch einen automatisierten Transport der Fahrzeuge im EOL und einen automatisierten Prüfablauf auf den Prüfständen erreicht werden. Dazu gab es bereits einen Forschungsansatz, die Fahrzeuge mittels vollautomatisierten Flurförderfahrzeugen innerhalb des EOLs zu bewegen [EBE15]. Dieser Ansatz reduziert zwar die Personalkosten, steigert jedoch die Investitions- und Betriebskosten für die benötigten Flurförderfahrzeuge in hohem Maße, so dass sich daraus kein wirtschaftlicher Vorteil für den OEM ergäbe.

Aufgrund der zukünftigen neuen Fahrzeugtechnologien kann das Fahrzeug für das Transportieren im EOL selbst fahrerlos genutzt werden. Das kann durch autonome Fahrfunktionen realisiert werden. Dadurch können die Kosten stark reduziert werden, weil weder Werker noch Betriebsmittel benötigt werden, denn die Aufgabe wird an das produzierte Produkt selbst übergeben. Diese Potenziale können jedoch nur ausgenutzt werden, wenn die Fahrzeugsysteme innerhalb der Produktionslinie befähigt bzw. kalibriert werden. Das ist notwendig, um das Fahrzeug sicher mit seinen eigenen Systemen im EOL bewegen zu können. Durch Nutzung eines Systems zur In-Line Inbetriebnahme der Fahrwerk- und Fahrerassistenzsystemkomponenten kann eine Reduzierung der Prüfstände im EOL erfolgen, da sie nur noch zur zuvor beschriebenen Validierung genutzt werden. Durch Umsetzung der aufgezeigten Potenziale ergibt sich eine Kostenreduzierung zum Status Quo für Investitions- und Betriebskosten, die beispielhaft in Abbildung 3.3 dargestellt sind.

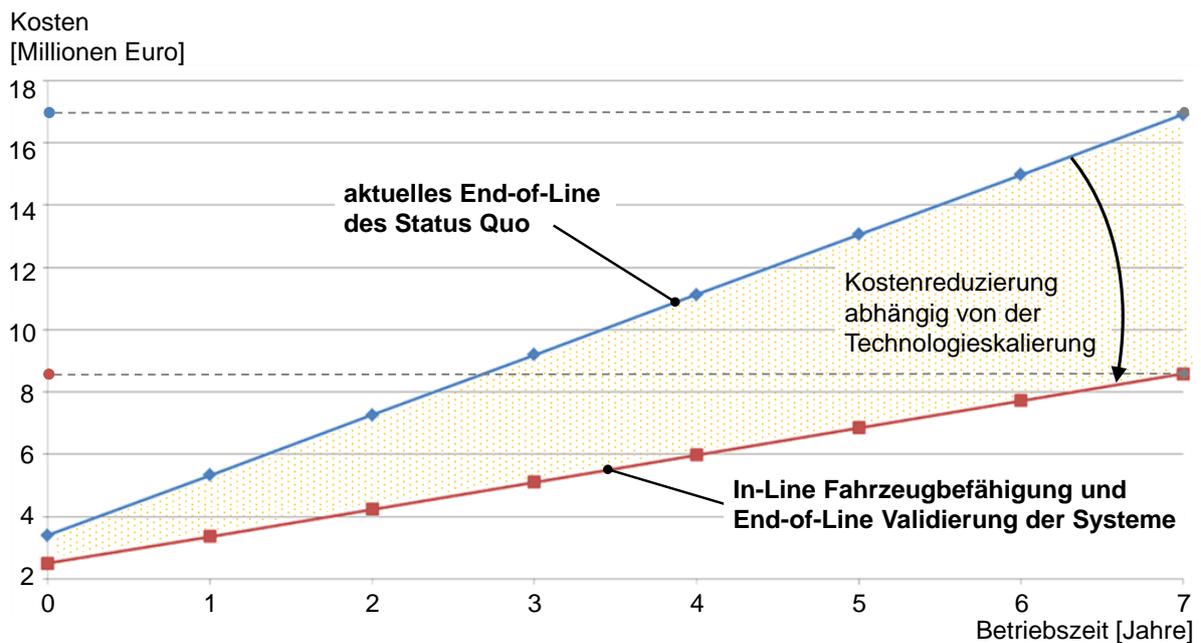


Abbildung 3.3: Potenziale zur Kostenreduzierung [OTT18]

In Abbildung 3.3 sind die Investitionskosten zum Anschaffungsjahr Null und die laufenden Betriebskosten über eine Amortisierungszeit von 7 Jahren für einen Status Quo und ein In-Line Konzept aufgezeigt. Die Berechnungen wurden für ein Werk angenommen, das in einem Dreischichtmodell mit 40 Jobs / h und einer typischen Prüfprozesszeit von drei Minuten arbeitet. Beim Status Quo werden dabei zwei Fahrwerkgeometrieprüfstände, zwei Fahrerassistenzsystemprüfstände und ein kombinierter Nacharbeitsprüfstand im EOL benötigt, die bei einer Investitionssumme von ca. 3,5 Millionen Euro liegen. Für den laufenden Betrieb werden sieben Werker auf drei Schichten benötigt, was 21 Werkern in der Summe entspricht. Die Personal- und laufenden Betriebskosten sowie die Wartungs- und Instandhaltungskosten beziffern sich daher auf ca. 2 Millionen Euro pro Jahr. Dadurch wird eine Gesamtsumme von ca. 17 Millionen Euro nach 7 Jahren Betriebszeit erreicht. [OTT18]

Beim In-Line Konzept, das in dieser Arbeit beschrieben wird, wird ein Radadaptions- und ein Targetsystem in der Montagelinie benötigt. Zusätzlich ist ein kombinierter Validierungs- und Nacharbeitsprüfstand im EOL notwendig. Diese Prüftechnik beläuft sich auf eine Investitionssumme von ca. 2,5 Millionen Euro. Für den laufenden Betrieb werden zwei Werker zur Fahrwerkeinstellung in der Montagelinie und ein Werker am Validierungsprüfstand des EOLs auf drei Schichten benötigt, was 9 Werkern in der Summe entspricht. Die Personal- und laufenden Betriebskosten sowie die Wartungs- und Instandhaltungskosten betragen daher ca. 1 Millionen Euro pro Jahr. Demnach wird eine Gesamtsumme von ca. 9 Millionen Euro nach 7 Jahren Betriebszeit erreicht. Daraus wird ersichtlich, dass sich je nach Skalierung und Ausbaustufe des In-Line-System Konzepts erhebliche Kosten einsparen lassen und trotzdem ein hohes Qualitätsniveau für zukünftige Fahrzeugsysteme gewährleistet wird. [OTT18]

Durch die aufgezeigten Potenziale zur Kosteneinsparung und Produktionsabsicherung zukünftiger Fahrzeugsysteme kann mit dem richtigen Konzept und Betriebsmittel eine signifikante Optimierung des EOLs erfolgen. Die Potenziale stimmen mit den verfolgten Zielen dieser Arbeit überein. Dabei sollen die Produktionsabsicherung für die sicherheitsrelevanten Fahrzeugsysteme, das automatisierte Fahren im EOL und die Verschlankeung des aktuellen EOLs durch den Einsatz eines neuen In-Line Betriebsmittels ermöglicht werden. Durch Erreichen der Ziele werden die Potenziale derart ausgeschöpft, dass eine hohe Effizienzsteigerung der gesamten Fahrzeuginbetriebnahme ermöglicht wird.

### **3.2 Vorgehensmodell und daraus abgeleiteter Forschungsansatz**

Ziel dieser Arbeit ist es, eine effiziente und produktionsseitig abgesicherte Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen und hochautomatisierten Fahrzeugen zu ermöglichen. Dazu ist eine Betriebsmittelentwicklung bzw. –modifikation für das dargestellte Zielkonzept notwendig. Das Betriebsmittel ist in diesem Fall ein mechatronisches System, das hochpräzise Messungen am Fahrzeugfahrwerk vornehmen muss, um daraus Umfeldsensoren des Fahrzeugs kalibrieren zu können. Die Entwicklung des Messsystems für das Betriebsmittels soll in dieser Arbeit

dem Produktentstehungsprozess für mechatronische Systeme nach VDI 2206 folgen. Der Produktentstehungszyklus ist dabei ein Teil des Produktlebenszyklus, der sich wie folgt definiert: [EIG09]

- Definition von Anforderungen
- Produktplanung
- Entwicklung
- Prozessplanung
- Produktion
- Kundenbetrieb
- Recycling

Der Produktentstehungsprozess erstreckt sich von der Aufnahme der Kundenanforderungen und -bedarfe im Markt bis hin zur Serienproduktion. Ziel dabei ist es, funktionsfähige und produzierbare Produkte zu erzeugen. [SCH15] Ein typisches Vorgehensmodell bei der Produktentwicklung mechatronischer Systeme ist das V-Modell nach der VDI 2206. Dabei beschreibt das V-Modell als Makrozyklus ein generisches Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme. Das Modell für einen Zyklus ist in der Abbildung 3.4 dargestellt. Ein komplexes mechatronisches Produkt, wie das komplette Radadaptionssystem für die In-Line Fahrwerkgeometrievermessung, entsteht nicht innerhalb eines Makrozyklus, sondern es ist eine Vielzahl von Durchläufen an Entwicklungszyklen erforderlich. [VDI04]

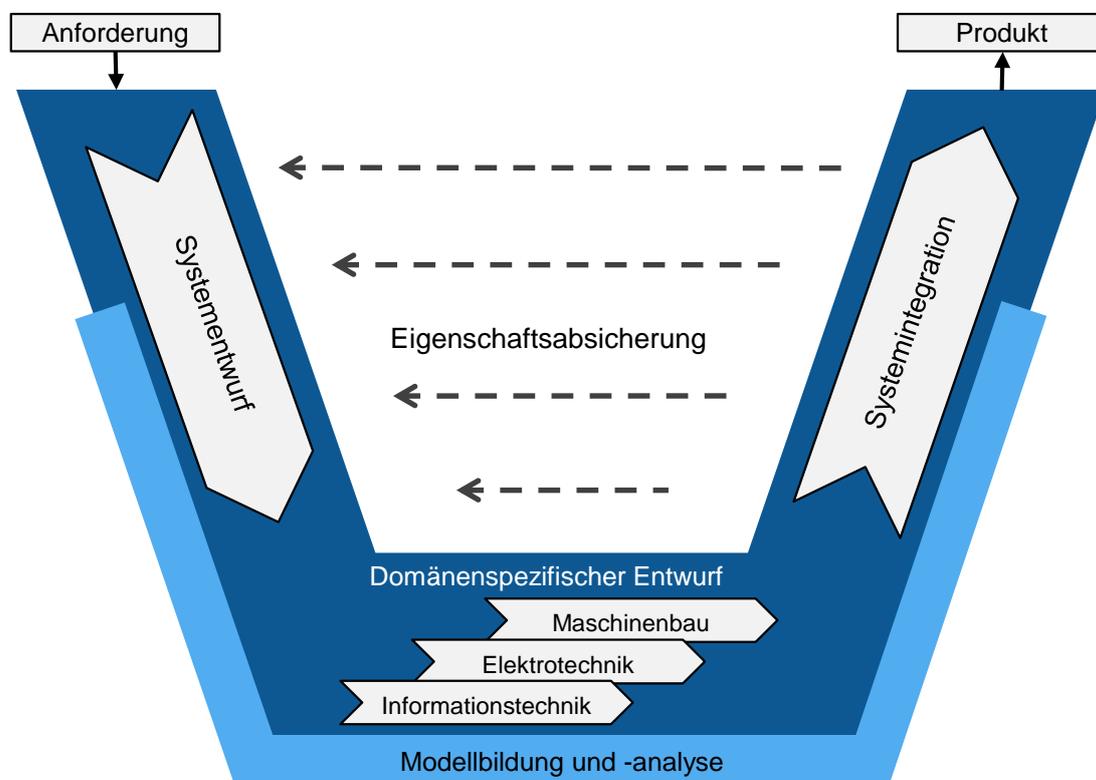
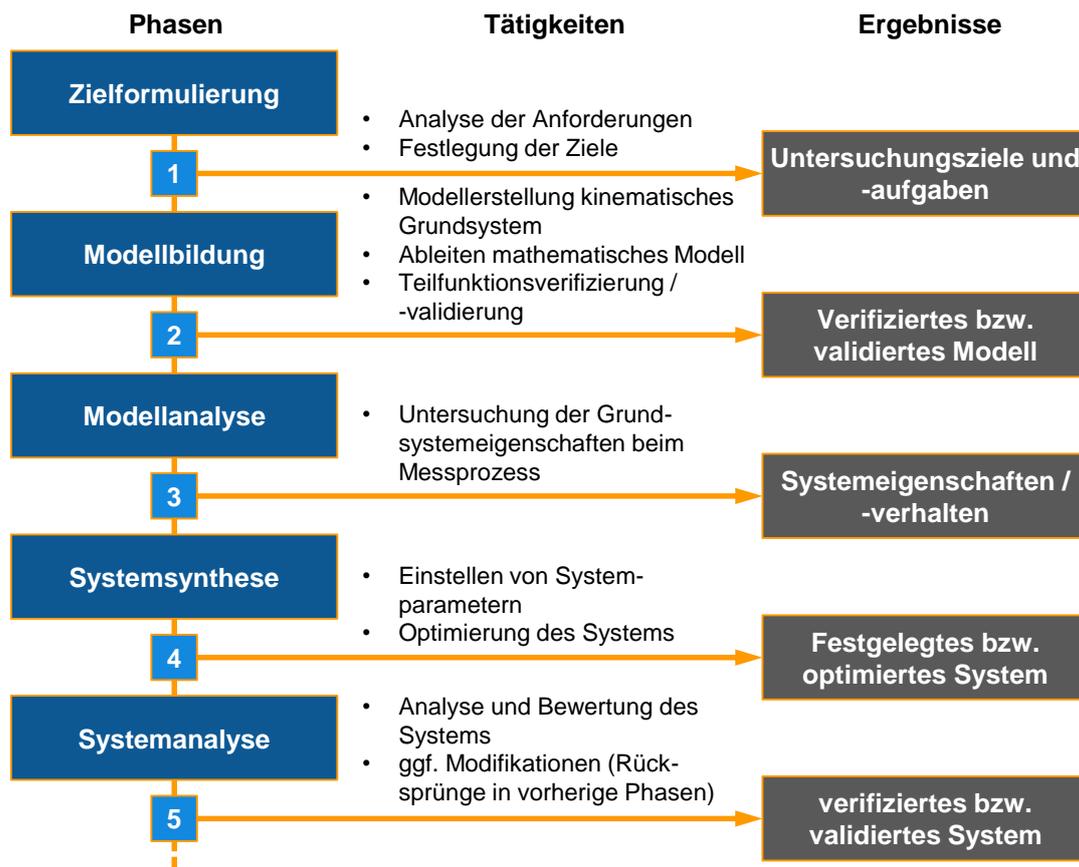


Abbildung 3.4: V-Modell als Makrozyklus nach VDI 2206 [VDI04]

In dieser Arbeit folgt die Produktentwicklung dem V-Modell, da es sich als Entwicklungsstandard über viele Unternehmensbranchen hinweg etabliert hat. Da nicht nur Neugestaltungen beschrieben werden, sondern auch Modifikationen bzw. Erweiterungen an einem komplexen bestehenden System notwendig sind, findet auch dabei das Vorgehensmodell Anwendung. Es werden Anforderungen definiert, die in den Systementwurf einfließen und nach der Umsetzung einer Test- und Validierungsphase unterzogen werden. Um eine Absicherung des späteren Messsystems sicherzustellen, werden die Validierungsdaten reflektiert und fließen zu Optimierungszwecken wieder in den Systemaufbau ein.

Da in dieser Arbeit auch ein mathematisches Modell für eine Kinematisierung des Messsystems entwickelt werden muss, wurde dazu der Ansatz des modellbasierten Systementwurfs nach VDI 2206 gewählt. Dazu wurde das Vorgehensmodell für den Anwendungsfall abgeleitet und in fünf Schritte gegliedert. Der Vorgang ist in Abbildung 3.5 dargestellt und gibt dabei die fünf Phasen, die Tätigkeiten innerhalb der Phasen und das Ergebnis jeder Phase wieder. Eine Simulation findet dabei jedoch nicht statt. Das Modell soll bei der Softwareentwicklung mit Hilfe des Entwicklungstools Matlab dienlich sein.

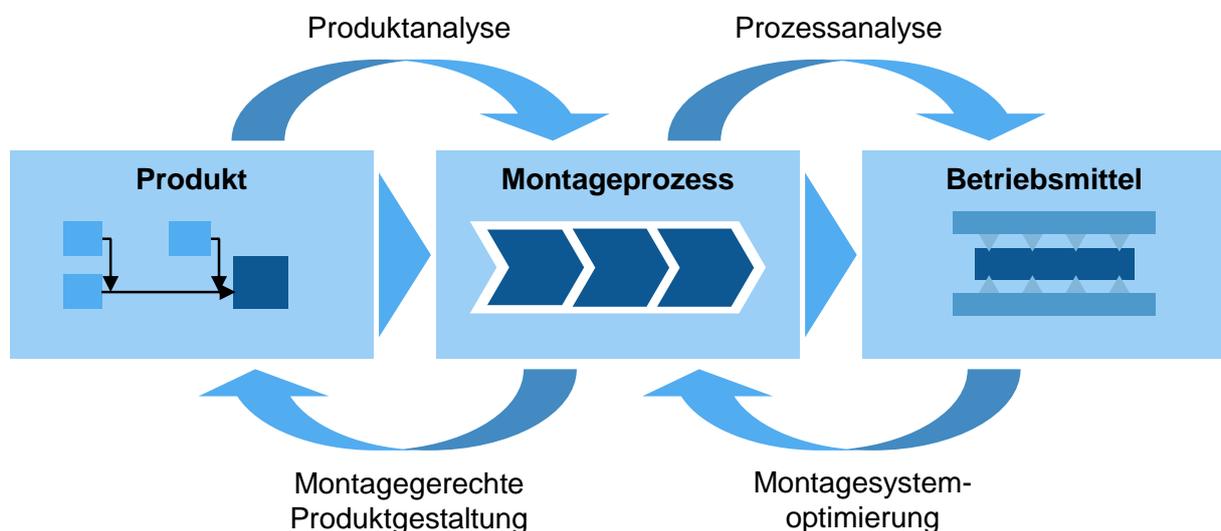


**Abbildung 3.5: Abgeleitetes Vorgehen beim modellbasierten Systementwurf nach VDI 2206 / VDI 2221 [VDI04; VDI18]**

Die Anwendung dieser Modellbildung erfordert eine gewisse kritische Grundhaltung und eine dauernde Überprüfung der Plausibilität der verifizierten Daten [VDI04]. Aus diesem Grund wird das zu entwickelnde mathematische Modell in Teilfunktionen untergliedert und diese einzeln

auf ihre Funktion getestet. Die einzelnen Teilfunktionen werden später zum gesamten Systementwurf zusammengeführt und im Verbund validiert.

Bei Validierung des mathematischen Modells im Verbund mit dem Gesamtsystem unter produktionsähnlichen Bedingungen steht vor allem die Herausforderung im Mittelpunkt, dass Wechselwirkungen zwischen den Inbetriebnahmeprozessen, Betriebsmittelkomponenten und dem Messobjekt Fahrzeug auftreten. Diese sind in der Regel nicht vollständig bekannt, was zu einem erhöhten Validierungsaufwand führen kann. Gerade bei einer hohen Varianz der Messobjekte, die mit heutigen Fahrzeuggenerationen gegeben ist, sind die Auswirkungen von Veränderungen auf die gesamte Wertschöpfung nicht prognostizierbar. Dieses Problem soll durch ein integratives Produkt- und Prozessdesign gelöst werden, indem die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel betrachtet werden. [SCH11, S. 947f.] Die Wechselwirkungen, die sich beim Entstehungsprozess des Betriebsmittels ergeben, sind in Abbildung 3.6 dargestellt.



**Abbildung 3.6: Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel [MÜL13; SCH11, S. 948]**

Aufgrund der Restriktionen aus dem Produkt Fahrzeug, Inbetriebnahme- / Kalibrierprozess und den Betriebsmitteln Radadaptions- / Targetsystem sowie den betriebswirtschaftlichen Einflüssen wird die Planung sehr komplex. Da das Betriebsmittel in dieser Arbeit weiterentwickelt wird, müssen die nicht vorhersehbaren Wechselwirkungen mit dem Prozess und dem Messobjekt danach untersucht werden. Daher können im Nachhinein Anpassungen bzw. Optimierungen notwendig werden, um die Anforderungen des Gesamtvorhabens zu erfüllen.

Nach den dargestellten Vorgehensweisen werden die Anforderungen an die Betriebsmittel definiert, die nach Verifizierung und Validierung des Gesamtvorhabens erreicht werden müssen. Das ist erforderlich, um einen betriebswirtschaftlichen und qualitativen hochwertigen Inbetriebnahmeprozess sicherzustellen, der sich am heutigen Stand der Technik orientieren soll. Die

Anforderungen werden dabei in die zehn wichtigsten Punkte gegliedert und in Tabelle 3.2 visualisiert.

**Tabelle 3.2: Anforderungen an die neuen Betriebsmittel für das Gesamtkonzept**

Anforderung	Beschreibung
<b>A1: Integrierbarkeit</b>	Einfache Integrierbarkeit des Radadaption- und Targetsystems in die Montagelinie.
<b>A2: Taktzeit</b>	Einhaltung der Linientaktzeit von wenigstens 90 Sekunden für ein Produktionswerk mit 40 Jobs / h.
<b>A3: Skalierbarkeit</b>	Technologieskalierbarkeit über Betriebsmittel Modulgruppen, um auf einen prozessabhängigen Einsatz flexibel reagieren zu können.
<b>A4: Wirtschaftlichkeit</b>	Wirtschaftlicher Vorteil durch Einsparungen von Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zum Status Quo.
<b>A5: Verfügbarkeit</b>	Das Radadaptionssystem soll eine hohe Verfügbarkeit aufweisen und bei einem Systemausfall über eine Notfallstrategie verfügen.
<b>A6: Genauigkeit</b>	Einhaltung einer Messgenauigkeit der Fahrzeugspur von $\pm 1$ Winkelminute im Vergleich zum Status Quo.
<b>A7: Reproduzierbarkeit</b>	Einhaltung einer Reproduzierbarkeit der Fahrzeugspur von $\pm 0,2$ Winkelminuten im Vergleich zum Status Quo. Gemessen an einem Referenzmessobjekt / Kalibrierkörper.
<b>A8: Fähigkeiten</b>	Die Systemfähigkeiten müssen mittels einer Messsystemanalyse (MSA) nachgewiesen werden.
<b>A9: Kalibrierbarkeit</b>	Die einfache Kalibrierbarkeit mittels eines Kalibrierkörpers muss für jedes Messsystem des Gesamtsystems gegeben sein.
<b>A10: Nutzbarkeit</b>	Das Radadaptionssystem soll für zukünftige Inbetriebnahmeprozesse des EOLs flexibel nutzbar sein.

Die dargestellten Anforderungen stimmen mit den Kundenanforderungen für den Entwicklungsprozess des Betriebsmittels überein. Die innerhalb der Anforderungen definierten Parameter entsprechen dem heutigen Stand der Technik, die laut OEM Vorgabe für aktuelle Betriebsmittel zur Fahrwerkgeometrievermessung und Fahrerassistenzsystem-Inbetriebnahmen gelten [GRE18]. Um den Anforderungen gerecht zu werden, muss nachfolgend das bestehende Messsystem einer Analyse zur Feststellung der Eignung unterzogen werden. Mit den daraus gewonnenen Daten kann eine Modifikation des Systems durchgeführt und das Gesamtkonzept aufgezeigt werden. Im Anschluss daran kann mit der Weiterentwicklung des Systems begonnen werden, um das Radadaptionssystem in einen messfähigen Zustand zu versetzen. Ab diesem Punkt kann die Validierung des Radadaptionssystems mittels einer Mess-

systemanalyse (MSA) erfolgen. Nach positiver Validierung wird ein möglicher Aufbau des Targetsystems vorgestellt und in das Gesamtvorhaben mit dem Radadaptationssystem gemeinsam implementiert. Abschließend werden die Stärken und Schwächen des Systems diskutiert und ein Resümee gezogen.

Des Weiteren können Forschungsfragen anhand der dargestellten Vorgehensweise und der definierten Anforderungen an die neuen Betriebsmittel für das Gesamtvorhaben dieser Arbeit abgeleitet werden. Dadurch wird der Ansatz zum geplanten Vorgehen verdeutlicht. Die primäre Forschungsfrage bezieht sich auf den Kern dieser Arbeit und lautet:

- Wie kann das EOL der automobilen Endmontage optimiert werden, um die Effizienz und Qualität der Inbetriebnahme zukünftiger Fahrzeugsysteme zu erhöhen?

Darauf aufbauend lassen sich weitere Forschungsfragen ableiten, die für die erfolgreiche Umsetzung des Ziels dieser Arbeit in folgenden Kapiteln beantwortet werden:

- Welche aktuellen und zukünftigen Inbetriebnahmeprozesse bieten ein Optimierungspotenzial und welcher Nutzen entsteht daraus?
- Können Inbetriebnahmeprozesse in die Fließmontagelinie ausgelagert werden?
- Wie kann ein automatisiertes System in die Montagelinie integriert werden und dabei die gleichen Messgenauigkeiten und Reproduzierbarkeiten bei gleichen Anforderungen wie auf dem Fahrwerkgeometrieprüfstand aufweisen?
- Wie kann eine qualitative produktionsseitige Absicherung für hochautomatisierte und autonome Fahrzeuggenerationen erfolgen?
- Wie kann eine Skalierung des Betriebsmittels für unterschiedliche Inbetriebnahmeprozesse umgesetzt werden?
- Welche Möglichkeiten gibt es, das neue System für weitere Inbetriebnahmeprozesse zu nutzen?

## 4 Technologie- und Prozessmodifikation anhand des Konzeptentwurfs

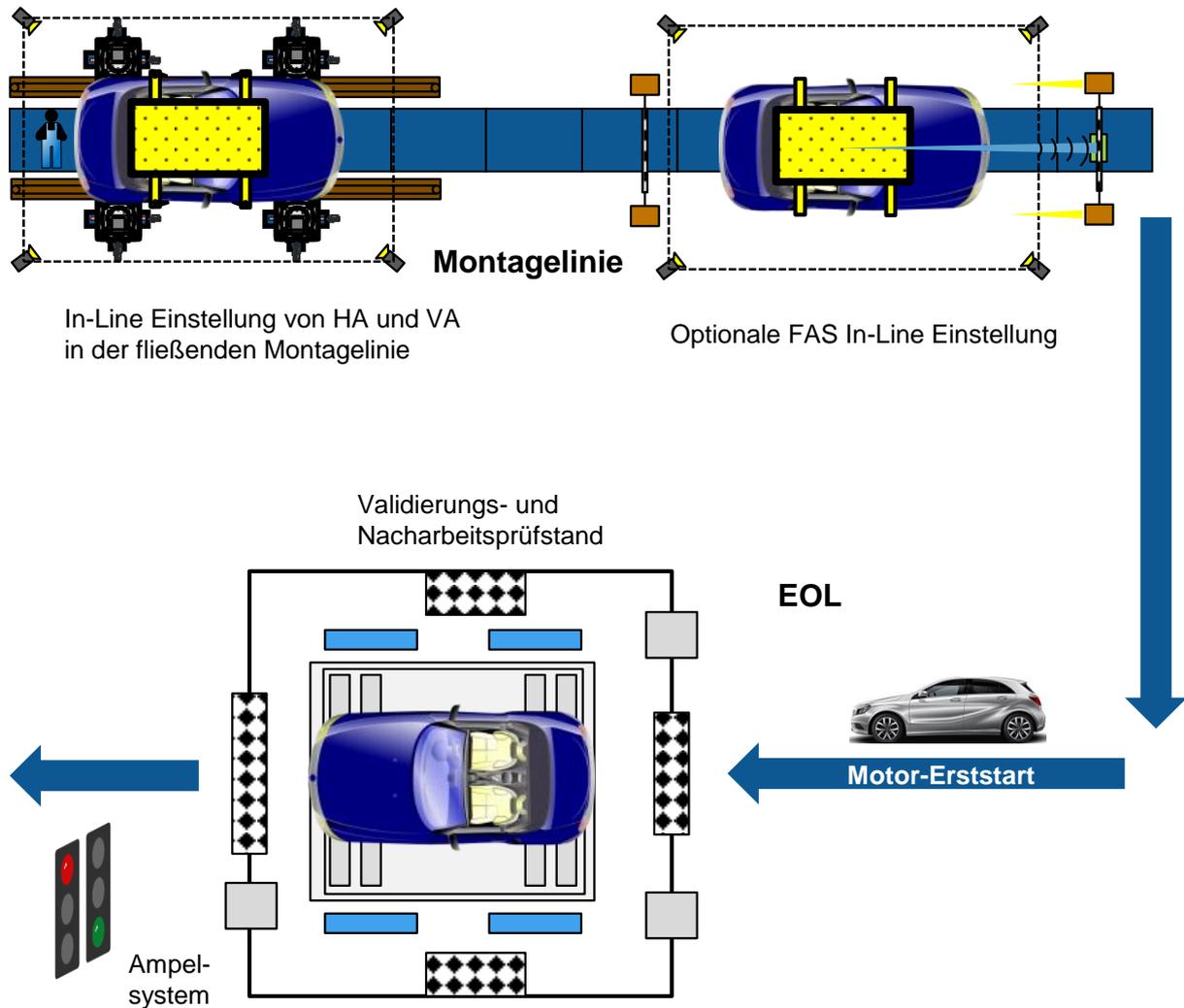
In diesem Kapitel wird das Zielbild für die angestrebte Gesamtkonzeption dargestellt. Es soll vermitteln, welche Betriebsmittel innerhalb der Montagelinie und am EOL benötigt werden. Da es die primäre Aufgabe dieser Arbeit ist, das bestehende Radadaptionssystem für die Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme nutzbar zu machen, muss es modifiziert werden. Dazu wird eine messtechnische Struktur aufgebaut und das System mit der entsprechenden Messtechnik versehen. Im Anschluss daran wird durch einen Dauertest das Verhalten des Radadaptionssystems untersucht, woraus notwendige mechanische und steuerungstechnische Modifizierungen des Systems abgeleitet werden. Bei erfolgreicher Umgestaltung entsprechender Teilkomponenten des Systems muss die Möglichkeit zur Kalibrierung der verbauten Messtechnik geschaffen werden. Abschließend wird noch ein Konzept zur Prozess- und Technologieskalierung aufgezeigt. So kann das Gesamtsystem im späteren Verlauf an die Kunden- und Inbetriebnahmeanforderungen angepasst werden.

### 4.1 Angestrebte Gesamtkonzeption für die Inbetriebnahme eines modernen Fahrzeugs

Um die zuvor dargestellten Ziele der Effizienzsteigerung des EOLs und der Produktionsabsicherung von automatisierten Fahrfunktionen zu erreichen, muss ein Gesamtkonzept erstellt werden. Es ist in einem Zielbild in Abbildung 4.1 dargestellt. Innerhalb der Montagelinie soll die Inbetriebnahme des Fahrwerks und der Fahrerassistenzsystemsensoren erfolgen. Dabei kann je nach Skalierung des Systems, wie in Kapitel 4.5 noch aufgezeigt wird, nur die geometrische Fahrachse des Fahrzeugs an der Hinterachse bestimmt oder auch das gesamte Fahrwerk vermessen werden. Daraus entstehen unterschiedliche Möglichkeiten für den weiteren Prozessverlauf. Im gezeigten Zielbild soll das komplette Fahrwerk mit einer Radadaptionseinheit für jede Fahrzeugachse in der Fließmontagelinie vermessen und nachfolgend durch einen Werker eingestellt werden. Optimalerweise findet dieser Fahrwerkeinstellprozess frühzeitig nach dem Fügen von Karosserie und Antriebsstrang innerhalb der Montagelinie statt, um die Fahrwerkgeometrien als Referenzbezüge festlegen zu können.

Neben der Fahrwerkvermessung und -einstellung sollen auch die Umfeldsensoren des Fahrzeugs kalibriert werden. Dafür bildet die geometrische Fahrachse den Referenzbezug, die durch die Fahrwerkvermessung mit dem Radadaptionssystem bereits bekannt ist. Da eine Fahrwerkvermessung jedoch frühzeitig innerhalb der Montagelinie erfolgen soll und die Umfeldsensoren aufgrund der finalen Kabelkontaktierung im Fahrzeug erst später kalibriert werden können, kann nicht immer beides in einem Produktionstakt stattfinden. Daher soll die zuvor gemessene geometrische Fahrachse an die Fahrzeugkarosserie „angeheftet“ und in einen

Folgetakt mitgenommen werden. Das soll mittels optischer Messsysteme erfolgen. Durch dieses Vorgehen wird das Radadaptionssystem nur einmal in der Montagelinie benötigt. Daraus ergibt sich eine große Flexibilität für das Eintakten der Montage- und Inbetriebnahmeprozesse in die Montagelinie. Entweder kann der Fahrwerksmess- und Einstellprozess zusammen mit der Umfeldsensor-Kalibrierung in einer Montagestation stattfinden oder es kann auf zwei separate Montagestationen aufgeteilt werden. Die Kalibrierung der Umfeldsensoren erfolgt dann mit dem Referenzbezug und dem entsprechenden Targetsystem für den zu kalibrierenden Umfeldsensor.



**Abbildung 4.1: Zielbild der Gesamtkonzeption für EOL und Montagelinie**

Durch Verlagerung der Inbetriebnahmeprozesse aus dem EOL auf die neuen Betriebsmittel in der Montagelinie ergibt sich für das EOL eine neue Struktur. Wie die Abbildung 4.1 zeigt, soll dort nur noch ein vollausgestatteter Validierungs- und Nacharbeitsprüfstand benutzt werden, um die Fahrwerkeinstellungen und Sensorsysteme zu überprüfen. Da die Fahrzeugsysteme bereits in Betrieb genommen wurden, ist lediglich eine redundante qualitative Prüfung der Systeme erforderlich. Diese kann mit einer wesentlich geringeren Prozesszeit gegenüber einer

vollumfänglichen Inbetriebnahme stattfinden. Die Fahrzeuge können durch die bereits in Betrieb genommenen Systeme automatisiert in den Validierungsprüfstand einfahren, überprüft und ausgefahren werden. Da kein Fahrzeugsystem eingestellt oder kalibriert werden muss bzw. kein Werker in das Fahrzeug ein- oder aussteigen muss, wird die Prüfstandprozesszeit verringert. Folglich reduzieren sich die parallelen Fahrwerkgeometrie- und Fahrerassistenzsystemprüfstände auf einen Durchfahrprüfstand. Zusätzlich werden alle sicherheitsrelevanten Fahrzeugsysteme durch eine redundante Prüftechnik validiert. Das ist nicht nur eine Effizienzsteigerung sondern auch eine Absicherung für die Inbetriebnahme der Fahrzeugsysteme, was den Zielen dieser Arbeit entspricht.

Was eine Notfallprozessstrategie und Verlagerung weiterer aktueller und zukünftiger Inbetriebnahmeprozesse aus dem EOL in die Montagelinie anbetrifft, ist das aufgezeigte Gesamtkonzept sehr flexibel. Sollte durch Betriebsmittel bedingt das Radadaptionssystem in der Montagelinie einmal ausfallen, so kann es manuell betätigt und in Grundstellung gefahren werden. Dadurch muss die Produktionslinie nicht angehalten werden und es kann keine Produktionsablaufstörung entstehen. Die Fahrzeuge, die dabei innerhalb der Produktionslinie nicht kalibriert werden können, müssen dann auf dem Validierungs- und Nacharbeitsprüfstand manuell in Betrieb genommen werden. Neben dieser Flexibilität bieten auch Prozesse, die aktuell auf dem Rollenprüfstand des EOLs verortet sind, Potenziale, sie mit dem Radadaptionssystem in der Montagelinie durchzuführen. Das wird durch die Drehmomentübertragung zwischen den Radadaptionköpfen und Radnaben ermöglicht. Diese weiterführenden Potenziale werden zu einem späteren Zeitpunkt in dieser Arbeit noch erläutert.

Um das dargestellte Gesamtkonzept umsetzen zu können, muss das Radadaptionssystem angepasst bzw. optimiert und ein Targetsystem entwickelt werden. Daher wird nachfolgend die hardwareseitige Mess- und Kalibrierfähigkeit des Radadaptionssystems hergestellt und das System mittels Langzeitversuch erprobt. Anschließend wird in Kapitel 5 der Messalgorithmus für das Radadaptionssystem entwickelt und untersucht. Damit die Umfeldsensoren in Betrieb genommen werden können, wird in Kapitel 6 die Entwicklung und Einbindung eines Targetsystems dargestellt. Dabei wird auch die Mitnahmemöglichkeit der Fahrwerkgeometriedaten in nachfolgende Produktionstakte aufgezeigt. Nach erfolgreicher Umsetzung dieser fehlenden Teilkomponenten und -systeme können die Technologien zusammengeführt und wie im Gesamtkonzept dargestellt entsprechend der Skalierung realisiert werden.

In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird aufgrund der prototypischen Realisierung das Radadaptionssystem für den einachsigen Betrieb zusammen mit einem Targetsystem in einer getakteten Montagestation ausgelegt. So lässt sich die Komplexität beherrschen und das Gesamtsystem später schrittweise aufrüsten und erproben. Alle technologischen Skalierungsmöglichkeiten werden in Kapitel 4.5 noch dargestellt.

## 4.2 Weiterentwicklung der messtechnischen Struktur des bestehenden Radadaptionssystems

Um mit dem Radadaptionssystem in einem ersten Schritt die Fahrwerkgeometrien vermessen zu können, benötigt der mechanische Aufbau des Radadaptionssystems messtechnische Systeme. Dabei müssen drei primäre Messaufgaben an jeder Radadaptionseinheit und somit an jeder Fahrzeugradnabe erfüllt werden. Dabei handelt es sich um die Bestimmung der Adaptionskoordinaten, der Kotflügelkantenposition und der Radkoordinatensysteme. Zur Umsetzung dieser Messaufgaben, wurde jede Radadaptionseinheit mit einem Stereokamerasystem mit zugehörigen Belichtungseinheiten, einem Linientriangulationssensor und drei Punktriationssensoren ausgestattet. Die Abbildung 4.2 zeigt die Messtechnik, um die das prototypische Radadaptionssystem für die getaktete Hinterachsvermessung am Fahrzeug aufgerüstet wurde. Dabei sind beide Radadaptionseinheiten HL und HR mit der identischen Messtechnik ausgestattet.

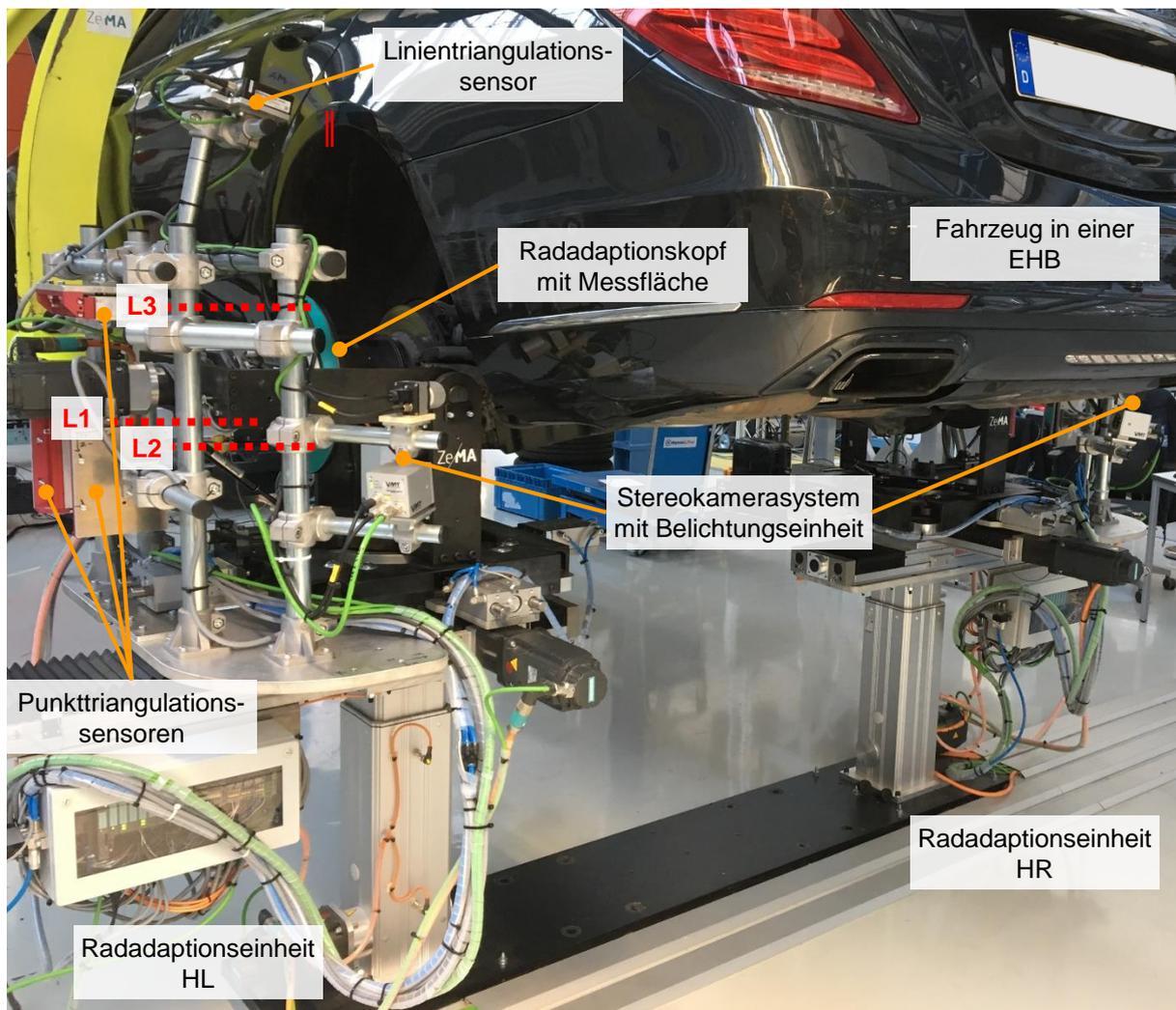


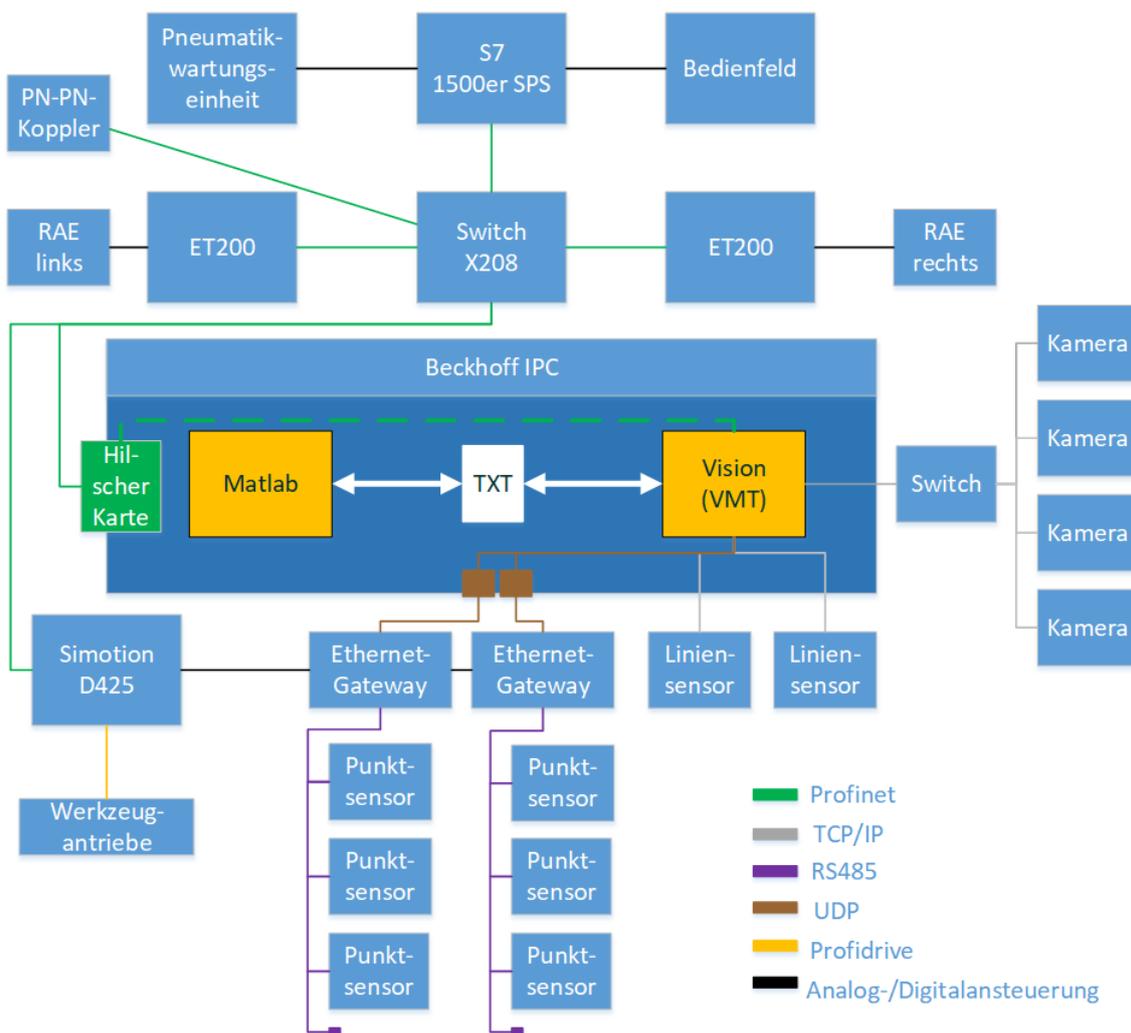
Abbildung 4.2: Benötigte Messtechnik für das prototypische Radadaptionssystem

Die dargestellte Messtechnik wurde so positioniert, dass sie mit dem Grundrahmen der Schwimmeinheit jeder Radadaptionseinheit fest verbunden ist. Daher bewegt sich der messtechnische Aufbau mit dem Verfahren der kinematischen Einheit. Das ist erforderlich, weil bei den geforderten Messgenauigkeiten die Triangulationssensoren einen minimalen und maximalen Messabstand zum Messobjekt einhalten müssen. Dadurch ist bei jeder Adaptionposition immer der korrekte Messabstand sichergestellt. Da die Sensorsysteme aus unterschiedlichen Positionen messen, bedeutet das eine erhöhte Komplexität im Vergleich zu einem ortsfesten Sensorsystem. Bedingt dadurch existiert gewissermaßen noch ein viertes Sensorsystem. Die Servomotoren der bewegten Achsen jeder Radadaptionseinheit sind mit Absolutinkrementalgebern ausgestattet, durch die die aktuelle Ausgangsposition bestimmt werden kann. Das wird für die spätere Erstellung eines mathematischen Modells noch relevant sein.

Für die erste Messaufgabe der Adaptionkoordinatenbestimmung mit dem verbauten Stereokamerasystem wurde eine Grundstellung der Einheiten bestimmt, aus der die Bildaufnahmen erfolgen. Durch ein Bildverarbeitungssystem werden die Positionen des Mittellochs und der fünf Radanschlussgewindelöcher im Kamerakoordinatensystem bestimmt. Daraufhin wird der Mittellochpunkt der Radnabe mit seiner X-, Y-, Z-Koordinate und der Drehwinkel  $R_Y$  für den Radadaptionkopf berechnet. Der Drehwinkel gibt dabei die Rotation zwischen der Zwölfuhrposition und dem ersten Radanschlussgewindeloch an. Dabei wird die Drehrichtung so gewählt, dass sie der kürzeren Strecke entspricht. Durch eine Kalibrierung des Kamerasystems zum Radadaptionkopf ist der transformative Zusammenhang bekannt. Dadurch können die berechneten Adaptionkoordinaten bezogen auf den Radadaptionkopf festgelegt werden. Anschließend wird überprüft, ob die Fahrzeugradnabe in Erreichbarkeit des Radadaptionssystems liegt. Ist das der Fall, werden die Adaptionkoordinaten an die Antriebssteuerung übergeben und der Adaptionkopf kann sich mit der Radnabe verbinden.

Diese Bildverarbeitungssoftware der Firma VMT läuft auf einem Industrie-PC (IPC), die extern über eine Profi-Net (PN) Busanbindung mit der Stations-SPS, deren Systemgruppen oder der Antriebssteuerung der Adaptionseinheiten kommunizieren kann. Auch Kommunikationen innerhalb des IPCs zu weiteren Softwaretools sind möglich. So sollen die Sensordaten, die mittels der Bildverarbeitungssoftware ausgelesen oder berechnet werden, an die Berechnungssoftware Matlab übergeben werden. Das wird nachfolgend notwendig, um die Fahrwerkgeometriedaten aus den Sensorinformationen bestimmen zu können. Dies wurde in einem ersten Schritt über den Austausch von Text-Dateien (txt) realisiert. Es funktioniert unter Einhaltung der benötigten Prozesszeit und protokolliert zugleich die Sensorinformationen in einer Logdatei. Auch die Adaptionkoordinaten werden durch die Bildverarbeitungssoftware gespeichert und durch Matlab später wieder eingelesen, da diese Daten unter anderem zur Fahrwerkgeometrie-Berechnung benötigt werden. Die komplette Vernetzungsstruktur des Gesamtsystems ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

Neben den bestimmten Adaptionenkoordinaten werden auch die Hochpunkte der Kotflügelkanten benötigt, um den Fahrzeughöhenstand berechnen zu können. Dafür ist ein Linientriangulationssensor verbaut, der wie das Stereokamerasystem über eine Ethernet TCP/IP Verbindung am IPC angeschlossen ist. Er übermittelt seine Daten ebenfalls an die Bildverarbeitungssoftware, die die Messinformationen an die Antriebssteuerung übermittelt. Die Messung erfolgt in der Adaptionposition, bei der die Kotflügelkante detektiert und der Hochpunkt ausgewertet wird. Da der Triangulationssensor zum Radadaptionkopf kalibriert ist, kann so der aktuelle Höhenstand bestimmt und über eine Hubfahrt der Radadaptionseinheit auf den benötigten Wert korrigiert werden.



**Abbildung 4.3: Entwickelte steuerungs- und messtechnische Systemstruktur für das Radadaptionssystem**

Um letztendlich die Fahrwerkgeometrien ermitteln zu können, wird das Radkoordinatensystem im eingefederten und spannungsfreien Zustand benötigt. Ausgangspunkt für den Radkoordinatensystem-Ursprung bildet der Adaptionpunkt, der bereits mit dem Stereokamerasystem ermittelt worden ist. Um jedoch die finale Ausrichtung des Radkoordinatensystems in der K0-Lage bestimmen zu können, muss die Radebene ermittelt werden. Diese entspricht der

XZ-Ebene des Radkoordinatensystems, wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Die drei Punktriangulationssensoren hinter jedem Radadaptionkopf sollen die Aufgabe übernehmen.

In Abbildung 4.2 sind die Punktriangulationssensoren und deren Laserstrahlen L1 – L3 dargestellt. Eine Messplatte, die mechanisch mit dem Radadaptionkopf verbunden ist, ist die Messfläche für die Sensoren. Diese Platte besitzt eine sehr geringe Rauheit und bietet beste Voraussetzungen, um sie mit einem optischen Messsystem zu erfassen. Da der Adaptionkopf beim Messprozess mit dem Radadaptionssystem fest mit der Radnabe verbunden ist, folgt die Messplatte dem Adaptionkopf und der Kopf der Radnabe. Dadurch kann die Ebene der Messfläche bei einer Aufnahme von drei Punkten mit den Triangulationssensoren bestimmt werden. Das setzt natürlich eine Kalibrierung der Sensoren mit der zugehörigen Messfläche zur Adaptionkopffläche voraus.

Die eingesetzten Punktriangulationssensoren besitzen eine Kommunikationsverbindung über einen RS485 Datenbus. Wie Abbildung 4.3 zeigt, sind immer drei dieser Sensoren jeder Radadaptionseinheit mit einem Ethernet Gateway verbunden. Jedes Gateway einer Radadaptionseinheit steuert seine zugehörigen Sensoren und empfängt ihre Messdaten. Die Gateways übertragen über eine Ethernet UDP Verbindung die Daten auf den IPC an die Bildverarbeitungssoftware, die alle Sensorinformationen verwaltet.

Wichtig ist, dass bei einem Messvorgang alle Sensoren gleichzeitig eine Messung durchführen. Nur dadurch kann sichergestellt werden, dass es sich zum Messzeitpunkt um die korrekten ermittelten Punkte innerhalb der XZ-Ebene handelt. Da die Sensoraufnahmen bei der Radumschlagkompensationsmessung erfolgen, rotiert der Adaptionkopf um seine eigene Achse. Um die Prozesszeit gering zu halten, hält der Adaptionkopf nicht für jede Messung an, sondern der Servoantrieb rotiert ihn um  $360^\circ$  mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Für die Umschlagmessung wurde festgelegt, dass alle  $5^\circ$  eine Gesamtmessung erfolgen soll. Dadurch ergeben sich über einen Drehwinkel von  $360^\circ$  72 Messaufnahmen für jeden Sensor des Systems. Da die Umschlagmessung innerhalb von drei Sekunden erfolgen soll, muss ca. alle 40 Millisekunden eine neue Messaufnahme erfolgen, so dass der Messstart nicht durch die Software des IPCs getriggert werden kann. Die Ansteuerung über das Ethernet Gateway brächte größere Latenzzeiten hervor, was zum Datenverlust von Einzelmessungen führen könnte. Daher besitzt das Gateway einen zusätzlichen Triggereingang, der mit einem digitalen Ausgang (DO) der Antriebssteuerung verbunden ist. Die Antriebssteuerung sendet bei den entsprechenden erreichten Drehwinkeln eine steigende Signalfanke aus, die das Gateway zum Messstart triggert. Durch die direkte Verdrahtung kann die Messstart-Ansteuerung von unter 40 Millisekunden problemlos realisiert werden.

Wird dem Ethernet Gateway der Sensoren eine Messaufnahme signalisiert, sendet es über den RS485 Datenbus ein Datenpaket an alle Sensoren, die folglich gleichzeitig ihre Messaufnahme durchführen. Nach erfolgter Messaufnahme senden alle Sensoren ihre Daten an das Gateway, das die Daten über die Ethernet UDP Verbindung der Bildverarbeitungssoftware auf

dem IPC übermittelt. Dabei ist jedes Gateway an einer eigenen Netzwerkkarte des IPCs angeschlossen, um durch das UDP Protokoll keine Messdaten zu verlieren. Die Software auf dem IPC speichert alle 72 Messungen in den Zwischenspeicher und schreibt bei Messende eine Textdatei mit den 72 Messdaten von allen drei Sensoren. Diese Datei wird für jede Radadaptionseinheit gebildet. Für das dargestellte messtechnische System einer Fahrzeugachse werden deshalb vier Textdateien für einen Messprozess gebildet. Je zwei für die Positions- / Adaptionenkoordinaten und je zwei für die Ebenenmessdaten, jeweils für die linke und rechte Seite der Hinterachse. Diese Textdateien können im Anschluss von der Berechnungssoftware Matlab ausgelesen werden, um die Fahrwerkgeometriewerte zu berechnen. Der dafür benötigte Berechnungsalgorithmus wird in Kapitel 5 erarbeitet.

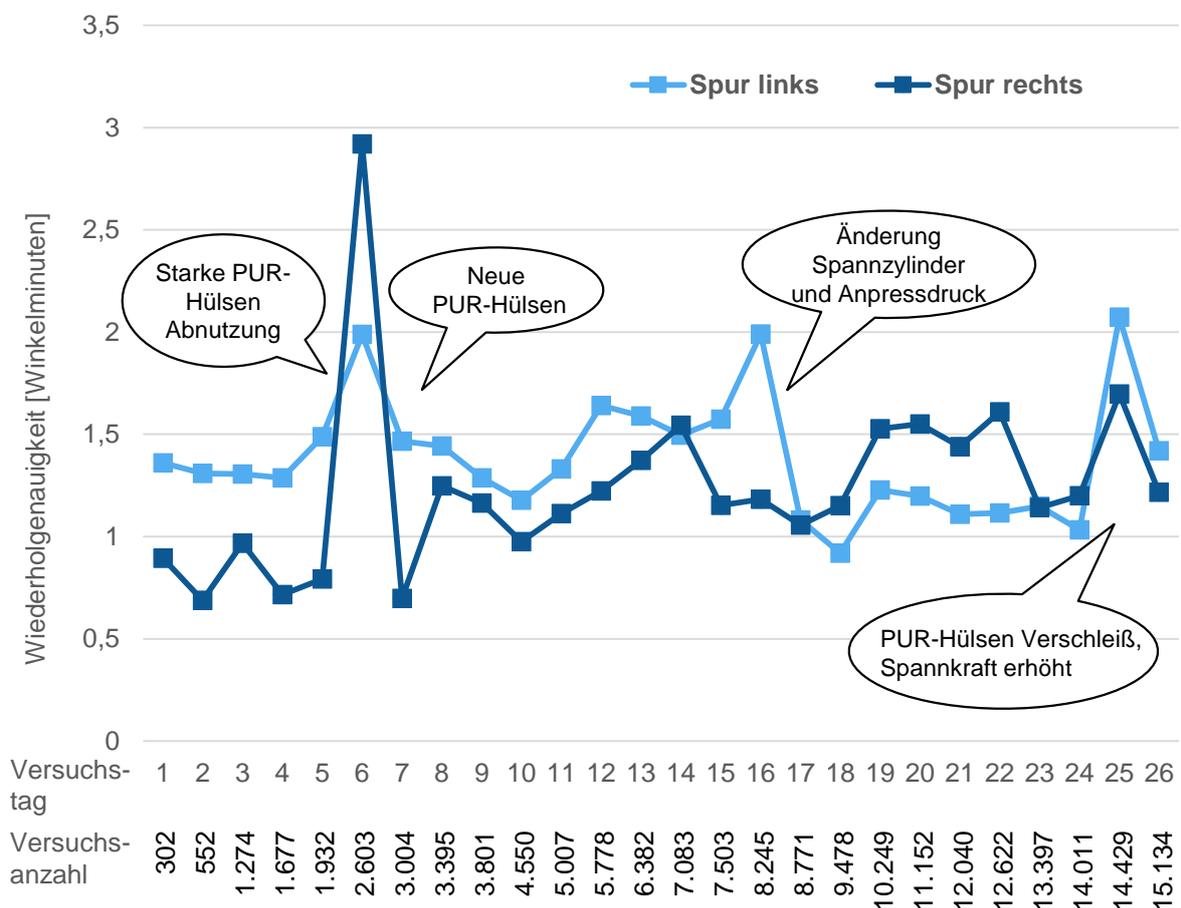
### **4.3 Modifikation des bestehenden Betriebsmittels für den Zielprozess**

Nachdem das Radadaptionssystem mit der für den Zielprozess notwendigen messtechnischen Hardware ausgestattet worden ist, wird in diesem Unterkapitel das System einem ersten Test unterzogen. Dabei wird ein Dauertest mit dem prototypischen System durchgeführt, um speziell den mechanischen Aufbau zu verifizieren und prozessrelevante Erkenntnisse zu gewinnen. Daraus sollen notwendige Modifikationen am Radadaptionssystem getroffen werden, bevor ein Modell zur messtechnischen Auswertung erstellt wird. So können eventuelle Systemfehler bei der späteren Validierung des Systems besser abgegrenzt werden.

#### **4.3.1 Dauerversuchsreihe mit dem prototypischen Radadaptionssystem**

Nachdem das Radadaptionssystem mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet wurde, ist es zwar noch nicht messfähig, der Radadaptionsprozess kann aber bereits durchgeführt werden. Um mechanische Fehler am System zu identifizieren, wird mit dem Radadaptionssystem und der bereits verbauten Messtechnik ein Dauerversuch durchgeführt. Dazu werden neben dem Dauerversuch Sensorinformationen mit der verbauten Messtechnik aufgenommen und parallel zum Versuch abgespeichert. Mit den aufgenommenen Distanzinformationen der Punktriangulationssensoren können wegen des fehlenden Messalgorithmus noch keine Fahrwerkgeometrien bestimmt werden. Die Daten können jedoch auf ihre Wiederholgenauigkeit zwischen den einzelnen Adaptionprozessen analysiert werden. Um das untersuchen zu können, wurde die Messdifferenz von jeweils zwei Triangulationssensoren je Radadaptionseinheit gebildet. Aufgrund der bekannten Positionsdistanzen zwischen den jeweiligen Sensoren kann mit einer einfachen Winkelfunktion je Radadaptionseinheit ein Winkel der Adaptionkopfstellung in der Sensorflucht berechnet werden. Diese Winkel geben zwar keine referenzbezogenen Messwerte an, sie können aber zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit der linken und rechten Radadaptionseinheit betrachtet werden.

Die Wiederholgenauigkeit oder auch Wiederholpräzision genannt beschreibt dabei ein Kriterium zur Beurteilung der Qualität des Messsystems und charakterisiert bei einer Menge von Wiederholbedingungen die Streubreite der erhaltenen Messwerte. [VDA10] Die Wiederholbedingungen sind beim Dauerversuch durch den aktuellen Aufbau des bestehenden Prototyps vorgegeben. Durch Aufnahme und Auswertung der Messdaten können daher qualitative Mängel über den Versuch hinweg identifiziert werden. Die Auswertung der Messdaten über den gesamten Dauerversuch ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Bei jedem Adaptionszyklus wird ein Winkelwert aus den Messwerten bestimmt und unter dem zugehörigen Versuchstag abgespeichert. Aus allen Spurwinkelmesswerten eines Versuchstags wurde anschließend ein minimaler und maximaler Wert für die linke und rechte Einheit ermittelt. Die Differenz der beiden Werte gibt die maximale Streubreite für den Versuchstag an. Der Wiederholgenauigkeitswert ist im Diagramm über den Versuchstagen und der Versuchsanzahl eingetragen.



**Abbildung 4.4: Auswertung der Streubreite des Dauerversuchs mit dem bestehenden Radadaptationssystem**

Da die Messwerte keinen Bezug haben, können die Daten nur miteinander betrachtet werden. Bei einer gleichbleibenden Qualität des Systems sollten die Messwerte untereinander konstant bleiben. Schwankungen je Versuchstag weisen auf eine schlechte Wiederholgenauigkeit hin und zeigen dadurch Qualitätsprobleme der jeweiligen Radadaptationseinheiten auf. Das kann

betriebsmittel- oder prozessbedingte Gründe haben und muss individuell identifiziert werden. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Messungen am Fahrzeug durchgeführt werden. Dadurch entstehen Schwankungen der Wiederholgenauigkeit, die größer sind als bei statischer Messung an einem Kalibrierkörper. Das hängt mit der Elastokinematik des Fahrwerks zusammen. Dieses Verhalten wird bei der späteren durchgeführten Messsystemanalyse (MSA) noch genauer untersucht.

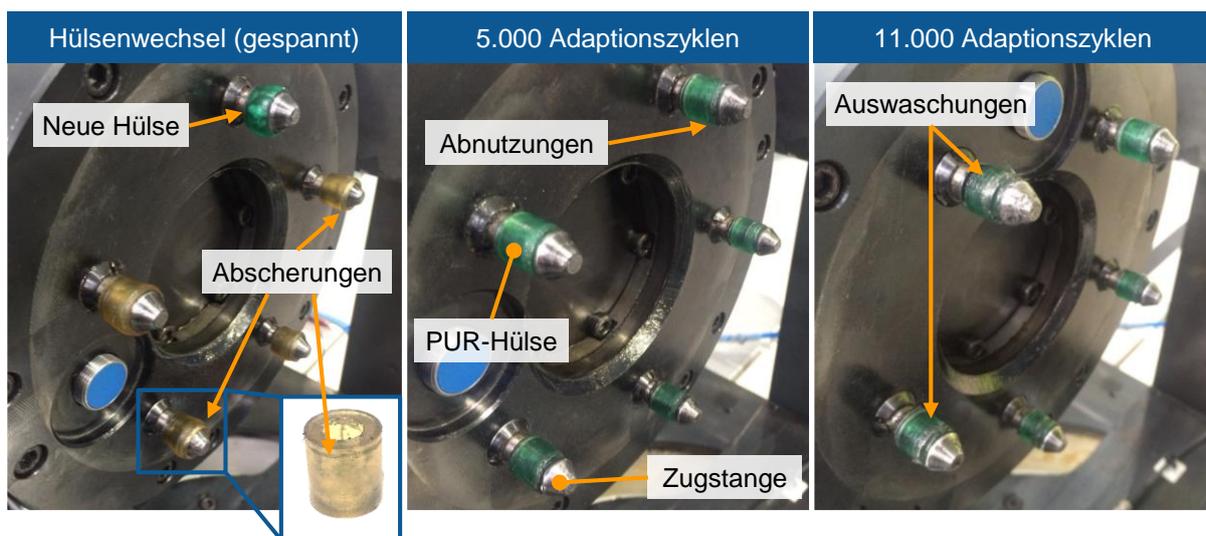
In Abbildung 4.4 sind fortlaufend die Versuchstage und die Summen der Versuchsanzahl dargestellt. Bei jeder Einzelauswertung für einen Tag wurden Rückschlüsse auf den Prozess und das Betriebsmittel gezogen. Bei starker Streuung der Wiederholgenauigkeit über einen Versuchstag wurden eventuell notwendige Modifikationen vor dem nächsten Versuchstag getroffen. Die wichtigsten Erkenntnisse und Änderungen sind in der Abbildung eingetragen. Dabei ist zu erkennen, dass die Spannhülsenabnutzung einen Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit hat. Auch das Anfahrverhalten des Radadaptionkopfs an die Radnabe und das Verhalten der Schwimmereinheiten des Radadaptionssystems stellt einen Systemeinfluss dar. Die folgenden zwei Unterkapitel zeigen die Modifikationen an den besagten Systemkomponenten und Prozesseinstellungen, die getroffen worden sind, um die Wiederholgenauigkeit auf einem niedrigen und konstanten Wert zu halten.

#### 4.3.2 Modifizierung und Anpassung des Dehnungsgreifer-Systems

Das Dehnungsgreifersystem des Adaptionkopfs ist eine wichtige Einrichtung, um eine schnelle und prozesssichere Verbindung zwischen der jeweiligen Radadaptionseinheit und der Fahrzeugradnabe herzustellen. Da der Dauerversuch einen Einfluss des Greifersystems auf den Prozess gezeigt hat, ist es notwendig dessen korrekte Funktion permanent sicherzustellen. Neben der Untersuchung der PUR-Hülsen-Abnutzung musste die Umrüstbarkeit des Adaptionkopfs auf einen anderen Radnabenlochkreis und ein schnelles Auswechseln der abgenutzten Hülsen innerhalb des Produktionsprozesses gegeben sein. Um das Greifersystem optimal auszulegen, wurden auch unterschiedliche PUR-Hülsen mit verschiedenen Shore-A-Härten über den Dauerversuch hinweg untersucht.

In Abbildung 4.5 wird der Radadaptionkopf mit den Dehnungsgreiferelementen einer Adaptionseinheit nach unterschiedlichen Adaptionszyklen gezeigt. Zu Beginn des Dauerversuchs wurden die Adaptionsprozesse mit PUR-Hülsen mit einer Shore-A-Härte von 95 durchgeführt. Das sind die gelben PUR-Hülsen, die in der Abbildung links im gespannten Zustand dargestellt sind. Wie in der Dauerversuchsauswertung in Abbildung 4.4 zu erkennen war, ist die Streuung der Wiederholgenauigkeit nach ca. 2.000 Adaptionszyklen stark gestiegen. Daraufhin wurde ein Hülsenwechsel durchgeführt. Die ausgewechselten Hülsen wiesen Abnutzungen im vorderen Bereich auf, wobei Abscherungen des Hülsenwerkstoffes festgestellt wurden, was in Abbildung 4.5 zu erkennen ist. Die Abscherungen sind dabei identisch zu den Gewinden der Radanschlusslöcher, in denen die PUR-Hülsen aufgespannt werden. Da die Abscherungen

des Materials sich je Hülse unterschiedlich bemerkbar machen, entsteht beim Adaptionprozess eine relative Bewegung des Adaptionkopfs zur Anlagefläche der Radnabe, die den Messprozess beeinflusst. Für die Ursachen der Abscherung wurden zwei Faktoren identifiziert. Zum einen ist eine PUR-Hülse mit einer Shore-A-Härte von 95 ungeeignet. Sie ist nicht elastisch genug und bekommt durch häufige Aufdehnungen in den scharfen Gewindegängen Materialabscherungen. Zum anderen wurde erkannt, dass die Hülse nicht länger sein darf als der Gewindegang selbst. Dadurch entsteht ein nicht homogenes Aufdehnen hinter dem Gewindegang. Das trägt zwar zu einem hohen Halt des Adaptionkopfs an der Radnabe bei, wodurch aber ein massiver Verschleiß der PUR-Hülsen entsteht.



**Abbildung 4.5: PUR-Hülsen Abnutzung über den Dauerversuch**

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurde nach dem Hülsenwechsel der Versuch mit neuen PUR-Hülsen mit einer Shore-A-Härte von 90 und einer Gewindegang entsprechenden Länge fortgeführt. Diese neuen Hülsen sind in Abbildung 4.5 links grün dargestellt. Dadurch ist die Streuung der Wiederholgenauigkeit wieder gesunken. Nach weiteren 5.000 Adaptionenzyklen sind auch erste Abnutzungserscheinungen in Form von Abrieb an der Hülsoberfläche der ausgewechselten Hülsen sichtbar. Diese beeinflussen jedoch den Messprozess noch nicht, wie die Auswertung zeigt.

Nach ca. 11.000 Adaptionenzyklen ab dem Hülsenwechsel machen sich wieder Streuungsschwankungen in der Wiederholgenauigkeit bemerkbar. Wie in Abbildung 4.5 auf der rechten Seite zu erkennen ist, entstehen speziell im vorderen Bereich Auswaschungen der PUR-Hülsen. Sie beeinflussen den Messprozess jedoch nicht so stark wie eine Abscherung des Materials. Durch Erhöhung der Spannkraft auf die Hülsen über die Zugstangen kann der Materialverlust kompensiert werden. Das führt aber zu noch stärkeren Verschleißerscheinungen. Deshalb sollten bei den gewählten Einstellungen für den Dauerversuch die PUR-Hülsen im Produktionsbetrieb nach 10.000 Zyklen ausgetauscht werden. Zusätzlich sollten PUR-Hülsen mit einer Shore-A-Härte von 90 und einer Gewindegang entsprechenden Länge gewählt werden. Nur dadurch kann eine ausreichende Prozessstabilität sichergestellt werden.

Um die Versuchserkenntnisse für den Produktionsbetrieb messbar machen zu können, wurde ein automatischer Anlern- und Überwachungsprozess für die PUR-Hülsen eingeführt. Dadurch wird ein schnelles Wechseln der Spannhülsen ohne große Einstellarbeiten ermöglicht und zudem kann die Abnutzung der Hülse durch den Materialabrieb ermittelt werden. Dazu müssen die Größen der Spannkraft und des Spannwegs, die für die Hülsen erforderlich sind, betrachtet werden. In einem ersten Schritt muss dazu die theoretisch erforderliche Zugkraft  $F_{\text{Zug, erf.}}$ , die der Spannkraft der Hülsen entspricht, für die Zugstangen ermittelt werden. Diese wird anhand der folgenden aufgestellten Formel mit den entsprechenden Abmessungen und Materialkennwerten berechnet. Der Elastizitätsmodul für die PUR-Hülse mit einer Shore-A-Härte von 90 wird auf  $25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  bestimmt [KUN06].

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow F_{\text{Zug, erf.}} = \varepsilon \cdot E \cdot A = \frac{\Delta l_{\text{Hülse}}}{l_{\text{Hülse}}} \cdot E \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{Hülse, außen}}^2 - d_{\text{Hülse, innen}}^2) \right)$$

$$= \frac{5 \text{ mm}}{14 \text{ mm}} \cdot 25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot (13^2 \text{ mm}^2 - 6^2 \text{ mm}^2) \right) = 933 \text{ N}$$

- A : Druckfläche der gespannten PUR-Hülse
- $d_{\text{Hülse}}$  : Durchmesser der PUR-Hülse außen bzw. innen
- E : Elastizitätsmodul der PUR-Hülse
- $F_{\text{Zug, erf.}}$  : Erforderliche Zugkraft für eine Zugstange
- l : Länge der PUR-Hülse bzw. Änderung
- $\varepsilon$  : Dehnung der gespannten PUR-Hülse
- $\sigma$  : Spannung

Durch die Berechnung ist demnach bekannt, dass ca. 933 Newton je Spannelement aufgebracht werden müssen, um die benötigte Verformung der PUR-Hülse für den Messprozess zu erreichen. Da die Zugstangen bei einem Hülsenwechsel so eingestellt werden, dass Spiel zwischen den Hülsen und Zugstangen vorliegt, ist der Spannweg nicht proportional zur Spannkraft. Dieses Spiel ist wichtig, damit sich die Hülse auch unter sich ändernden Prozesseinflüssen wieder vollständig entspannen kann, um ein sauberes Abdocken von der Radnabe gewährleisten zu können. Aus diesem Grund wird nach dem Hülsenwechsel eine Anlernroutine auf der Antriebssteuerung aufgerufen. Dabei werden die PUR-Hülsen aus der Grundstellung frei gespannt bis die 933 Newton je Zugstange erreicht sind. Parallel dazu wird der dabei zurückgelegte Spannweg gemessen und abgespeichert. Im späteren Produktionsbetrieb werden beim Adaptionprozess nur noch die Hülsen über den Spannweg verfahren. Das ist notwendig, da die benötigte Kraft im Gewindegang nicht komplett der des freien Spannens entspricht. Durch dieses Verfahren wird der Hülsenwechsel im laufenden Produktionsbetrieb effizient durchgeführt, da die Einstellung der Spannwege automatisch erfolgt. Die Ermittlung des Spannwegs erfolgt dabei durch einen Ultraschallsensor im Adaptionkopf. Die Spann- bzw.

Zugkraft der Zugstangen wird über das Drehmoment des Antriebsmotors des Adaptionkopfs ermittelt. Der Antriebsmotor treibt dabei über eine Antriebswelle eine Hubplatte an, an der die Zugstangen befestigt sind. Das Drehmoment kann zusammen mit den Kennwerten des Trapezgewindes der Antriebswelle über folgende Formel ermittelt werden.

$$M_d = \frac{F_{\text{Zug}} \cdot z_{\text{Gewinde}}}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \leftrightarrow F_{\text{Zug}} = \frac{M_d \cdot 2000 \cdot \pi \cdot \eta}{z_{\text{Gewinde}}} \quad (4)$$

- $F_{\text{Zug}}$  : Axiale Zugkraft der Hubplatte in N  
 $M_d$  : Antriebsdrehmoment der Welle in Nm  
 $z_{\text{Gewinde}}$  : Gewindesteigung in mm  
 $\eta$  : Wirkungsgrad (Drehbewegung → Längsbewegung)

Im laufenden Produktionsprozess kann das Verfahren bei sich nähernder Verschleißgrenze der Hülsen umgekehrt genutzt werden, um die Funktionsfähigkeit bzw. die Materialauswaschungen zu bestimmen. So kann freies Spannen unter Vorgabe des Spannwegs aus dem Anlernprozess erfolgen. Dabei kann die Zugkraft zum Endpunkt hin mit vorheriger Formel ermittelt werden. Diese Zugkraft sollte der theoretischen errechneten erforderlichen Zugkraft entsprechen. Bei zutreffen sind die Hülsen noch nutzbar. Wird jedoch weniger Zugkraft benötigt, ist das ein Indiz für eine Materialabnahme der PUR-Hülse und deutet auf Verschleiß hin. Eine Minderung der Zugkraft um ca. 175 Newton zeigt beispielsweise eine Materialabnahme von einem Millimeter Außendurchmesser an der Spannhülse. Durch dieses Anlern- und Überprüfungsverfahren lassen sich die Hülsenabnutzung und schwankende Prozessstreuungen minimieren, was zu einem stabilen Messprozess beiträgt.

Um dieses Verfahren einführen zu können, musste eine zusätzliche Messgröße am Adaptionkopf erfasst werden. Der Adaptionkopf wurde in der Vorarbeit so konstruiert, dass sich eine Antriebswelle unabhängig von einer Hohlwelle bewegen kann. Zusätzlich können durch Bremsen der unterschiedlichen Wellen verschiedenartige Operationen durchgeführt werden. Dadurch werden mit einem Antriebsmotor am Adaptionkopf die Kopffrotation, ein Freilaufverhalten und das Spannen der Dehnungsgreiferelemente erreicht. Die Drehung der Antriebswelle wird über einen Absolutinkrementalgeber innerhalb des Antriebsmotors erfasst. Um eine Prozessabsicherung zu erzielen, musste ein weiterer Geber an der Hohlwelle des Kopfs angebracht und implementiert werden. Dadurch kann die Relativbewegung zwischen den Wellen überwacht werden, um eine korrekte Funktionszuordnung zu realisieren.

Eine letzte abschließende Modifikation am Radadaptionkopf ist das variable Auswechseln der Adaptionplatten. Innerhalb einer Montagelinie wird meistens eine Fahrzeugbaureihe produziert, die alle den gleichen Radanschlussflansch mit identischem Radmittelloch haben. Beim Wechsel der Baureihe, kann der Radadaptionkopf flexibel umgebaut werden. Das kann durch den mechanischen Austausch der vorderen Adaptionplatte einfach realisiert werden.

Dadurch können alle möglichen Lochkreise und Mittellochgrößen abgedeckt und alle bestehenden Komponenten übernommen werden. Durch die beschriebenen und umgesetzten Modifikationen am Adaptionkopf und dessen Dehnungsgreifsystem entsteht maximale Flexibilität und Prozessstabilität für den späteren Produktionseinsatz.

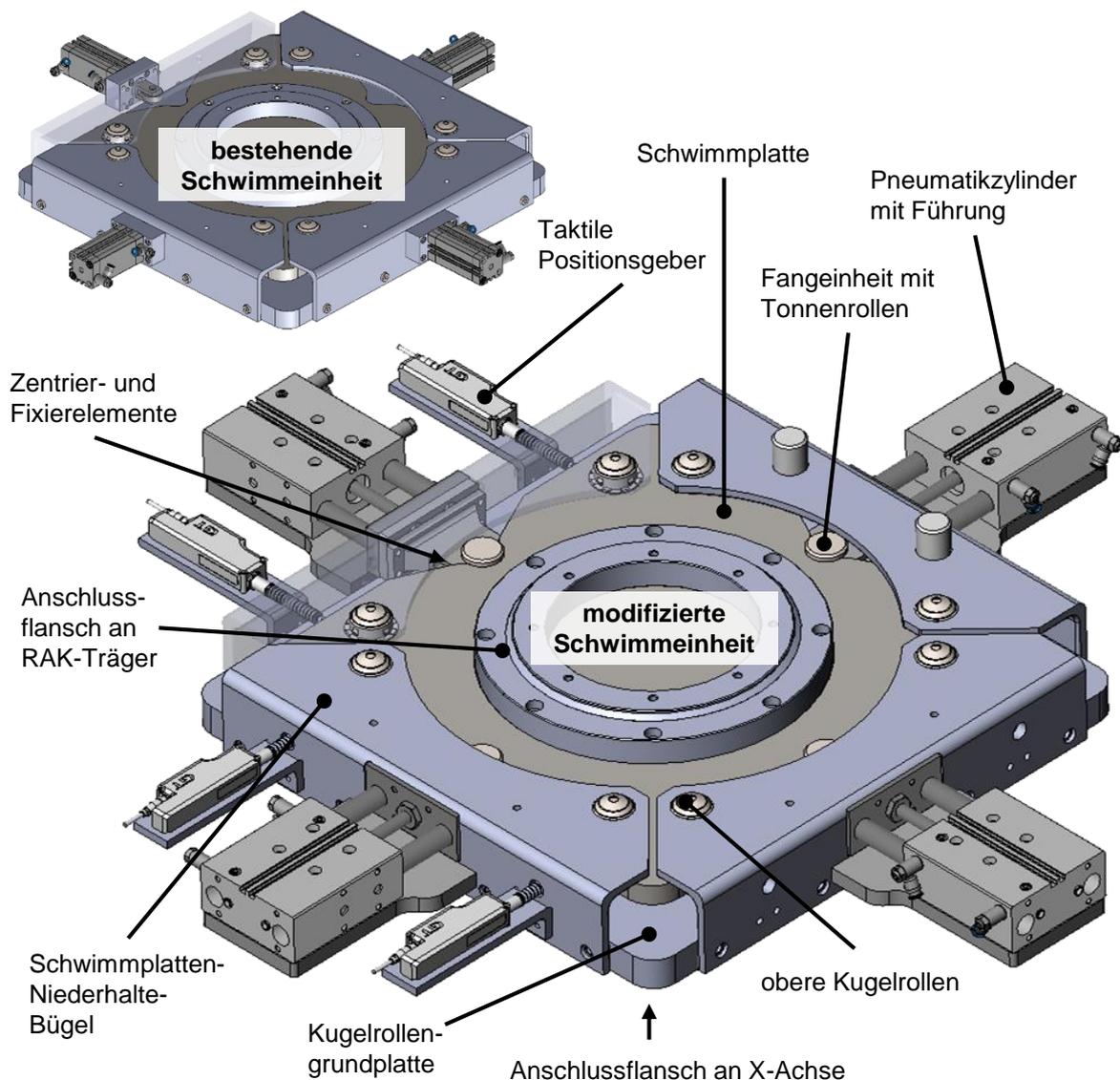
### 4.3.3 Modifikation der Schwimmeinheit und des Adaptionprozesses

Neben der Modifikation des Dehnungsgreifsystems sind beim Dauerversuch auch notwendige Verbesserungen an den Schwimmeinheiten und der damit verbundenen Prozesssteuerung aufgefallen. Wie in der vorherigen Abbildung 4.4 zu erkennen war, sind kleinere Streuungen bei der Wiederholgenauigkeit entstanden, die auf die Schwimmeinheiten des Radadaptionssystems zurückgeführt werden konnten. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, mussten folgende drei wesentliche Parameter geändert werden: Die Spanntechnik der Schwimmeinheiten, das Anfahrverhalten des Adaptionssystems an die Fahrzeugradnabe und ein eingeführtes zusätzliches Messsystem, um bei geöffneter Schwimmplatte eine Positionsbestimmung durchführen zu können.

Abbildung 4.6 zeigt die bestehende und die modifizierte Schwimmeinheit des Radadaptionssystems. Dabei sind die unterschiedlichen Elemente an den Niederhaltebügeln zu erkennen. Bei der ursprünglichen Schwimmeinheit wurde die Schwimmplatte zwischen den unteren und oberen Kugelrollen mit vier normalen Pneumatikzylindern gespannt. Die Schwimmplatte wurde dabei von allen vier Seiten mit einer Spannkraft durch die Kolbenstangen mit daran verbauten Tonnenrollen beaufschlagt. Dadurch wurde ein Zentrieren und Verspannen der Platte in einer Grundposition erreicht. Da beim Anfahren des Radadaptionkopfs an die Radnabe ein Anpressdruck ausgeübt werden muss, wirkt er sich in Form von Schubkräften auf die verspannte Schwimmplatte aus. Diese wiederum überträgt die Schub- und die daraus entstehenden Querkräfte auf die Kolbenstangen der Zylinder. Die Kolbenstangen der Pneumatikzylinder sind dafür jedoch nicht ausgelegt, was zu starken Verformungen der Kolbenstangen geführt hat. Dadurch sind Undichtigkeiten an den Zylindern entstanden, die zu einer Verringerung der Spannkraft geführt und somit den Prozess sehr negativ beeinflusst haben.

Aus diesem Grund ist eine neue Auslegung erfolgt, um neue Pneumatikzylinder mit Führungen aufnehmen zu können. Dazu wurden die Schwimmplatten-Niederhaltebügel bearbeitet und ein Halter für die neuen Zylinder entworfen. Weiterhin wurde ein Zentrier- und Fixierelement entwickelt, das an der vorderen Kolbenstangenplatte des Zylinders befestigt ist. Diese Elemente, an jedem der vier Zylinder, sorgen dafür, dass die Schwimmplatte aus jeder aufkommenden Position in eine stabile Grundstellung bewegt werden kann. Das geschieht durch die Fangeinheit an jeder Kolbenstange der Zylinder. An ihnen ist jeweils eine Tonnenrolle befestigt, die in die Konturfräsungen der Schwimmplatte eingreifen kann und nach voller Zylinderkraft eine Endposition innerhalb der Fräsung erreicht. Die entstehenden Schubkräfte werden dabei von

den zusätzlichen Führungen der neuen Zylinder aufgenommen. Dadurch ist immer ein sicheres Verspannen der Schwimmplatte in einer definierten Position gegeben, was zur Prozessstabilität beiträgt.



**Abbildung 4.6: Modifizierung der Schwimmereinheit des Radadaptionssystems**

Da die Schwimmplatte beim Anfahren des Radadaptionssystems an die Radnabe eine feste Position hat, müssen die korrekten Prozessparameter für das System eingestellt werden. Dazu gehört der korrekte Anpressdruck des Radadaptionssystems an die Radnabe bei geschlossener Schwimmereinheit. Dabei wurde festgestellt, dass ein zu hoher Anpressdruck eine große Streuung der Wiederholgenauigkeit durch die Verspannung der Fahrzeugachse hervorruft. Auch ein zu geringer Anpressdruck trägt zu schlechten Werten bei, da die Spannelemente des Kopfes sich im Gewindegang abdrücken können. Dadurch liegt der Adaptionsskopf nicht korrekt an der Radnabe an, was wiederum den Messprozess negativ beeinflusst. Daher wurde nach der Spannzylinder-Modifikation der Schwimmereinheit der korrekte Anpressdruck des Systems ermittelt und eingestellt.

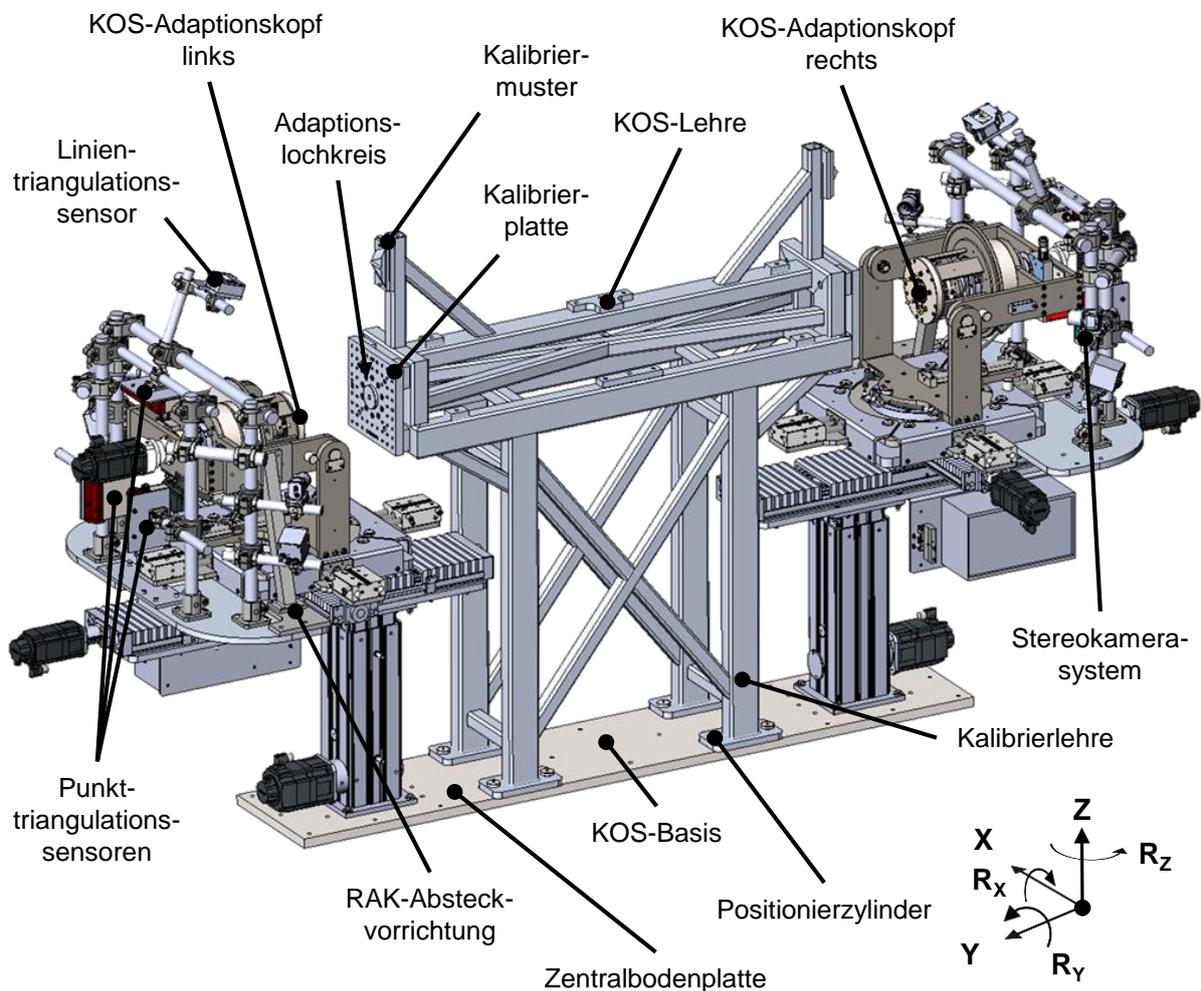
Abschließend wurde ein taktiles Messsystem für die Ermittlung der Schwimmplattenposition an der Schwimmeinheit angebracht und implementiert. Das war notwendig, da zwar beim Spannen der Schwimmplatte immer eine definierte Position erreicht wird, jedoch beim Öffnen der Schwimmplatte die Position undefiniert ist. Die Position der Schwimmplatte in geöffneter Stellung wird nachfolgend noch relevant, da sie benötigt wird, um mittels des späteren Messalgorithmus die korrekten Fahrwerkgeometrien berechnen zu können. Das Messsystem besteht je Schwimmeinheit aus vier Messtastern, wie Abbildung 4.6 zeigt. Je Schwimmeinheit werden jeweils zwei Messtaster für je zwei Seiten benötigt. Dadurch kann aus dem Mittelwert von je zwei Messtastern einer Seite die Position in der jeweilige X- und Y-Richtung der Schwimmplatte bestimmt werden. Um diese Messvorrichtung zu kalibrieren, wird eine definierte Position festgelegt, auf die sich sämtliche Messergebnisse beziehen. Die Vorgehensweise wird im nächsten Kapitel beschrieben. In dieser Stellung werden die Messtaster auf die Nullstellung kalibriert. Folglich können bei geöffneter Schwimmeinheit alle relativen Abweichungen aus der festgelegten Position ermittelt werden. Damit sind alle Modifikationen des bestehenden Betriebsmittels umgesetzt, die während des Dauerversuchs aufgefallen sind und den Prozess negativ beeinflusst haben.

#### 4.4 Entwicklung einer Kalibriervorrichtung

Nach Abschluss des Dauerversuchs und der notwendigen Modifikationen an dem bestehenden Radadaptionssystem muss die Möglichkeit einer Kalibrierung geschaffen werden. Das ist erforderlich, um ein einheitliches Bezugssystem für die gesamte verbaute Messtechnik des Radadaptionssystems zu schaffen. Dabei müssen die drei primären Messsysteme jeder Adaptionseinheit kalibriert werden. Zu diesen Systemen gehören das Stereokamerasystem, die Linietriangulationssensoren und Punktriangulationssensoren, die bereits in Kapitel 4.2 beschrieben wurden. Da keine zusätzlichen Messsysteme eingesetzt werden sollen, kommt nur ein Kalibrierkörper, der in Form einer Kalibrierlehre in das System eingelegt wird, in Frage. Auch wegen der geforderten Messgenauigkeiten ist das nur mit einer präzise vermessenen Lehre möglich.

Abbildung 4.7 zeigt die konstruierte Kalibrierlehre für das prototypische Radadaptionssystem. Die Kalibrierlehre besteht aus einem soliden Aluminium-Schweißrahmen mit daran verbauten Passungen. Die Passungen können Kalibrierplatten mit benötigten Planflächen oder Kalibriermustern aufnehmen. Dabei ist die Lehre derart solide konstruiert, dass sie unter den vorliegenden Umwelteinflüssen innerhalb der Produktion keine oder nur minimalste Formänderungen erfährt. Die Kalibrierlehre wurde so ausgelegt, dass mit ihr alle drei Messsysteme kalibriert werden können. Das erleichtert den Kalibrierprozess, da nur eine Lehre für das gesamte System benötigt wird. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, wurde eine Lehre für das bestehende und modifizierte Radadaptionssystem entworfen. Dieses System ist für die einachsige Mes-

sung am Fahrzeug ausgelegt. Das hier beschriebene Kalibrierprinzip ist jedoch auch für mehrachsige Messsysteme übertragbar, auch wenn die Kalibrierlehre dann einen größeren Gesamtaufbau hat.



**Abbildung 4.7: Kalibriermöglichkeit für die Messtechnik des Radadaptionssystems**

Die Kalibrierplatte der Lehre ist in der Lage, das Stereokamerasystem und die Punktriangulationssensoren des Adaptionkopfs zu kalibrieren. Dazu sind zum einen Muster auf der Platte in Form von eingefärbten Bohrlöchern aufgebracht. Diese besitzen feste Bezüge zueinander, worüber die beiden Kameras des Stereokamerasystems kalibriert und in Bezug gebracht werden können. Auch vier unterschiedliche Langlochfräsungen je Plattenseite sind aufgebracht, über die das Kamerasystem eine Quadranten-Zuordnung durchführen kann. Ein weiteres Kalibriermuster in Form einer Abrisskante ist auf gleicher Höhe der Linientriangulationssensoren angebracht. Es dient je Seite zur Kalibrierung dieser Sensoren. Innerhalb der Lehre wird dabei ein bekannter Höhenbezug zwischen dem Mittelpunkt der Kalibrierplatte und der Abrisskante angegeben. Liegt bei einer Kalibrierung der Adaptionkopf an einer Platte der Lehre an, dann kann der Sensor eine Aufnahme der Abrisskante durchführen und so sein Offset kalibriert werden.

Neben den genannten Bezügen besitzt die Kalibrierplatte einen zentrischen Adaptionsschlochkreis, gleich dem der Fahrzeugradnabe. Auch die Mittellochauflage ist vorhanden. Der existente Lochkreis hat jedoch die Eigenart, dass er zweimal vorhanden und zueinander versetzt ist. So gibt es beispielsweise an der Fahrzeugradnabe fünf Löcher über  $360^\circ$  verteilt. Das entspricht einem Loch alle  $72^\circ$ . An der Kalibrierplatte der Lehre sind zehn Löcher über  $360^\circ$  vorhanden. Daher entspricht alle  $36^\circ$  einem Loch. Für einen Kalibriervorgang der Punktriangulationssensoren dockt der Adaptionsskopf am Lochkreis der Kalibrierplatte an. Durch den doppelten Lochkreis ist das alle  $36^\circ$  in zehn unterschiedlichen Stellungen möglich. Das ist erforderlich, da an der Kalibrierlehre keine Umschlagmessung wie an der Radnabe des Fahrzeugs durchgeführt werden kann. Für eine Kalibrierung dockt der Adaptionsskopf in allen zehn Stellungen an und die Punktriangulationssensoren nehmen dabei jeweils mit allen drei Sensoren einen Distanzwert auf. Nachdem alle Aufnahmen erfolgt sind, wird daraus ein Mittelwert berechnet und eine räumliche Ebene gebildet, die zur Kalibrierung genutzt wird. Das ist möglich, weil die Lehre vorher genauestens vermessen wurde und so die Ebene der Adaptionssplatte im Lehrenkoordinatensystem bekannt ist. Das Koordinatensystem der Lehre ist wiederum in der Basis des Gesamtsystems bekannt, wodurch der Zusammenhang gebildet wird. Das mathematische Vorgehen bei der Kalibrierung wird im folgenden Kapitel 5.3.2 noch beschrieben.

Damit mit der Kalibrierlehre auch flexibel auf eine Änderung des Adaptionsskopfs reagiert werden kann, wurden die Kalibrierplatten der Lehre austauschbar gestaltet. Wird so beispielsweise aufgrund einer Lochkreisänderung die Adaptionssplatte des Radadaptionsskopfs ausgetauscht, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, können parallel dazu auch die Kalibrierplatten der Lehre gewechselt werden. Dadurch können beliebige Platten mit unterschiedlichen Adaptionsschlochkreisen entsprechend dem Adaptionsskopf der Radadaptionseinheit aufgenommen werden. Damit ist sichergestellt, dass auch nach Umstellung des Systems auf einen anderen Radnabentyp eine Kalibrierung des Gesamtsystems erfolgen kann. Nach jedem Wechsel der Kalibrierplatten ist jedoch der Bezug im Lehrenkoordinatensystem nicht mehr bekannt. Daher muss die Lehre nach einer Änderung immer neu eingemessen werden.

Um eine Einmessung der Kalibrierlehre vorzunehmen, gibt es jeweils drei vorgegebene Messpunkte am Lehrengrundrahmen und den beiden Kalibrierplatten. Sie sind in der Abbildung 4.7 dargestellt. Damit ein Datensatz für den aktuellen statischen Aufbau der Lehre erzeugt werden kann, müssen diese Punkte präzise angemessen werden. Das kann beispielsweise mit einer Koordinatenmessmaschine oder einem Lasertracker erfolgen. Aus den drei Punkten des Lehrengrundrahmens werden mit einem Ursprungspunkt und zwei weiteren Richtungspunkten die zwei Richtungsvektoren für die X- / Y-Achsen bestimmt. Folglich kann damit das Lehrenkoordinatensystem bestimmt werden, da es ein orthogonales System ist, wonach sich die Z-Achse durch Bildung des Kreuzprodukts der beiden Richtungsvektoren ergibt. Innerhalb dieses Koordinatensystems sind jeweils die drei Punkte der Kalibrierplatten bekannt, woraus die Ebenen

für die linke und rechte Seite der Lehre bestimmt werden können. Damit sind alle geometrischen Lehreninformationen vorhanden.

Um eine Kalibrierung des Radadaptionssystems durchführen zu können, muss die Lehre in das System eingelegt werden, wie in Abbildung 4.7 dargestellt. Da es sich in dieser Arbeit um die Skalierung eines einachsigen Messsystems handelt, gibt es bei der Lehreneinmessung im System eine Besonderheit zu beachten. Nach Einlegen der Kalibrierlehre in das System muss das Lehrenkoordinatensystem in der Basis des Radadaptionssystems bekannt sein. Nur dann kann später eine Kalibrierung erfolgen. Da die Lehre manuell in das System eingelegt und entfernt wird, kann es dabei je Vorgang zu unterschiedlichen Stellungen des Lehrenkoordinatensystems zum Basiskoordinatensystem kommen. Eine statische Einmessung ohne eine wiederholgenaue Positionierung der Lehre ist daher nicht möglich.

Anders sieht es jedoch beim System für eine zweiachsige Vermessung aus. Hierbei kann die Kalibrierlehre ohne Bezug eingelegt werden und nach dem Andocken der vier Adaptionköpfe werden durch das Radadaptionssystem vier Mittelpunkte der Kalibrierplatten erfasst. Dadurch kann die Mittelsymmetrie der Lehre bestimmt werden, die der X-Achse der Lehre entspricht. Weiterhin kann eine Ebene in der X- / Y-Richtung aufgespannt werden. Dadurch lässt sich das Lehrenkoordinatensystem innerhalb des Basiskoordinatensystems bestimmen. Da bei dem hier gezeigten System keine zweiachsige Lehre vermessen wird, bleibt nur die Möglichkeit, die Lehre für eine Kalibrierung immer wiederholgenau zu positionieren.

Um die Absteckung der Kalibrierlehre zu ermöglichen, wurde eine Bodenplatte entwickelt an der die Lehre mit Positionszylindern befestigt werden kann. Auf der Bodenplatte sind sämtliche Anlagenkomponenten mit aufgebaut, wie die Abbildung 4.7 zeigt. Die Positionszylinder werden nach der Vorpositionierung der Lehre durch den Lehrenfuß in die Bodenplatten gesteckt. Dabei sind in den Lehrenfüßen Passhülsen verbaut. In der Bodenplatte ist ein Element verbaut, in dem sich Kugeln des Positionszylinders bei Verspannung gleichmäßig entfalten. Durch diese Mechanismen soll eine hochgenaue Positionierung der Lehre auf der Bodenplatte erreicht werden. Wenn die Positioniergenauigkeit der Kalibrierlehre sichergestellt ist, kann eine statische Einmessung der Kalibrierlehre zur Bodenplatte erfolgen. Dazu werden die definierten Messpunkte an Kalibrierlehre und Bodenplatte mittels Lasertracker angemessen, die das Lehren- und Basiskoordinatensystem repräsentieren. Anschließend kann eine statische Transformation angelegt werden, die wie die geometrischen Lehreninformationen auf dem System hinterlegt werden.

Um die hohe Positioniergenauigkeit der Lehre auf der Bodenplatte sicherstellen zu können, wurde dazu ein Versuch durchgeführt. Dabei wurde die Kalibrierlehre zehnmal manuell ein- und ausgebaut und nach jedem erneuten Einbau die Messpunkte des Lehrenkoordinatensystems mit dem Lasertracker aufgenommen. Aus den Messpunkten wurden zehn Lehrenkoordinatensysteme gebildet, die mit dem Basiskoordinatensystem verglichen wurden. Die maxi-

male Differenz aller Messungen ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Dabei wurden jeweils die Translation und die Rotation der Koordinatensysteme zueinander bestimmt. Wie an dem Ergebnis zu erkennen ist, tritt nur eine geringe Translation bei der wiederholten Positionierung der Lehre auf. Eine Rotation konnte in allen Achsen bis zur vierten Nachkommastelle nicht nachgewiesen werden. Da die Rotation bei der Kalibrierung des Radadaptionssystems eine essentielle Rolle spielt, ist es für den Prozess sehr positiv, dass sie für die Positioniergenauigkeit der Lehre bedeutungslos ist. Dadurch ist nachgewiesen, dass der Kalibrierprozess mittels der Kalibrierlehre, die durch eine Absteckvorrichtung an der Bodenplatte wiederholgenau positioniert werden kann, fähig ist.

**Tabelle 4.1: Positioniergenauigkeit der Kalibrierlehre zur Systembasis**

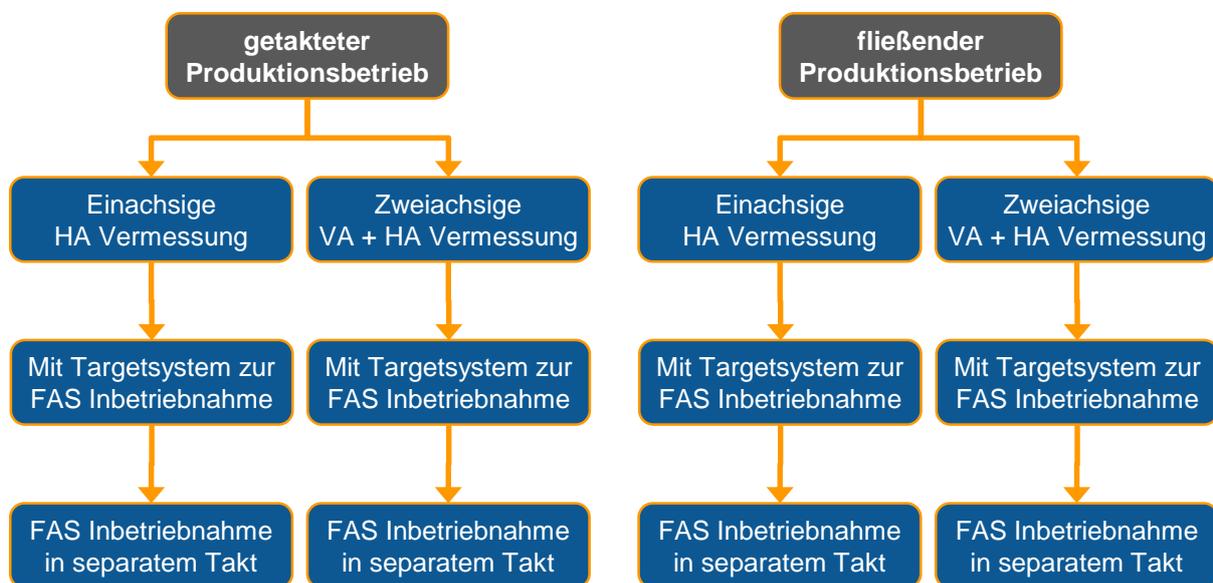
	Translation [mm]			Rotation [Grad]		
	X	Y	Z	RX	RY	RZ
Max. Differenz aller Messungen	0,1097	0,0539	0,0079	0,0000	0,0000	0,0000

Die beschriebene Kalibriervorrichtung in Form der Kalibrierlehre dient dazu, den Bezug der beiden Radadaptionseinheiten untereinander herzustellen. Des Weiteren dient sie der Prozessüberwachung bei laufender Produktion. Eine Kalibrierung des Systems in regelmäßigen Intervallen bei laufender Produktion stellt die Qualität des Messprozesses sicher, da eventuelle Fehler des Systems durch die Kalibrierung identifiziert werden können. Neben der Kalibrierlehre, die regelmäßig im Prozess benötigt wird, musste noch eine weitere Vorrichtung zur Kalibrierung entwickelt werden. Die Radadaptionkopf-Absteckvorrichtung ist in der Abbildung 4.7 dargestellt. Sie dient der einmaligen Bezugspunkt-Bestimmung bei der Erstinbetriebnahme des Radadaptionssystems. Das ist notwendig, weil durch die Schwimmeinheit des Radadaptionssystems und die Freiheitsgrade der halbkardanischen Kopflagerung keine definierte Position des Adaptionkopfs existiert. Die Absteckvorrichtung wird daher zwischen der Kinematikeinheit und dem Adaptionkopfhalter eingebaut. Dadurch ist der Kopf in einer definierten Position fixiert und es kann ein Bezugskordinatensystem für den jeweiligen Radadaptionkopf angelegt werden. Von diesem Bezug aus werden folglich alle relativen Abweichungen für die spätere Berechnung bestimmt. Die detaillierte mathematische Auslegung wird in Kapitel 5 noch näher erläutert.

## 4.5 Konzept zur Skalierbarkeit der eingesetzten Technologien

Um das Ziel der Arbeit erreichen zu können, wird das bestehende Betriebsmittel eingesetzt, das in einen prozesstaughlichen Zustand versetzt wurde. Zusätzlich kommen verschiedene Teilsysteme mit hinzu. Daher wurden für das Gesamtvorhaben unterschiedliche Skalierungsstufen für den Prozess und das Betriebsmittel entwickelt. Dadurch entsteht große Flexibilität, um auf die unterschiedlichen Inbetriebnahmeprozesse situationsbedingt reagieren zu können.

Dabei besteht innerhalb der Skalierung die Wahl zwischen getaktetem und fließendem Förderbetrieb der Montagelinie und zwischen ein- und zweiachsigem Messbetrieb. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, jede Auswahl mit einem Targetsystem für die Fahrerassistenzsystem-Inbetriebnahmen zu kombinieren. Abschließend kann noch festgelegt werden, ob die Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme in einem Produktionstakt mit dem Radadaptionssystem erfolgen soll bzw. kann oder, ob die Inbetriebnahme in einem unabhängigen nachgelagerten Takt erfolgen soll. Aus den genannten Skalierungen zeigt Abbildung 4.8 in den blauen Feldern die 12 Kombinationsmöglichkeiten in Abhängigkeit von der Fördertechnik für den Produktionsbetrieb. Durch die dargestellten Betriebsmittelunterteilungen kann das System den vorliegenden Produktionsbedingungen und erforderlichen Inbetriebnahmeprozesse am Fahrzeug angepasst werden.

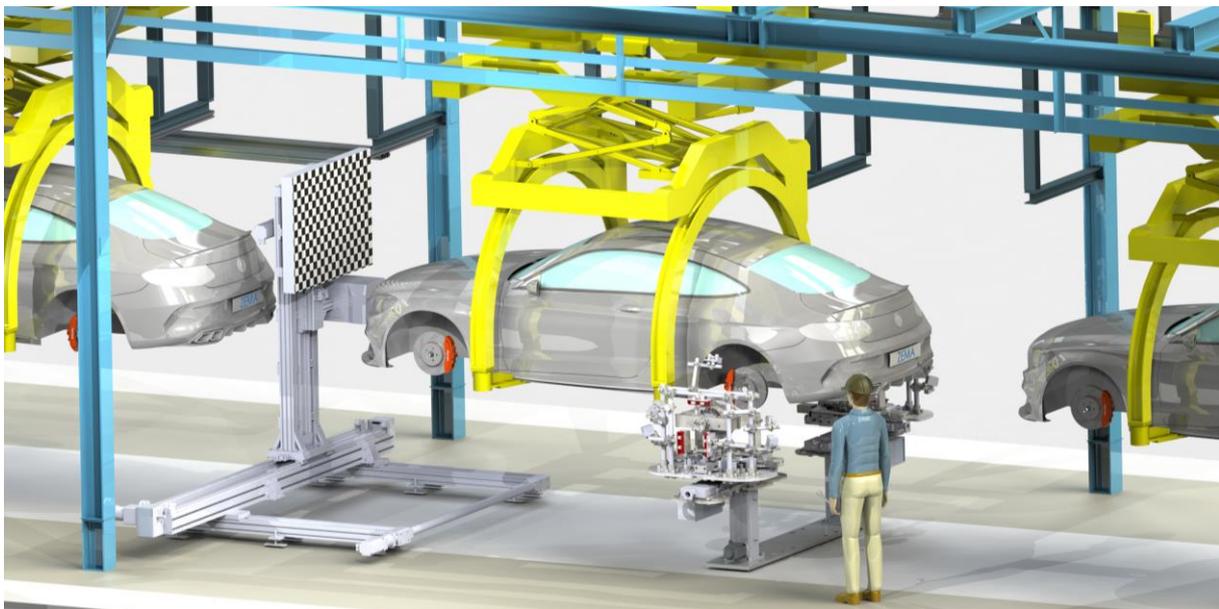


**Abbildung 4.8: Skalierungsmöglichkeiten für den Systemaufbau**

Um die unterschiedlichen Skalierungsstufen darstellen zu können, wurde das Gesamtsystem in einzelne Modulgruppen zerlegt. Die Hauptgruppen sind dabei das Radadaptionssystem, das Targetsystem, das Fördersystem und die Anlagentechnik. Das Radadaptionssystem ist dabei ein Modul, das immer für eine Fahrzeugachse, die vermessen werden soll, benötigt wird. Wird beispielsweise nur die HA vermessen, ist ein Modul notwendig, wird die VA und die HA vermessen, werden zwei Module benötigt. Die Bodenplatte jedes Achsmoduls des Radadaptionssystems ist dabei so gestaltet, dass sie auf dem Boden oder einer Linearfördertechnik befestigt werden kann. Weiterhin besteht bei jeder Bodenplatte die Möglichkeit, die Kalibrierungsvorrichtung aufzunehmen. Die Anlagentechnik ist dabei so gehalten, dass sie je nach Anzahl der Module beliebig erweitert werden kann.

Das Targetmodul kann je nach Kalibrierumfang und Zugänglichkeit in der Montagelinie unterschiedlich ausgeführt sein. Das wird in Kapitel 6 noch näher erläutert. Prinzipiell besteht es aus einem Grundrahmen, der in die Förderrichtung X und quer zur Förderrichtung Y beweglich

ist. Dadurch ist sichergestellt, dass sich das System der Fahrzeuglänge bzw. den erforderlichen Kalibrierdistanzen anpassen kann. Auch das Fahren des Kalibriernormals über die Förderstrecke und das seitliche Herausfahren für die Rückförderung zum nächsten Fahrzeug kann damit umgesetzt werden. Um direkt mit den Radadaptionseinheiten zusammenzuarbeiten, muss das Targetsystem gemeinsam mit dem Radadaptionssystemaufbau in einen Produktionstakt integriert werden. Abbildung 4.9 zeigt diesen Aufbau in einem Produktionstakt für den getakteten Förderbetrieb und einer einachsigen HA Vermessung mit einem Targetmodul zur Inbetriebnahme der Umfeldsensoren. Dieser dargestellte Systemaufbau wird im folgenden Entwicklungs- und Validierungsprozess dieser Arbeit neben den weiteren Skalierungen primär betrachtet und untersucht.



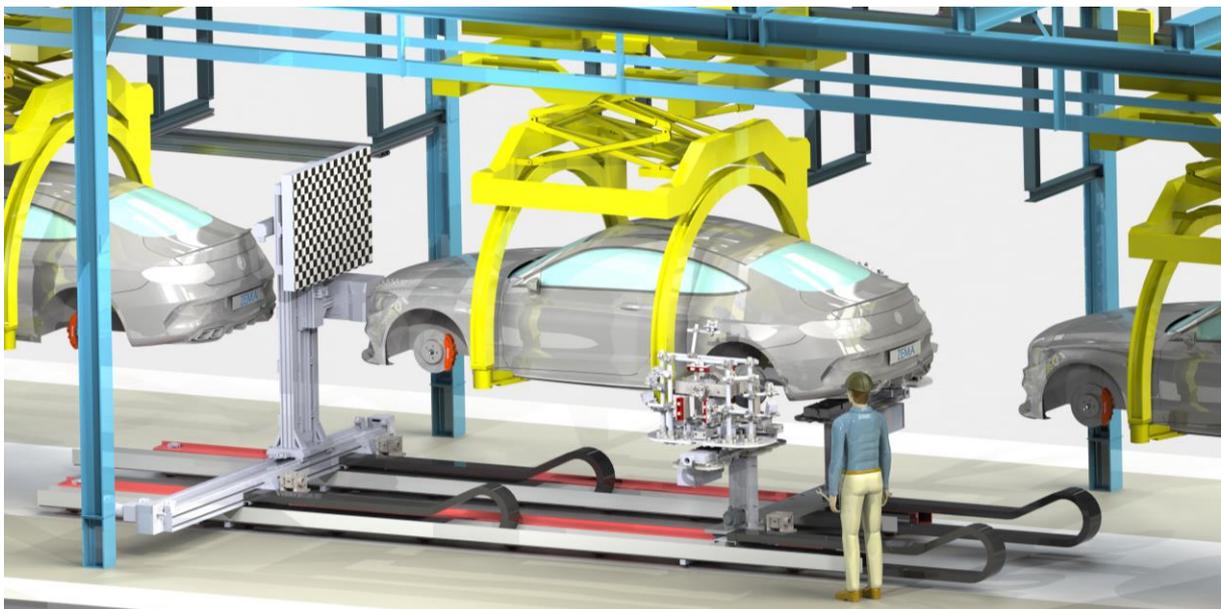
**Abbildung 4.9: Aufbau für die Umfeldsensor-Inbetriebnahme in der getakteten Montagelinie**

Mit dem dargestellten Aufbau kann die Fahrzeughinterachse vermessen werden. Durch die dabei ermittelten Einzelspuren, bezogen auf die Hinterachssymmetrie und die Richtung der geometrischen Fahrachse, können unterschiedliche Inbetriebnahmeprozesse erfolgen. Zum Beispiel können Voreinstellprozesse für die Einzelspurwinkel der HA realisiert, aber auch die Umfeldsensoren des Fahrzeugs in Kombination mit dem Targetsystem kalibriert werden. Eine komplette Vermessung des Fahrwerks ist in dieser Skalierungsstufe wegen des fehlenden Radadaptionsmoduls an der VA nicht möglich.

In dem hier gezeigten Schema ist das Targetmodul im Takt der Radadaptionseinheiten mit vorhanden. In einigen bestehenden Montagelinien kann das wegen des fehlenden Platzes nicht immer umgesetzt werden. Zusätzlich müssen die Fahrzeugsysteme für die Umfeldsensor-Kalibrierung elektronisch betriebsbereit und per Diagnoseschnittstelle (OBD) erreichbar sein. Je nachdem wo das Fahrzeug vermessen wird, sind nach der Montageabfolge die

Fahrzeugsysteme eventuell noch nicht zum Kalibrieren bereit, dann muss ein späterer Produktionstakt gewählt werden. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, die Vermessung mit dem Radadaptionssystem durchzuführen und über ein externes Messsystem der Fahrzeugkarosserie mitzugeben. Dieses externe Messsystem ist in einem späteren Produktionstakt wieder vorhanden, um die Fahrzeugkarosserie wieder einzulesen und die damit verbundenen Werte auf die aktuelle Lage darstellen zu können. Auch das in Abbildung 4.9 dargestellte Targetsystem befindet sich dann im folgenden Montagetak und nicht mehr in demjenigen, in dem die Vermessung der Achsen erfolgte. Dieses Vorgehen, die Mess- und Kalibrierprozesse örtlich zu trennen, kann für jede Skalierungsstufe gewählt werden, wie Abbildung 4.8 zeigt. Die mögliche Umsetzung für dieses Vorgehen wird im Kapitel 6.4 dargestellt.

Ein weiterer Unterscheidungspunkt zu den bereits vorgestellten Skalierungen ist die Fördertechnik in der Montagelinie. Neben dem getakteten Betrieb des Systems soll auch der fließende Produktionsbetrieb möglich sein. Dazu kommt zum bereits vorgestellten Aufbau ein weiteres Modul hinzu. Durch das Fördermodul, das aus einem Linearachsensystem besteht, kann der Gesamtaufbau aus Radadaptionseinheiten und Targeteinheit dem Fließbetrieb der Montagelinie angepasst werden. Dazu werden die Systemkomponenten aus dem getakteten Betrieb auf das Fördermodul aufgesetzt und können sich so unabhängig voneinander in die Förderrichtung X der Montagelinie bewegen. Abbildung 4.10 zeigt den Gesamtaufbau, der sich zur vorherigen Abbildung durch den fließenden Förderbetrieb unterscheidet. Die möglichen durchführbaren Inbetriebnahmeumfänge sind mit der vorherigen Ausbaustufe identisch. Auch die örtliche Trennung der Mess- und Kalibrierumfänge soll bei dieser Ausbaustufe realisiert werden können.

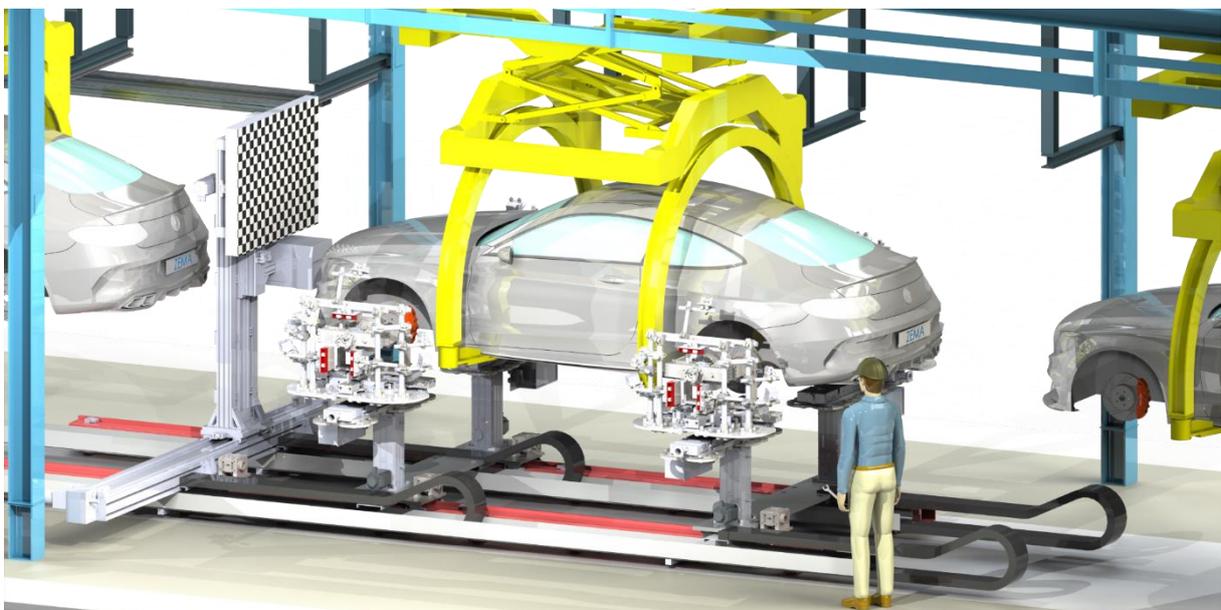


**Abbildung 4.10: Aufbau für die Umfeldsensor-Inbetriebnahme in der Fließmontagelinie**

Die Anschlusschnittstellen für die Bodenplatte des Radadaptionssystems und die des Targetsystems sind modular gehalten, so dass sie direkt auf die Linearachsen aufgesetzt werden

können. Für die Kalibrierung der Radadaptionseinheiten untereinander ergeben sich keine besonderen Bedingungen, da die Bodenplatte die beiden Komponenten starr miteinander verbindet. Jedoch muss jedes Basiskoordinatensystem eines Radadaptionsmoduls und das des Targetmoduls zu allen Positionen auf den Linearachsen in einem gemeinsamen Bezugskoordinatensystem eingemessen werden. Nach Synchronisierung der Komponenten auf den Linearachsen mit der Werksfördertechnik arbeiten die Teilsysteme wie bei einem getakteten Aufbau. Beim Übertragen der Bezugsgrößen unter den Teilsystemen spielt jedoch der gemeinsame Bezug eine Rolle, der sich über die Förderstrecke ändern kann.

Abbildung 4.11 zeigt die maximale Ausbaustufe des Gesamtsystems in einem Produktionstakt. Dabei kann eine komplette Fahrwerkvermessung mit der dazugehörigen Einstellung erfolgen. Um die Einstellung der VA vornehmen zu können, muss der Lenkwinkel erfasst werden. Dazu kann die im Stand der Technik vorgestellte optische Lenkwinkelerfassung innerhalb der Montagelinie genutzt werden. Des Weiteren können die Umfeldsensor-Kalibrierungen gemeinsam mit dem Targetmodul durchgeführt werden. Auch dabei wäre eine örtliche Trennung der Mess- und Kalibrierumfänge in unterschiedlichen Takten möglich. Je nach gefordertem Variantenmix an Fahrzeugtypen auf einer Montagelinie muss dieses System, wie in der Abbildung gezeigt, sowohl für den getakteten als auch für den fließenden Produktionsbetrieb gewählt werden. Das ist von den unterschiedlichen Radständen der Fahrzeuge anhängig. Die Radadaptionseinheiten können nur einen geringen Ausgleich in die Förderrichtung vornehmen. Ist ein größerer Radstandsverstellbereich erforderlich, müssen die Radadaptionseinheiten zusammen bzw. auseinander gefahren werden. Das ist nur durch das Fördermodul möglich, das auch den Fließbetrieb realisiert, da sich darauf jede Komponente unabhängig bewegen kann.



**Abbildung 4.11: Aufbau für eine komplette Fahrwerk- und Umfeldsensor-Inbetriebnahme in der Fließmontagelinie**

Die Fahrwerkeinstellungen an VA und falls benötigt auch an der HA können durch ein automatisiertes System oder von einem Werker manuell realisiert werden. In den vorherigen Konzeptdarstellungen ist die manuelle Einstellung durch einen Werker beschrieben. Allerdings muss bei einer geplanten manuellen Einstellung des Fahrwerks ein Werker gang unter dem Fahrzeug realisiert werden. Nur so ist die Zugänglichkeit des Werkers zu den Einstellpunkten des Fahrwerks gegeben. Zusätzlich müssen, in einer weiteren Betrachtung außerhalb dieser Arbeit, die Sicherheitsvorkehrungen und die Mitfahrmöglichkeit für den Werker für eine Fahrwerkeinstellung untersucht werden.

Beim zuvor beschriebenen Dauerversuch mit dem prototypischen Radadaptionssystem wurden die Prozesszeiten für das Herstellen der Einstellbereitschaft und des Abdockvorgangs ermittelt. Sie beinhalten jeweils die Zeit vom Fahren aus einer Grundposition bis zum Verspannen an der Fahrzeugradnabe und umgekehrt. Basis für die Gesamtprozesszeit sind die Anforderungen, bei denen die Taktzeit von 90 Sekunden und eine Taktlänge von 6 Metern vorgegeben sind. Bei einem getakteten Prozess ist aufgrund der ermittelten Daten nur ein Produktionstakt erforderlich, da das Fahrzeug sofort nach Einfördern in den Takt zugänglich ist. Bei einem fließenden Prozess sind zwei Produktionstakte erforderlich, da bereits im ersten Takt eine gewisse Zeit verstreicht, bis für das Radadaptionssystem beide Fahrzeugachsen in Reichweite sind. Eine Übersicht der Teilprozesse mit Prozesszeiten und Förderweg zum zuvor vorgestellten fließenden Mess- und Einstellprozess ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

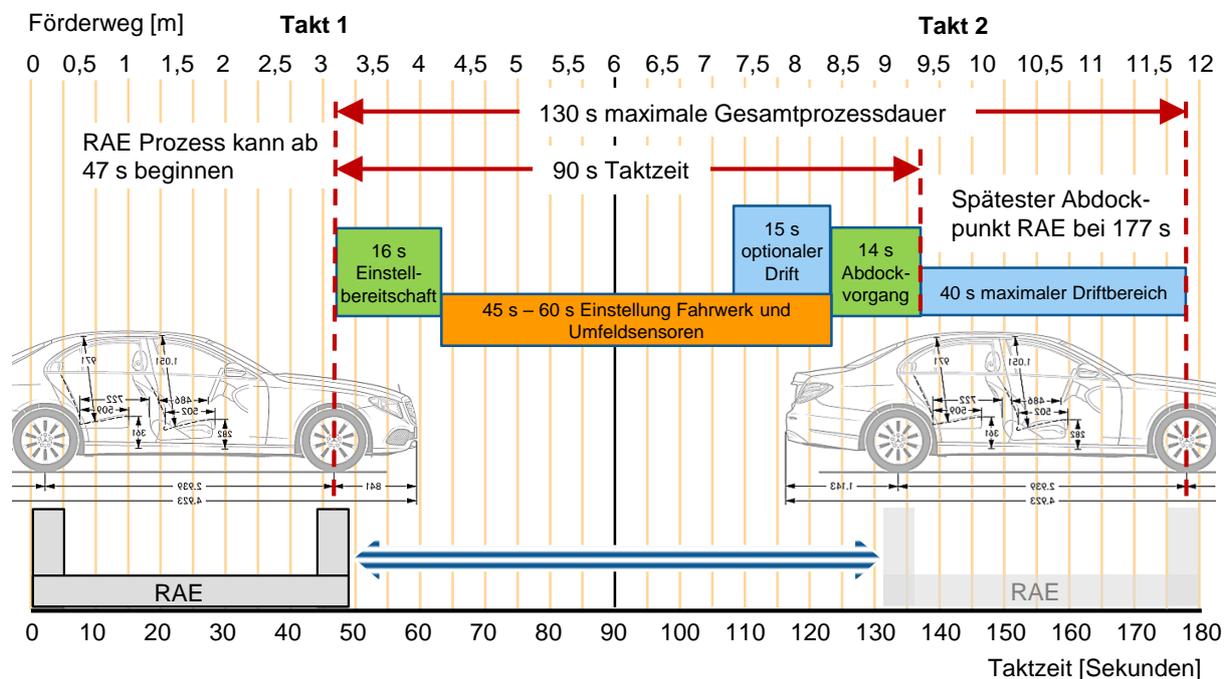


Abbildung 4.12: Prozessablauf über Förderweg und Taktzeit für das fließende Gesamtsystem

In der Abbildung sind beide Takte mit dem jeweiligen Förderweg von 6 Metern, also insgesamt 12 Metern dargestellt. Parallel dazu ist unterhalb die Taktzeit in Sekunden aufgetragen. Nach

einer Zeit von 90 Sekunden werden 6 Meter Förderweg zurückgelegt. Das entspricht einer Fördergeschwindigkeit von ca. 67 Millimetern pro Sekunde. Bei einem typischen Radstand eines Mittelklassefahrzeugs von ca. 3,2 Metern vergeht daher eine Zeit von ca. 47 Sekunden bis alle Fahrzeugradnaben im ersten Takt in Reichweite des Radadaptionssystems sind. Nach dem Synchronisieren der Linearachsen mit der Werksfördertechnik, was nach 47 Sekunden abgeschlossen ist, kann der Adaptionprozess beginnen. Das beinhaltet die Berechnung der Adaptionenkoordinaten, das Anfahren und Verspannen an der Radnabe sowie die Hubfahrt in die K0-Lage des Fahrzeugs. Diese Teilprozesse sind nach 16 Sekunden abgeschlossen. Der Abdockvorgang vom Absetzen des Fahrzeugs über das Entspannen des Adaptionkopfs bis zum Erreichen der Grundstellung dauert 14 Sekunden. Diese Rüstzeiten des Systems sind im Diagramm der Abbildung 4.12 als Einstellbereitschaft mit 16 Sekunden und als Abdockvorgang mit 14 Sekunden in grün dargestellt.

Der Einstell- und Kalibrierprozess für das Fahrwerk und die Umfeldsensoren des Fahrzeugs sind mit 45 bis 60 Sekunden in orange angegeben. Diese Zeit ist maximal möglich, um gemeinsam mit den Rüstzeiten des Systems auf eine Prozesszeit von 90 Sekunden zu kommen. Das ist wichtig, da sonst die Linientaktzeit nicht eingehalten werden kann. Durch das Fließen über zwei Takte hinweg ergibt sich eine maximale Prozesszeit von 130 Sekunden, in denen die Fahrzeugradnaben in Reichweite des Adaptionssystems liegen. Daher ergibt sich bei einer Taktzeit von 90 Sekunden ein maximaler Driftbereich von 40 Sekunden für den Gesamtprozess. Diese Driftbereiche sind im Diagramm in blau dargestellt. Sollte daher ein Einstellprozess einmal länger als die angegebene Zeit von 60 Sekunden andauern, so kann das innerhalb der Driftzeit länger geschehen. Beim folgenden Prozess am nächsten Fahrzeug stehen dann für die Einstellung nur die 60 Sekunden abzüglich der im vorherigen Prozess länger benötigten Zeit zur Verfügung. Durch diese Driftmöglichkeit kann beispielsweise auf aufwendigere einzustellende Fahrzeuge oder auf höhere Ausstattungsquoten reagiert werden. Dabei gilt jedoch, die richtige Eintaktung der Fahrzeuge in die Montagelinie zu beachten.

Die vorgestellten konzeptionellen Skalierungsstufen und Modulgruppen zeigen, dass das Gesamtsystem flexibel auf unterschiedliche Anforderungen oder Inbetriebnahmeprozesse reagieren kann. Um im weiteren Verlauf dieser Arbeit den Nachweis der Fähigkeiten des Systems zu erbringen und die Komplexität in einem ersten Schritt beherrschbar zu halten, wird der getaktete Aufbau für den einachsigen Betrieb weiter verfolgt. Dabei soll das Radadaptionssystem auch in Kombination mit einem Kalibriernormal erprobt werden, wie in der Abbildung 4.9 aufgezeigt wurde. Die folgenden Kapitel 5 und 6 beziehen sich daher primär auf diese Skalierungsstufe, geben jedoch Ansätze, den finalen Ausbau bei erfolgreicher Umsetzung der Teilausbaustufe zu realisieren.

## 5 Entwicklung eines Messalgorithmus

Nachdem der prototypische Aufbau des Radadaptionssystems in einen messfähigen Zustand versetzt wurde, soll innerhalb dieses Kapitels der zugehörige Messalgorithmus für die Messdatenauswertung entwickelt werden. Nach der Erstellung des mathematischen Modells und der damit verbundenen Auswertesoftware soll das Radadaptionssystem durch eine Fähigkeitsuntersuchung validiert werden.

### 5.1 Konzept für ein räumlich mathematisches Modell

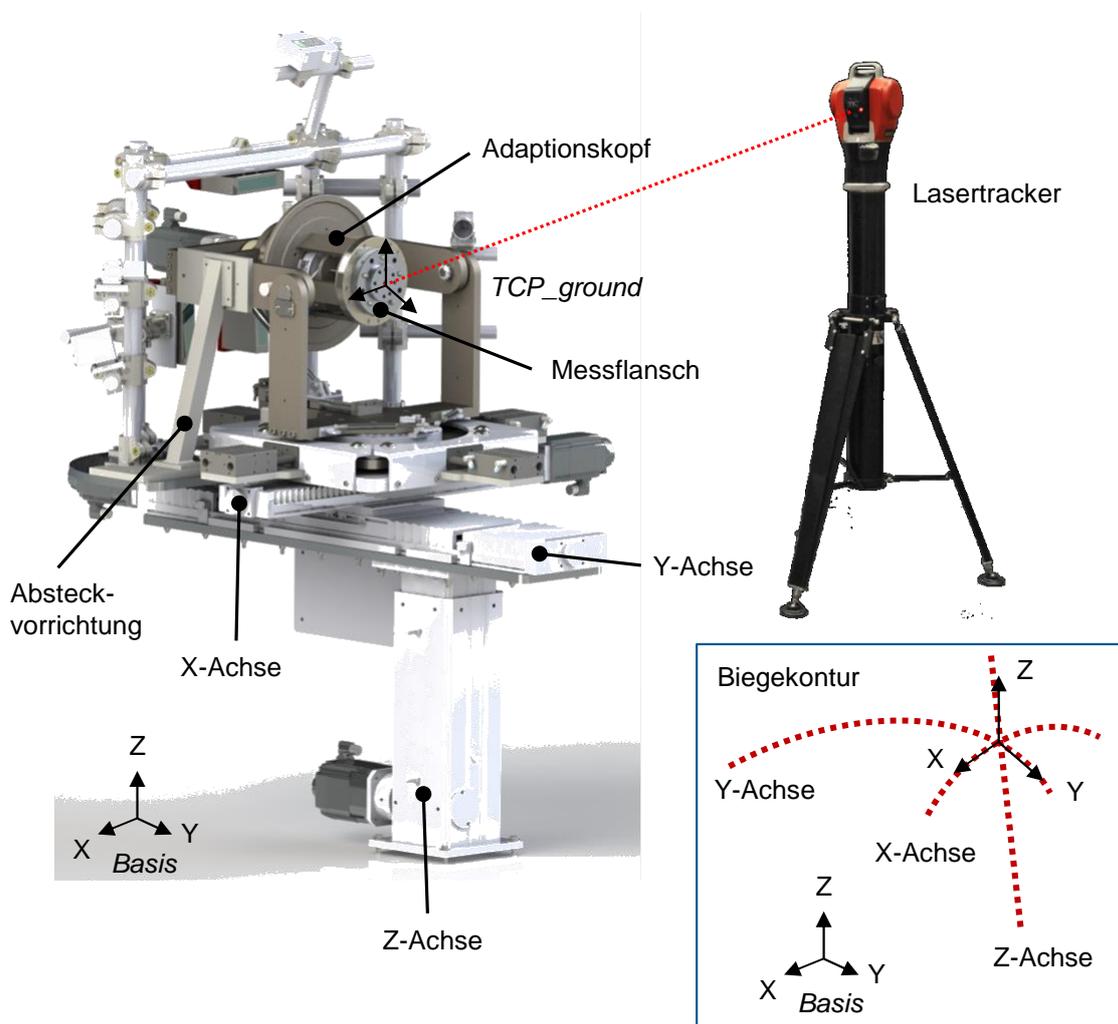
Zu Beginn wurden dem Radadaptionssystem Koordinatensysteme für die unterschiedlichen Bewegungsmöglichkeiten zugeordnet. Die kinematischen Bewegungs- und Freiheitsgrade wurden in der Abbildung 2.35 dargestellt. Um die korrekte Bestimmung und Anzahl der Koordinatensysteme festlegen zu können, muss die Kinematik auf ihr stationäres und dynamisches Verhalten untersucht werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse, die sich durch den Gesamtaufbau ergeben und der daraus abgeleitete primäre Koordinatensystemzusammenhang werden in den folgenden Kapiteln aufgezeigt.

#### 5.1.1 Anforderungen und Besonderheiten des Messsystems

Jede Radadaptionseinheit besteht aus einer kinematischen Bewegungseinheit mit diversen Freiheitsgraden und einem sich darauf mitbewegtem Messsystem. Aufgrund des Gesamtaufbaus können je nach Bewegung des Systems statische Belastungen durch das Eigengewicht wie auch dynamische durch die Adaption mit der Fahrzeugradnabe auftreten. Sie entstehen durch die Einfederung der jeweiligen Fahrzeugachse, bei der die Last einer Achse von je zwei Radadaptionseinheiten komplett aufgenommen werden muss. Da die Adaptionposition des Fahrzeugs mit den Radadaptionseinheiten nicht immer an einer statischen Position durchgeführt werden kann, können unterschiedliche dynamische Verhalten auftreten. Dieses negative Verhalten wird durch die unterschiedlichen Messobjekte und den damit verbundenen schwankenden Achslasten unterstützt, die über den jeweiligen Radadaptionkopf auf die entsprechende Kinematik jeder Einheit übertragen werden.

Diese auf die Kinematik beschriebenen Einflüsse tragen dazu bei, dass sich die Ausgangsbasis für eine Vermessung ändern kann. Durch die unterschiedlichen Last- und Adaptionpositionen entstehen nicht vorhersehbare Durchbiegungen und Verwindungen in der Kinematik der jeweiligen Radadaptionseinheit. Die Ausgangsposition bei einer Vermessung zur Basis stellt jedoch einen essenziellen Faktor dar, bedingt durch die auf der Kinematik befindliche Messtechnik, die sich dadurch mitbewegen kann. Aus diesem Grund muss das Verhalten einer jeden Radadaptionseinheit vor deren Inbetriebnahme innerhalb der Produktion analysiert werden. Dieses Verhalten der unbelasteten und belasteten Achsen des Systems zu deren absoluten Positionen muss in die mathematische Betrachtung mit einfließen.

Zur Analyse des kinematischen Verhaltens jeder Radadaptionseinheit wurde jedes System nach dem Aufbau am Bestimmungsstandort vermessen und ein zugehöriger Datensatz generiert. Um für die Vermessung einen messbaren Punkt an jeder Radadaptionseinheit zu generieren, wurde ein Messflansch entwickelt, der von dem Radadaptionskopf aufgenommen werden kann. An dem Messflansch kann ein Target aufgenommen werden, das von einem Lasertracker angemessen werden kann. Dabei ist der Flansch so ausgelegt, dass der aufgenommene Messpunkt sich im Mittelpunkt und in der Anlagefläche des Adaptionkopfs befindet. Dieser Punkt bildet an jeder Einheit den Tool Center Point (TCP), wie er in der Robotik bekannt ist [CRA05, S. 14]. Der TCP bildet später den Ursprung des jeweiligen Kopfkoordinatensystems in der entsprechenden Ausbringungsstufe. Der Aufbau zur Vermessung des Adaptionkopfs mittels Lasertracker, um daraus die Biegekonturen des Systems abzuleiten, ist in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 5.1: Einmessung der Kinematiken der Radadaptionseinheiten**

Um in einem ersten Schritt ein Kopfkoordinatensystem anlegen zu können, werden mit dem Lasertracker drei Messpunkte über das Target am Messflansch aufgenommen. Dazu muss das System einen definierten Zustand einnehmen, in dem das Kopfkoordinatensystem zur Basis statisch ermittelt werden kann. Dafür wurde für die kinematischen Achsen X, Y und Z eine

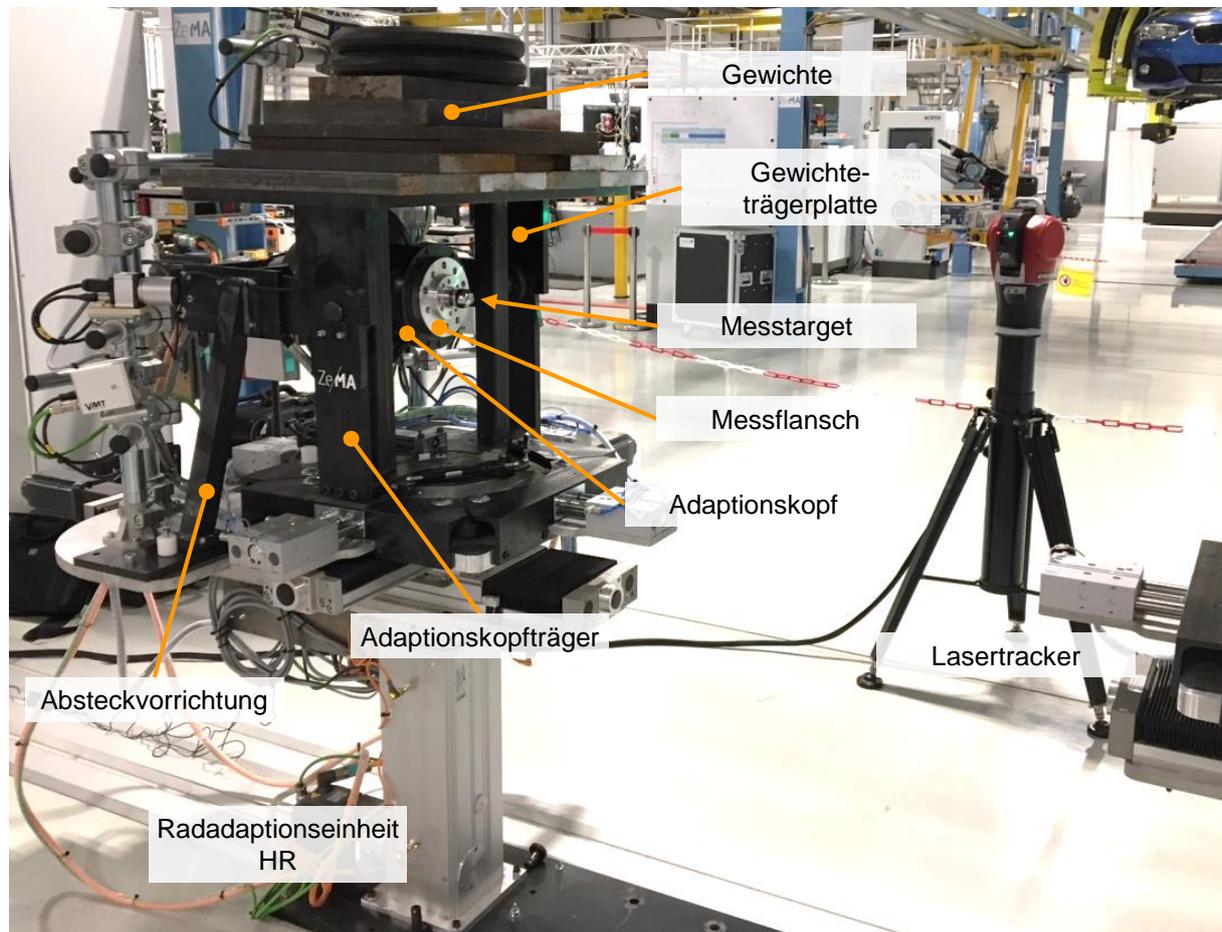
Grundstellung gewählt, die mittels der Positionsgeber und Antriebsmotoren der Achsen vorgegeben werden kann. Folglich werden aus dieser Grundstellung alle weiteren Korrekturfaktoren bestimmt. Um auch die Freiheitsgrade des Systems in der Grundstellung in eine definierte Position zu bringen, wird der Kopfaufbau mit einer Absteckvorrichtung blockiert. Durch die mechanisch eingebaute Vorrichtung werden die Schwimmeinheit und die Rotationswinkel  $R_x$  und  $R_z$  in einer definierten Ausgangsposition gesperrt. Weil sich das System daher in einer definierten und wiederholbaren Position befindet, wird der erste Punkt des Kopfkoordinatensystems, der den Ursprung bildet, gemessen.

Neben dem Ursprung fehlen noch zwei Punkte, die die Achsrichtungen des Koordinatensystems definieren. Dazu wird lediglich die X-Achse um einen definierten Wert in die positive X-Richtung des anzulegenden Koordinatensystems bewegt und anschließend ein weiterer Messpunkt aufgenommen. Dieser Punkt bildet zusammen mit dem Ursprungspunkt die X-Achse. Im Anschluss daran wird die X-Achse wieder in ihren Ursprung bewegt und die Z-Achse um einen definierten Wert in die positive Z-Richtung gefahren. Auch in dieser Position wird ein Messpunkt aufgenommen, der zusammen mit dem Ursprungspunkt die Z-Achse bildet. Die Y-Achse des Koordinatensystems wird durch das Kreuzprodukt ( $\vec{Y} = \vec{X} \times \vec{Z}$ ) der beiden bereits bestimmten Vektorachsen X und Z gebildet. Dadurch ist das Kopfkoordinatensystem in seiner statischen Vermessung vollständig definiert. Da sich das Koordinatensystem auf die Grundstellung des Systems bezieht, wird es als TCP\_ground definiert, wie die Abbildung 5.1 zeigt. Parallel dazu wird das Basiskoordinatensystem mit dem Lasertracker bestimmt. So kann eine erste statische Transformation zwischen der Grundstellung des jeweiligen Adaptionkopfs und der Anlagen-Basis ermittelt werden.

Ausgehend vom Ursprung des TCP\_ground-Koordinatensystems wird das kinematische Verhalten in alle Achsen ermittelt. Dadurch kann zum einen die Durchbiegung im unbelasteten und belasteten Zustand ermittelt werden, zum anderen wird die reale Position der Achsen zueinander und zur Grundstellung unter der Vorgabe eines Positionswerts ermittelt. Dazu wird jede Achse einzeln in Ein-Millimeter-Schritten verfahren und je ein Punkt mittels des Targets am Messflansch mit dem Lasertracker aufgenommen. Ist die Messfahrt für eine Achse beendet, kehrt sie wieder in den Ursprungspunkt der Grundstellung zurück und es beginnt erneut eine Messfahrt mit einer weiteren Achse. Diese Aufnahme des Achsverhaltens wird für alle drei Achsen ermittelt.

Da die Messfahrt nicht nur unbelastet durchgeführt werden muss, sondern auch unter Belastung, müssen beim gleichen Messaufbau wie zuvor Gewichte auf jede Radadaptionseinheit aufgebracht werden. Die Gewichte simulieren die Achslast auf das System bei der Messfahrt. Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsaufbau, bei dem die Achsen mit Gewichtsbelastung eingemessen werden. Um bei diesem Versuch gleiche Belastungsbedingungen wie bei einem realen Adaptionvorgang zu schaffen, musste auf eine korrekte Kräfteinleitung der Gewichtskraft in das System geachtet werden. Daher wurde eine Gewichteträgerplatte entwickelt, die die Kraft direkt auf den Adaptionkopfräger überträgt. Dadurch ist sichergestellt, dass der gleiche

Kraftfluss wie bei einer Belastung an der Adaptionfläche hervorgerufen wird. So kann auch kein Hebelarm entstehen, der ein positives oder negatives Drehmoment zur Folge hätte und damit die Messungen verfälschte.

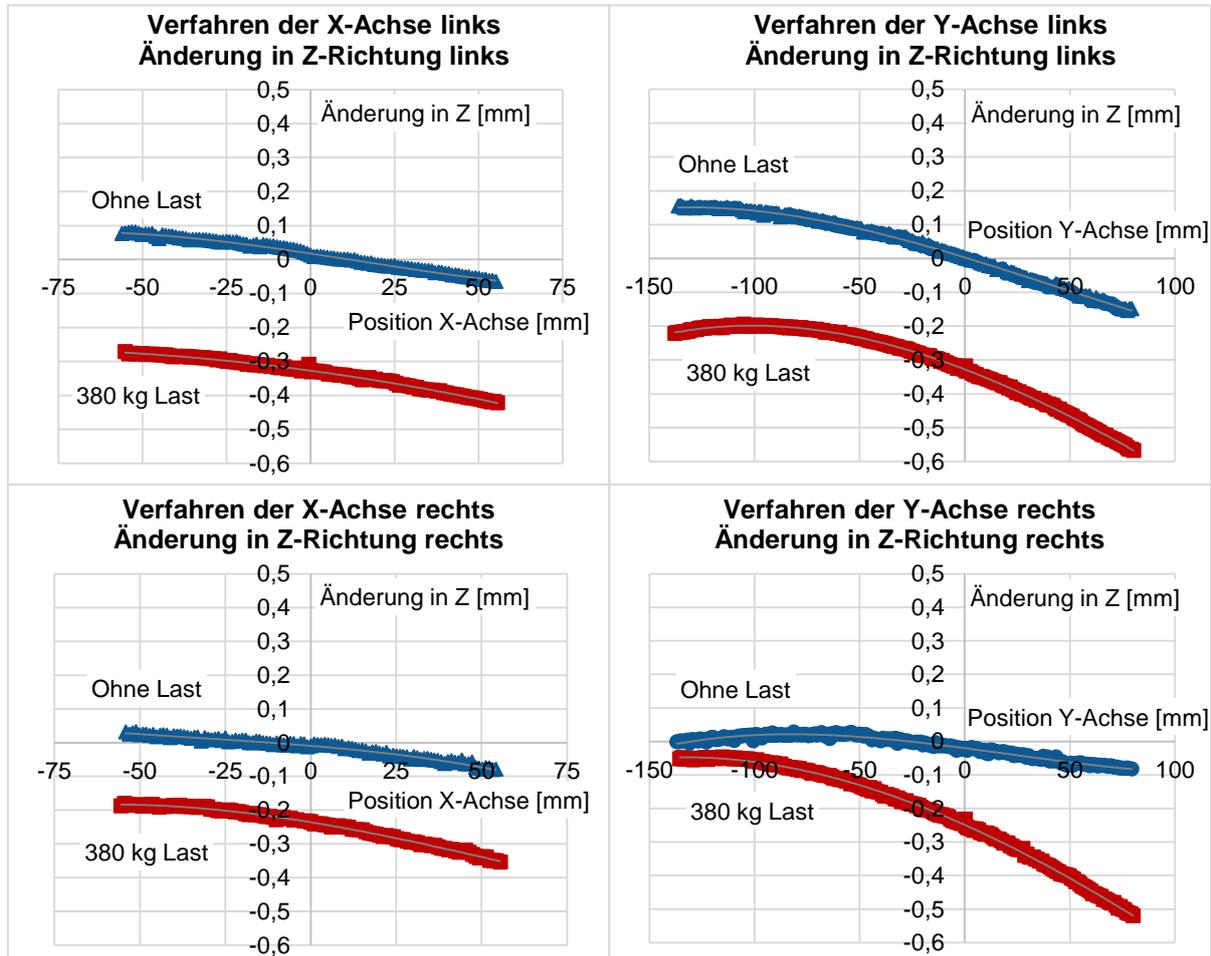


**Abbildung 5.2: Belastungsversuch der Radadaptionseinheiten**

Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Gewichtsbelastungen durchgeführt. In der größten Belastungsstufe wurden auf jede Radadaptionseinheit 380 kg aufgebracht. In der Auswertung der Messdaten wurde jeweils der Verfahrweg einer Achse in positive und negative Richtung aus der Grundstellung heraus angegeben und dabei die Änderung der anderen Achsen zum Ursprungspunkt dargestellt. Die Verfahrwege der Achsen wurden in den Bereichen ausgewertet, in denen Adaptionen mit dem Fahrzeug stattfinden können. Abbildung 5.3 zeigt einen Teil dieser Auswertung.

Bei der Teildarstellung wurde für die linke und rechte Radadaptionseinheit die X- und Y-Achsen der Kinematiken verfahren und dabei die Durchbiegungen des Systems in Z-Richtung dargestellt. Diese Untersuchungen wurden ohne Last und einmal mit Belastung durchgeführt. Die aufgenommenen Kurven zeigen mit zunehmender Belastung und mit dem Entfernen des Radadaptionkopfs von der Grundstellung eine Durchbiegung der Achsen der Adaptionseinheit, bedingt durch das Eigengewicht des Adaptionkopfaufbaus. Weiterhin ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Kurven je Radadaptionseinheit toleranz- und fertigungsbedingt

voneinander abweichen, weshalb eine individuelle Einmessung je System und Standort durchgeführt werden muss. Die komplette Auswertung der beiden Radadaptionseinheiten ist im Anhang dargestellt. Dabei wurde jeweils eine kinematische Achse verfahren und die Positionsänderung zur Grundstellung in die beiden anderen Achsrichtungen ermittelt. Die Änderungen wurden ohne Last und mit der Maximalbelastung von 380 kg dargestellt.



**Abbildung 5.3: Auswertung der Belastungsversuche mit den Radadaptionseinheiten**

Aus den aufgezeichneten Messkurven kann jeweils eine Polynomfunktion ermittelt werden. Daher ergeben sich je verfahrens Achse vier Funktionen zur Ermittlung der jeweils anderen zwei Achsrichtungsänderungen im unbelasteten und belasteten Zustand. Um daraufhin die reale Position des Adaptionkopfs zum TCP\_ground-Koordinatensystem bestimmen zu können, werden die ermittelten Polynomfunktionen und die Positionsgeber der Antriebsachsen genutzt. Wird beispielsweise eine Adaptionposition angefahren, so stehen die absoluten Positionsgeberwerte der X-, Y- und Z-Achse der Kinematik zur Verfügung. Die drei Werte geben dabei den Istvektor mit den jeweiligen Anteilen im TCP\_ground-Koordinatensystem wieder. Das entspricht jedoch nicht dem Sollvektor, der sich aufgrund der Belastung des Systems eingestellt hat.

Zur Ermittlung des Sollvektors müssen die Abweichungen anhand der Polynomfunktionen bestimmt werden. Dazu werden die Anteile der X-, Y- und Z-Achsen in die jeweiligen Polynomfunktionen eingesetzt, um den entsprechenden Anteil der beiden anderen Achsrichtungen zu berechnen. Nach der Berechnung ergeben sich jeweils zwei Änderungsanteile sowie der aktuelle vorgegebene Achsenwert pro Achsrichtung. Da die Durchbiegung dem Superpositionsprinzip folgt, addieren sich die einzelnen Biegeanteile zu einem gemeinsamen Wert [MAN18, S. 96f.]. Daher werden die drei X-Anteile, die drei Y-Anteile und die drei Z-Anteile zu je einem Gesamtanteil addiert, die damit einen neuen Sollvektor des Systems bilden. Diese Bestimmung erfolgt mit den Polynomfunktionen für die unbelastete Kinematik.

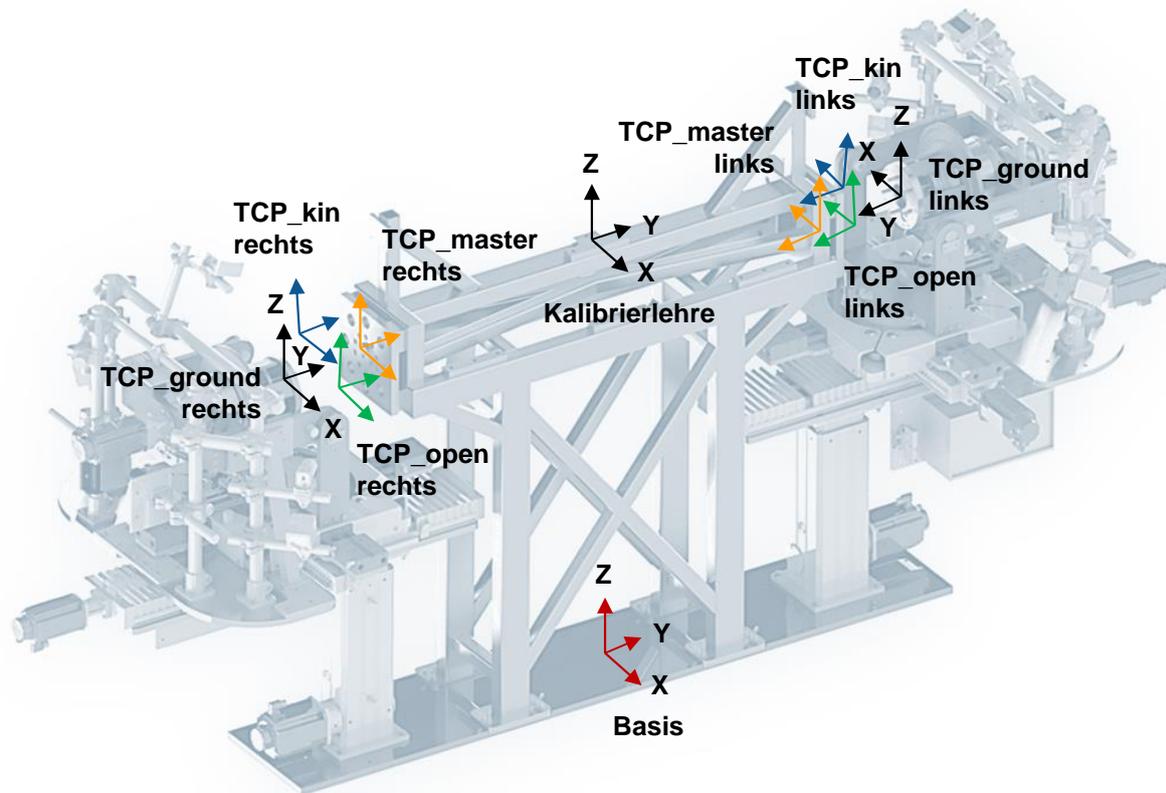
Danach wird der Sollvektor auf die gleiche wie vor beschriebene Art mit den Polynomfunktionen für die maximal belastete Kinematik an den gleichen Achspositionen bestimmt. Abhängig von der aktuellen Belastung der jeweiligen Radadaptionseinheit erfolgt zwischen dem Sollvektor der unbelasteten und der maximal belasteten Konstellation eine lineare Interpolation zwischen den entsprechenden Achsanteilen [PAP18, S. 208]. Dazu wird die aktuelle Hubkraft der Z-Achse ermittelt. Sie wird im Antriebssystem über das entsprechende Antriebsmoment und den Spindelraten der Achse berechnet. Unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung kann das aktuelle Gewicht am Adaptionsskopf bestimmt werden. Nach Bildung des jeweiligen Deltas der beiden Vektoren in den X-, Y- und Z-Anteilen wird der Wert auf die 380 kg Gesamtbelastung der Einmessung skaliert und mit der aktuellen Belastung multipliziert. Dieser Wert wird je Anteil dem unbelasteten Sollvektor hinzugefügt. Dadurch ergibt sich der finale Sollvektor, bei dem sich die Kinematik befindet. Mittels des theoretisch berechneten Sollvektors und des Istvektors, der aus den Positionsgebern ermittelt worden ist, kann ein neues Koordinatensystem TCP\_kin bestimmt werden, das im Kapitel 5.2.3 beschrieben wird.

### 5.1.2 Koordinatensysteme des Radadaptionssystems und deren Funktion

Um die späteren Radkoordinatensysteme generieren zu können, ist es notwendig alle Teilbewegungen des Systems in die Berechnung miteinzubeziehen. Zur Berücksichtigung dieser Zusammenhänge im Gesamtsystem wurde jeder möglichen Teilbewegung bzw. Position, die für die Vermessung relevant ist, ein Koordinatensystem zugeordnet. Eine Übersicht der erstellten Koordinatensysteme innerhalb des Radadaptionssystems soll in diesem Kapitel gegeben werden. Auch die jeweiligen Abhängigkeiten der Koordinatensysteme werden aufgezeigt, um im weiteren Verlauf eine Transformationsabfolge bestimmen zu können.

Abbildung 5.4 zeigt eine Übersicht der angelegten Koordinatensysteme für das Radadaptionssystem zur Hinterachsvermessung. Die Darstellung bezieht sich nur auf die systemrelevanten primären Koordinatensysteme, die für eine spätere schrittweise Berechnung bestimmt werden müssen. Auch die Kalibrierlehre ist dabei von Bedeutung. Da sich die Adaptionseinheiten auf einer gemeinsamen Bodenplatte befinden, ist dort die Basis verortet. Das Koordinatensystem stellt die Verbindung zwischen den beiden Einheiten und der Kalibrierlehre dar. Auch eine

Weitergabe der Messdaten zu einem externen Betriebsmittel, wie beispielsweise einem Targetsystem, ist dadurch gegeben. Das wird im Kapitel 6 noch näher erläutert.



**Abbildung 5.4: Koordinatensysteme des Radadaptionssystems**

Neben dem Koordinatensystem der Basis für das Gesamtsystem und dem der Kalibrierlehre, wurden je Adaptionseinheit vier Koordinatensysteme gebildet. Diese vier Koordinatensysteme ergeben sich aus den Bewegungsmöglichkeiten der Kinematik und sind wie folgt definiert:

- **TCP\_ground links / rechts**  
Dieses Koordinatensystem befindet sich im Mittelpunkt der Adaptionsfläche des Radadaptionsskopfs bezogen auf eine definierte Grundstellung der Kinematik und der Freiheitsgrade des Systems. Das Koordinatensystem unterliegt einer statischen Einmessung zwischen Basis und der angefahrenen Grundstellung der Linearachsen. Die Freiheitsgrade wurden ebenfalls bei der Einmessung durch eine Absteckvorrichtung in die Grundstellung gebracht.
- **TCP\_kin links / rechts**  
Das TCP\_kin-Koordinatensystem beinhaltet die Positionsänderung aufgrund der Adaptionsposition zwischen Adaptionsskopf und Fahrzeugradnabe und der auftretenden belastungsabhängigen Durchbiegung der Achsen. Auch dieses Koordinatensystem befindet sich im Mittelpunkt der Adaptionsfläche des Radadaptionsskopfs. Dabei enthält das Koordinatensystem die Positionsänderung zu der statisch eingemessenen Grundstellung TCP\_ground, die über die Positionsgeber der Antriebe ermittelt wird.

Des Weiteren unterliegt das Koordinatensystem der neuen Ausrichtung zur Grundstellung, die sich aufgrund der Belastung und des Systemeigengewichts an der angefahrenen Adaptionposition ergibt. Die Ermittlung der Durchbiegungsänderung erfolgt wie im vorherigen Kapitel aufgezeigt wurde. Das Vorgehen zur Koordinatensystembestimmung wird in Kapitel 5.2.3 beschrieben.

- **TCP\_open** links / rechts

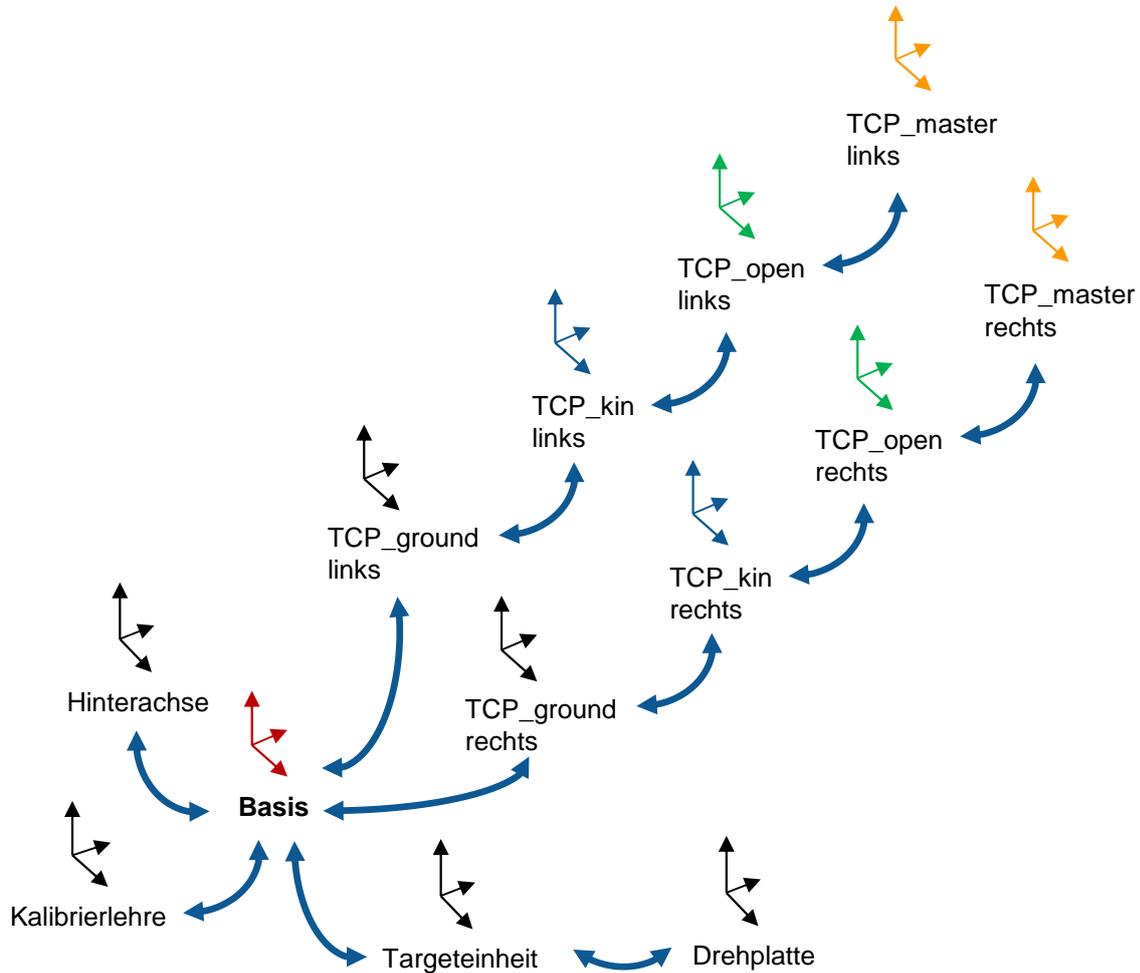
Neben der Betrachtung der kinematisch bewegten Achsen und deren Fehlerkompensation müssen nachfolgend die Freiheitsgrade betrachtet werden, da nach der Positionierung des Systems in der Adaptionposition die Freiheitsgrade des Systems geöffnet werden. Daher erfolgt eine Positions- und Ausrichtungsänderung zum bereits bestimmten TCP\_kin-Koordinatensystem. Diese Änderung wird mit dem TCP\_open-Koordinatensystem wiedergegeben. Dabei befindet sich auch hier der Ursprung des Koordinatensystems im Mittelpunkt der Adaptionfläche des Adaptionkopfs. Zur Bestimmung des Koordinatensystems werden die statisch eingemessenen Messebenen des Adaptionkopfs in Relation zu der aktuell vorliegenden Messebene betrachtet. Dieses Vorgehen wird in Kapitel 5.2.3 detailliert beschrieben.

- **TCP\_master** links / rechts

Das TCP\_master-Koordinatensystem gibt das jeweilige aktuelle Radkoordinatensystem wieder. Bei diesem Koordinatensystem hat eine Ursprungs- und Ausrichtungsänderung zu der bereits erfolgten kinematischen Bestimmung stattgefunden. Das erfolgt durch die Kalibrierung des Systems an der Kalibrierlehre. Auch dieses Koordinatensystem befindet sich unverändert am Adaptionkopf der jeweiligen Radadaptionseinheit. Dadurch entspricht das zuletzt bestimmte TCP\_master-Koordinatensystem dem Radkoordinatensystem, das den Ursprung im Mittelpunkt der entsprechenden Radnabe hat. Des Weiteren entspricht die XZ-Ebene der Radebene, die die benötigten Spur- und Sturzinformationen enthält. Um das TCP\_master-Koordinatensystem zu bestimmen, wird anhand der Kalibrierung des Systems mit der Kalibrierlehre eine statische Transformation für jede Radadaptionseinheit bestimmt. Diese finale Transformation wird im Anschluss an jede Bestimmung der kinematischen und freiheitsbedingten Änderung dazugerechnet. Dadurch werden unter anderem abnutzungsbedingte Positions- und Ausrichtungsänderungen einbezogen. Das Vorgehen zur Bestimmung der Transformation für das TCP\_master-Koordinatensystem wird in Kapitel 5.3.2 im Detail beschrieben.

Abbildung 5.5 zeigt die Zusammenhänge der primären Koordinatensysteme, die für jede Messung an einem Fahrzeug bestimmt werden müssen. Die Darstellung bezieht sich dabei auf ein System für eine Hinterachsvermessung. Über die einzelnen Koordinatensysteme kann das TCP\_master-Koordinatensystem der linken und rechten Adaptionseinheit in der Basis ermittelt

werden. Dadurch kann ein gemeinsamer Bezug hergestellt und so eine Auswertung der relativen Bezüge untereinander durchgeführt werden.



**Abbildung 5.5: Zusammenhänge der primären Koordinatensysteme des Systems**

Wie die Übersicht der primären Koordinatensysteme zeigt, kann zwischen den einzelnen Systemen jeweils eine Vorwärts- und / oder eine Rückwärtstransformation erstellt werden. Dadurch können die Messungen eines jeden Koordinatensystems in der Basis zusammengeführt werden. Darüber hinaus können die Messdaten in die Fahrzeughinterachse transformiert werden, um sie auf die Fahrzeugsymmetrie beziehen zu können. Die Transformationen die dynamisch erstellt werden, werden dabei je Messzyklus aktualisiert. Durch die Transformation zur Targeteinheit können Richtungsvektoren übermittelt werden, um dadurch eine Einstellung der Drehplatte vornehmen zu können. Auch die exakt vermessenen Punkte der Kalibrierlehre können für eine Kalibrierung des Systems durch die bekannte Transformationsabfolge im TPC\_master-Koordinatensystem dargestellt werden. Die folgenden Kapitel zeigen dieses Vorgehen und die Notwendigkeit der Zusammenhänge detailliert auf.

## 5.2 Mathematische Transformationsabfolge des Messsystems

In diesem Unterkapitel wird die mathematische Transformationsabfolge im Detail beschrieben, die im vorherigen Kapitel bereits als Übersicht aufgezeigt wurde. Dabei wird zu Beginn das primär genutzte Grundverfahren für die Rotationsbestimmungen der Koordinatensysteme beschrieben. Im Anschluss daran werden der gesamte Transformationsbaum sowie die notwendigen Einmessungen des Systems für eine Erstinbetriebnahme dargestellt. Abschließend werden die Ermittlungen der primären Teiltransformationen der Radadaptationseinheiten wiedergegeben.

### 5.2.1 Verfahren zur Rotationsermittlung

Zur nachfolgenden Bestimmung der verschiedenen Transformationen müssen einzelne Transformationsmatrizen erstellt werden. Abbildung 5.6 zeigt den Aufbau einer Transformationsmatrix. Die 4x4 Matrix besteht aus einer 3x3 Rotationsmatrix und der Translation, die den Vektor für die Ursprungsverschiebung des Koordinatensystems beinhaltet. Um die Matrix homogen zu halten, wird diese mit Nullen und einer Eins aufgefüllt, wie die Abbildung zeigt.

$$\text{Transformationsmatrix: } {}^{n-1}\mathbf{T}_n = \begin{array}{ccc|c} \text{Rotation} & & \text{Translation} & \\ {}^{n-1}\mathbf{R}_n & & {}^{n-1}\mathbf{P}_n & \\ \hline \begin{pmatrix} r_{x,x} & r_{x,y} & r_{x,z} \\ r_{y,x} & r_{y,y} & r_{y,z} \\ r_{z,x} & r_{z,y} & r_{z,z} \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

**Abbildung 5.6: Aufbau einer Transformationsmatrix [WAL16]**

Neben dem neuen Ursprungspunkt, der durch die Translation bestimmt wird, ist die Rotation, die die Orientierung des Koordinatensystems wiedergibt, ein wichtiger Faktor. Diese wird mit der 3x3 Rotationsmatrix beschrieben. Physikalisch gesehen kann eine Rotation als Umorientierung eines Körpers im Raum ohne Änderung seiner Form und Größe interpretiert werden [BRA02]. Das bedeutet, dass eine Rotationsmatrize einen Vektor rotieren kann, indem dieser mit der Matrize multipliziert wird, wobei die Länge des Vektors erhalten bleibt.

Eine beliebige Orientierung im Raum kann durch drei aufeinanderfolgende Rotationen um die Koordinate eines festen oder eines bewegten Koordinatensystems beschrieben werden. Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die Orientierung eines starren Körpers im Raum darzustellen. [MÜL18] Abbildung 5.7 zeigt die in dieser Arbeit benutzte Konvention. Jede der drei Drehungen unter der Angabe der Orientierung X-Y-Z erfolgt dabei um eine Achse in einem festen Bezugskordinatensystem. Dabei handelt es sich um ein nicht bewegtes Koordinatensystem. Diese Konvention wird als eine Roll-, Nick- und Gierwinkel-Drehung bezeichnet. [CRA05]

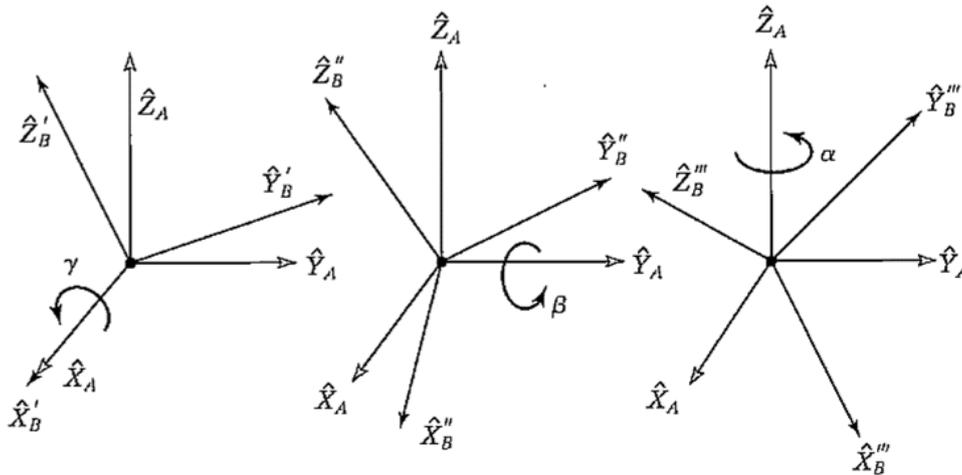


Abbildung 5.7: Roll  $R_X(\gamma)$ , Pitch  $R_Y(\beta)$ , Yaw  $R_Z(\alpha)$  Drehwinkel [CRA05, S. 41f.]

Die folgende Formel zeigt die Ableitung der äquivalenten Rotationsmatrix  ${}^B R_A$ , für alle Drehungen um die Achsen des festen Bezugskordinatensystems. Dabei ist es wichtig die definierte Reihenfolge für die Drehungen einzuhalten. Die drei Rotationsmatrizen für die drei Einzeldrehungen  $R_Z(\alpha)$   $R_Y(\beta)$   $R_X(\gamma)$  ergeben durch Multiplikation eine gesamte Rotationsmatrix  ${}^B R_A$ . Diese beschreibt dabei die komplette Umorientierung eines Körpers im Raum von einer Ausgangsorientierung A zu einer neuen Orientierung B. [CRA05]

$$\mathbf{R}_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \mathbf{R}_Z(\alpha) \mathbf{R}_Y(\beta) \mathbf{R}_X(\gamma) \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cdot \cos \gamma & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta & \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \cdot \sin \gamma & \cos \beta \cdot \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$\mathbf{R}_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha)$  : Gesamtrrotationsmatrix 3x3 aller drei Drehachsen

$\mathbf{R}_X(\gamma)$  : Rotationsmatrix 3x3 des Winkels  $\gamma$  um die X-Achse

$\mathbf{R}_Y(\beta)$  : Rotationsmatrix 3x3 des Winkels  $\beta$  um die Y-Achse

$\mathbf{R}_Z(\alpha)$  : Rotationsmatrix 3x3 des Winkels  $\alpha$  um die Z-Achse

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird es notwendig, die Rotationsmatrix anhand der Umorientierung eines Vektors bestimmen zu müssen. Zu diesem Zweck wird die Euler-Rodrigues-Formel angewandt. Die Formel wurde erstmals 1775 veröffentlicht und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Im 21. Jahrhundert zog sie ein immer breiteres Interesse auf sich. Heute wurde Ihre Verwendung und der mit Euler-Rodrigues-Parametern formulierten Einheitsquaternionen auf ein breites Spektrum von Forschungsthemen ausgeweitet. Darunter fallen unter

anderem die Vektorparametrisierung von Rotationen sowie die Orientierungs- und Lagebestimmung, die in dieser Arbeit Anwendung finden. Die folgende Formel gibt die angewandten Rodrigues Formelarten, wie sie in dieser Arbeit angewandt werden, in Ihrer Grund- und Matrixform wieder. [DAI15]

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + (\sin \alpha) \mathbf{K}_w + (1 - \cos \alpha) \mathbf{K}_w^2 \quad (6)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} w_x^2 + (1-w_x^2) \cos \alpha & w_x w_y (1-\cos \alpha) - w_z \sin \alpha & w_x w_z (1-\cos \alpha) + w_y \sin \alpha \\ w_x w_y (1-\cos \alpha) + w_z \sin \alpha & w_y^2 + (1-w_y^2) \cos \alpha & w_y w_z (1-\cos \alpha) - w_x \sin \alpha \\ w_x w_z (1-\cos \alpha) - w_y \sin \alpha & w_y w_z (1-\cos \alpha) + w_x \sin \alpha & w_z^2 + (1-w_z^2) \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$\mathbf{R}$  : Gesamtrrotationsmatrix 3x3 für die Drehung des Ist- auf den Sollvektor

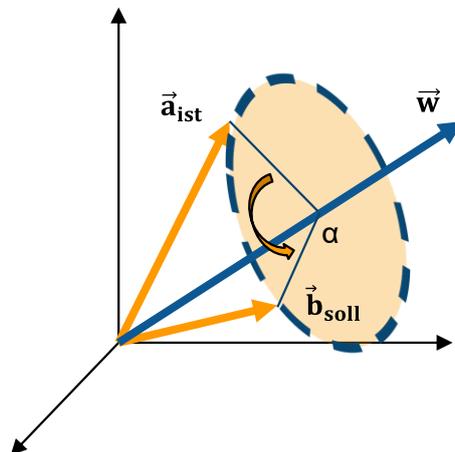
$\mathbf{I}$  : Einheitsmatrix 3x3

$\mathbf{K}_w$  : Schiefsymmetrische Matrix 3x3 des Kreuzprodukts von Ist- und Sollvektor

$w_{x,y,z}$  : Kreuzproduktanteile von Ist- und Sollvektor

$\alpha$  : Drehwinkel zwischen Ist- und Sollvektor

Um die Rotationsmatrix eines Ausgangsvektors zu einem neuen Vektor zu bestimmen, wird nach Formel 6 unter anderem die schiefsymmetrische Matrix des Kreuzprodukts von Soll- und Istvektor gebildet. Des Weiteren wird der Winkel  $\alpha$  aus den Vektoren benötigt. Der Satz von Euler-Rodrigues besagt, dass die allgemeine Verschiebung eines starren Körpers mit einem festen Punkt eine Drehung um eine Achse ist, die durch diesen festen Punkt verläuft. [BRA02]



**Abbildung 5.8: Drehung eines Vektors nach der Rodrigues-Formel [BRA02, S. 20]**

Abbildung 5.8 zeigt wie der Vektor  $\vec{a}$  zu einem neuen gedrehten Vektor  $\vec{b}$  transformiert wird. Dabei zeigt der Vektor  $\vec{a}$  von einem festen Ursprung auf einen beliebigen Punkt des starren Körpers. Vektor  $\vec{b}$  zeigt von dem gleichen Ursprung auf den gleichen Punkt des starren Körpers, der jedoch aufgrund der Umorientierung des Körpers eine Positionsänderung erfahren

hat. Dabei bildet das Kreuzprodukt  $\vec{w}$  der beiden Vektoren die Einheitsachse für die Rotationsoperation. Durch den sich dabei bildenden Winkel  $\alpha$  kann der Istvektor auf den Sollvektor rotiert und die Rotationsmatrix für diese Operation bestimmt werden. Das Vorgehen dazu wird nachfolgend anhand der Formeln für zwei vorgegebene Vektoren dargestellt. Dieses mathematische Vorgehen wird auch im späteren Verlauf dieser Arbeit verwendet, um aus zwei Vektoren eine 3x3 Rotationsmatrix zu bestimmen.

In Formel 7 werden die Vektoren des gemeinsamen Ursprungs definiert und dabei die Vektoren auf eine Einheitslänge gebracht. Damit bilden die Vektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  parallel zum Istvektor  $\vec{a}$  und zum Sollvektor  $\vec{b}$  die entsprechenden Einheitsvektoren.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\vec{u} = \frac{\vec{a}}{|\vec{a}|} \quad \vec{v} = \frac{\vec{b}}{|\vec{b}|}$$

- $\vec{a}$  : Istvektor
- $\vec{b}$  : Sollvektor
- $\vec{u}$  : Einheitsvektor des Istvektors
- $\vec{v}$  : Einheitsvektor des Sollvektors

Anschließend wird mit Formel 8 das Kreuzprodukt  $\vec{w}$  der zuvor bestimmten Einheitsvektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  gebildet.

$$\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v} \quad (8)$$

- $\vec{w}$  : Kreuzprodukt Einheitsvektor von Ist- und Sollvektor
- $\vec{u}$  : Einheitsvektor des Istvektors
- $\vec{v}$  : Einheitsvektor des Sollvektors

Neben der Bestimmung des Kreuzprodukts müssen die jeweiligen Cosinus- und Sinus-Anteile des Winkels  $\alpha$  berechnet werden. Dabei berechnet sich der Winkel  $\cos \alpha$  aus dem Skalarprodukt der beiden Einheitsvektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$ . Das ist in Formel 9 dargestellt.

$$\cos \alpha = \vec{u} \cdot \vec{v} \quad (9)$$

- $\cos \alpha$  : Kosinus des Drehwinkels zwischen Ist- und Sollvektor

Der Sinus Anteil berechnet sich nach Formel 10. Dabei entspricht der Winkel  $\sin \alpha$  der Länge des Einheitsvektors  $|\vec{w}|$  des zuvor bestimmten Kreuzprodukts.

$$\sin \alpha = |\vec{w}| \quad (10)$$

$\sin \alpha$  : Sinus des Drehwinkels zwischen Ist- und Sollvektor

$|\vec{w}|$  : Länge des Einheitsvektors des Kreuzprodukts von Ist- und Sollvektor

Weiterhin kann mit dem bereits berechneten Kreuzprodukt  $\vec{w}$ , die nachfolgend benötigte schiefssymmetrische Matrix  $\mathbf{K}_w$  aufgestellt werden. Dazu werden, wie die Formel 11 zeigt, die jeweiligen X-, Y-, Z-Anteile des Vektors  $\vec{w}$  eingesetzt.

$$\mathbf{K}_w = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\mathbf{K}_w$  : Schiefssymmetrische Matrix 3x3 des Kreuzprodukts von Ist- und Sollvektor

$w_{x, y, z}$  : Kreuzproduktanteile von Ist- und Sollvektor

Die gesamten berechneten Formelanteile aus 7, 8, 9, 10 und 11 können nach ihrer Bestimmung in die Euler-Rodrigues-Formel 6 eingesetzt werden. Formel 12 zeigt die Ausgangsformel mit den eingesetzten Formelanteilen. Nach dem Einsetzen erhält man die 3x3 Rotationsmatrix  ${}^b \mathbf{R}_{\vec{a}}$  für das Rotieren des Ausgangsvektors  $\vec{a}$  auf den neuen Vektor  $\vec{b}$ .

$${}^b \mathbf{R}_{\vec{a}} = \mathbf{I} + (\sin \alpha) \mathbf{K}_w + (1 - \cos \alpha) \mathbf{K}_w^2 \quad (12)$$

$${}^b \mathbf{R}_{\vec{a}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + |\vec{w}| \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} + (1 - \vec{u} \cdot \vec{v}) \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix}^2$$

${}^b \mathbf{R}_{\vec{a}}$  : Gesamtrrotationsmatrix 3x3 für die Drehung des Ist- auf den Sollvektor

$\mathbf{I}$  : Einheitsmatrix 3x3

$\mathbf{K}_w$  : Schiefssymmetrische Matrix 3x3 des Kreuzprodukts von Ist- und Sollvektor

$w_{x, y, z}$  : Kreuzproduktanteile von Ist- und Sollvektor

$\vec{w}$  : Kreuzprodukt Einheitsvektor von Ist- und Sollvektor

$\vec{u}$  : Einheitsvektor des Istvektors

$\vec{v}$  : Einheitsvektor des Sollvektors

$\alpha$  : Drehwinkel zwischen Ist- und Sollvektor

Das mathematische Verfahren soll in dieser Arbeit genutzt werden, um eine Transformation von einem Ausgangskordinatensystem in ein neues Koordinatensystem zu erstellen. Aus

dem Ursprung des Ausgangskordinatensystems entspringen dabei der Ist- und Sollvektor, die auf den gleichen Punkt eines Objekts gerichtet sind. Der neue Ursprung des neuen Koordinatensystems soll in dem Endpunkt des Sollvektors liegen. Damit entspricht der Sollvektor dem translatorischen Anteil der Transformationsmatrix aus Abbildung 5.6. Durch diese Verschiebung des Koordinatensystems hat sich seine Orientierung jedoch noch nicht geändert. Da sich die Orientierung des Koordinatensystems der Drehung des Ist- zu Sollvektors anpassen soll, wird, wie zuvor beschrieben, mit der Euler-Rodrigues-Formel die Rotationsmatrix der beiden Vektoren bestimmt. Diese Rotationsmatrix entspricht dem rotatorischen Anteil der Transformationsmatrix. Die Umorientierung des Koordinatensystems stimmt daher mit der des Objekts zwischen Ist- und Sollvektor überein.

Damit wurde die 4x4 Transformationsmatrix vollständig gebildet. Diese kann im späteren Verlauf mit einem Punkt oder einer weiteren Transformationsmatrix multipliziert werden. Die Anwendungen für dieses beschriebene mathematische Verfahren werden in den folgenden Kapiteln zur Bestimmung der Transformationsabfolge noch dargestellt.

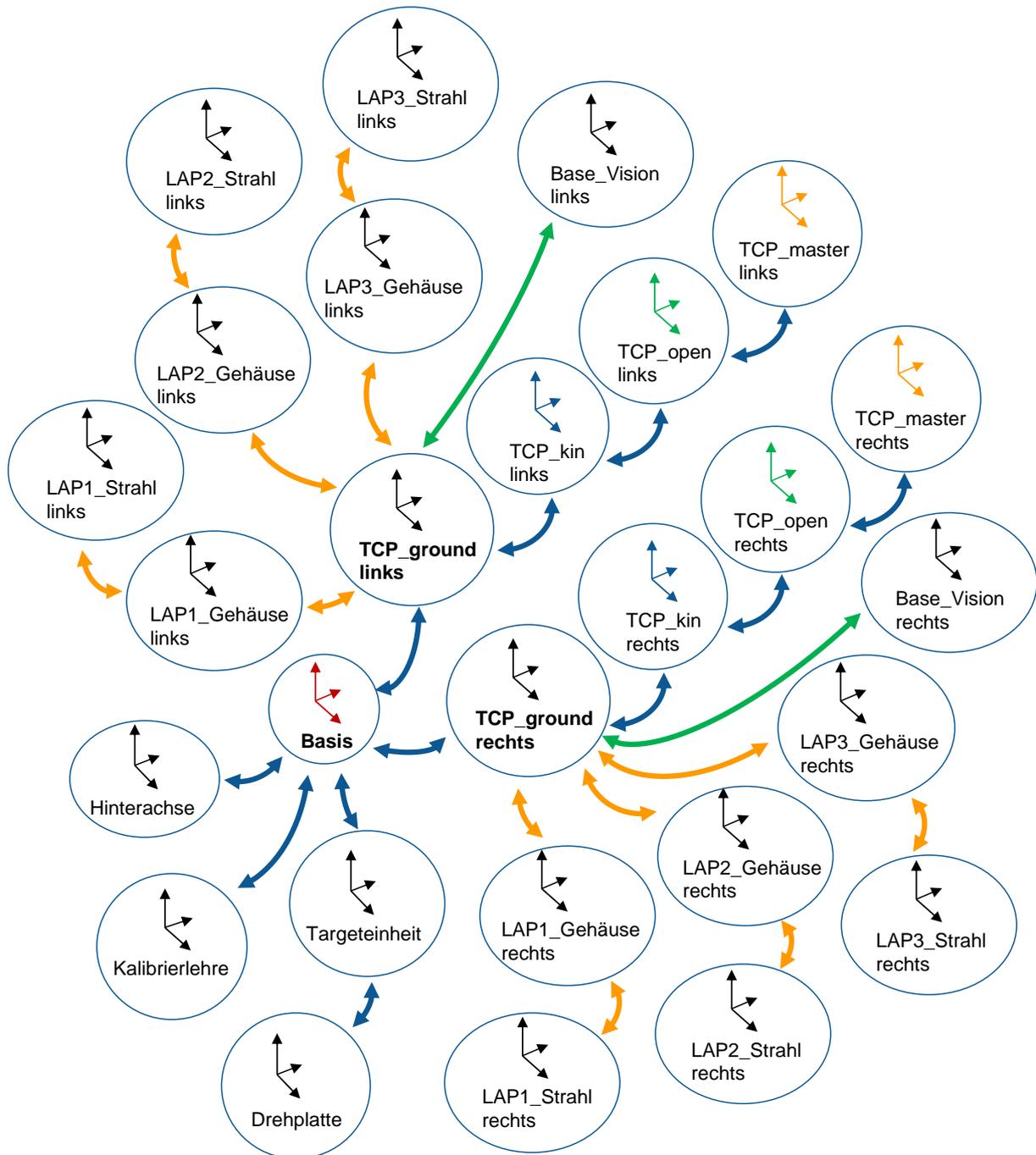
## 5.2.2 Transformations-Zusammenhänge der Anlagenkoordinatensysteme

Neben der Übersicht der primären Koordinatensysteme des Radadaptionssystems, die in Kapitel 5.1.2 vorgestellt wurde, gibt es weitere benötigte Koordinatensysteme und Bezüge. Abbildung 5.9 zeigt alle Koordinatensysteme des Radadaptionssystems und den damit verbundenen Systemen. Mit Hilfe des Transformationsbaums können die Zusammenhänge dargestellt und die Transformationsabfolge bestimmt werden. Im Transformationsbaum sind die für den Messprozess primären Transformationen durch blaue Pfeile dargestellt. Statische Transformationen, deren Bezüge sich nicht ändern und die für eine Initialisierung des Systems benötigt werden, sind orange eingefärbt. Die grünen Pfeile geben die Transformationen des Bildverarbeitungssystems wieder. Formel 13 gibt die Transformationsabfolge zur Bestimmung der Messpunkte  ${}^{\text{Basis}}\mathbf{P}$  der jeweiligen Radebene auf der linken und rechten Seite in der Basis wieder.

$${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}} = {}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_ground}} \cdot {}^{\text{TCP\_ground}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_kin}} \cdot {}^{\text{TCP\_kin}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}} \cdot {}^{\text{TCP\_open}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}} \quad (13)$$

$${}^{\text{Basis}}\mathbf{P} = {}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}} \cdot {}^{\text{TCP\_master}}\mathbf{P}$$

${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}}$	: Transformationsmatrix TCP_master zur Basis
${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_ground}}$	: Transformationsmatrix TCP_ground zur Basis
${}^{\text{TCP\_ground}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_kin}}$	: Transformationsmatrix TCP_kin zum TCP_ground
${}^{\text{TCP\_kin}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$	: Transformationsmatrix TCP_open zum TCP_kin
${}^{\text{TCP\_open}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}}$	: Transformationsmatrix TCP_master zum TCP_open
${}^{\text{Basis}}\mathbf{P}$	: Punkt im Basis-Koordinatensystem
${}^{\text{TCP\_master}}\mathbf{P}$	: Punkt im TCP_master-Koordinatensystem

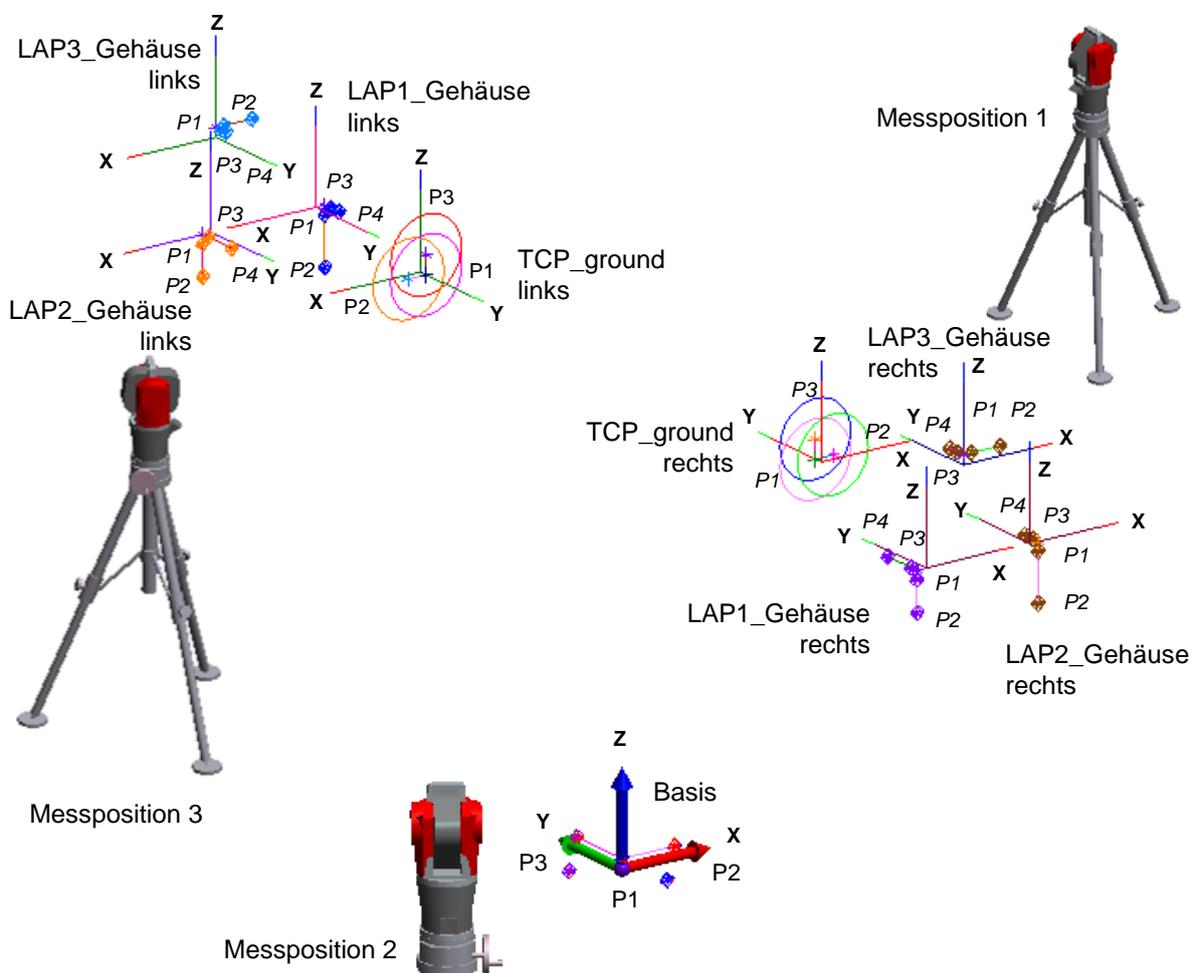


**Abbildung 5.9: Gesamter Transformations-Baum für das Radadaptationssystem**

Nach Bestimmung der Messpunkte im jeweiligen TCP\_master-Koordinatensystem können anhand der entsprechenden Gesamttransformation  ${}^{\text{Basis}}T_{\text{TCP\_master}}$  die Punkte jeder Radadaptationseinheit in der Basis ermittelt werden. Ausgehend von der Basis können die Messdaten weiter benutzt werden. Das wird in Bezug auf die Kalibrierlehre und Targeteinheit im späteren Verlauf der Arbeit noch aufgezeigt. Des Weiteren kann ein Koordinatensystem an der Fahrzeughinterachse bestimmt werden. Das ist unter anderem notwendig, um die Hinterachssymmetrie und dadurch die Einzelspuren bestimmen zu können. Die Erstellung dieser primären sich dynamisch ändernden Transformationsmatrizen wird im nächsten Kapitel beschrieben. Neben den primären sind auch statische Transformationen notwendig. Diese sind, wie im

Transformationsbaum zu erkennen ist, für die verbauten Triangulationssensoren der Firma LAP notwendig. Durch die werden die benötigten Ebenen bestimmt, die für die Erstellung der primären Koordinatensystemtransformationen benötigt werden.

Um die Transformationen der Triangulationssensoren bestimmen zu können, war es notwendig, den Systemaufbau zu betrachten. Zur Befestigung wurden die Sensoren jeweils auf eine Trägerplatte montiert. Mittels eines Lasertrackers kann die Trägerplatte angemessen und daran das Koordinatensystem LAP\_Gehäuse bestimmt werden. Das kann für jeden Sensor auf der linken und rechten Seite erfasst werden. Durch paralleles Einmessen des TCP\_ground-Koordinatensystems am Adaptionkopf kann die statische Transformation  $T_{TCP\_ground}^{LAP\_Gehäuse}$  berechnet werden. Für diese Einmessung ist der Adaptionkopf mit der Absteckvorrichtung blockiert, um eine eindeutige Zuordnung in der Grundstellung sicherstellen zu können.



**Abbildung 5.10: Stationäre Einmessungen der Messtechnik zu den Anlagenkoordinatensystemen**

Abbildung 5.10 zeigt die Einmessung der Koordinatensysteme zur Bestimmung der statischen Transformationen des Systems. Wie die Abbildung zeigt, werden für die Konstruktion der Sensorgehäusekoordinatensysteme an der Trägerplatte jeweils vier Punkte angemessen. Diese

Punkte können reproduzierbar mit einem Kantentarget erfasst werden. Dabei bilden P1 / P2 und P3 / P4 jeweils eine Linie. Die Linien geben die jeweilige Achsrichtung wieder, durch die zwei Achsrichtungen definiert sind. Die dritte kann berechnet werden, da es sich um orthogonale Koordinatensysteme handelt. Den Ursprung des entsprechenden Koordinatensystems bildet der Schnittpunkt der beiden konstruierten Linien. Damit sind alle Informationen für die Ermittlung der Koordinatensysteme und der Transformationsmatrizen gegeben.

Um die auf den Sensor bezogene finale Transformation zu erhalten, muss die Trägerplatte zum Sensormessstrahl in einem Laboraufbau vermessen werden. Das muss für alle sechs Sensoren erfolgen, um so für jeden einzelnen die Transformation  ${}^{LAP\_Gehäuse} T_{LAP\_Strahl}$  zu erstellen. Dazu wird der fertig montierte Sensor auf einem Stativ ortsfest montiert und ein Messobjekt vor den Sensorstrahl gebracht. Mit dem Lasertracker wird, wie zuvor beschreiben, das Koordinatensystem LAP\_Gehäuse eingemessen. Im Anschluss daran wird mit dem Lasertracker das Sensormodul gemessen und ein Koordinatensystem erstellt. Ausgehend von diesem Ursprung sind die geometrischen Daten des Sensors bekannt, um das ermittelte Koordinatensystem in den Laserstrahl des Sensors zu verschieben. Das geschieht durch eine reine translatorische Änderung des Ursprungs.

Da der Erkennungsbereich des Triangulationssensors erst in einem definierten Abstand hinter dem Sensormodul beginnt, muss auch dieser mit berücksichtigt werden. Der Bereich bis zum Aufnahmepunkt des jeweiligen Sensors wird ermittelt, indem das Messobjekt so positioniert wird, dass der Sensor exakt den digitalen Messwert Null ausgibt. Durch die bekannte Distanz zwischen Messobjekt und Sensormodulkoordinatensystem kann das Koordinatensystem um eine weitere translatorische Verschiebung, um den ermittelten Abstand des Erkennungsbereichs, korrigiert werden. Somit liegt das Koordinatensystem LAP\_Strahl bei jedem Sensor direkt am Anfang seines Messbereichs bei null Millimetern erfasstem Distanzwert. Aus den gewonnenen Daten kann die Transformation  ${}^{LAP\_Gehäuse} T_{LAP\_Strahl}$  für jeden Sensor erstellt werden. Zusammen mit der Transformation  ${}^{TCP\_ground} T_{LAP\_Gehäuse}$  kann die Transformationsabfolge nach Formel 14 erstellt werden. Damit kann, nach dem Einsetzen des jeweiligen Sensordistanzmesswerts als Y-Wert des Punkts  ${}^{LAP\_Strahl} P$ , der Punkt  ${}^{TCP\_ground} P$  am Adaptionkopf ermittelt werden. Das ist möglich, da der Distanzmesswert jedes Triangulationssensors dem Y-Anteil, ausgehend vom Ursprung am Messbereichsbeginn des Sensors, entspricht.

$${}^{LAP\_Strahl} P = \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Distanzmesswert} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$${}^{TCP\_ground} P = {}^{TCP\_ground} T_{LAP\_Gehäuse} \cdot {}^{LAP\_Gehäuse} T_{LAP\_Strahl} \cdot {}^{LAP\_Strahl} P$$

${}^{TCP\_ground} T_{LAP\_Gehäuse}$  : Transformationsmatrix LAP\_Gehäuse zum TCP\_ground

${}^{LAP\_Gehäuse} T_{LAP\_Strahl}$  : Transformationsmatrix LAP\_Strahl zum LAP\_Gehäuse

${}^{TCP\_ground} P$  : Messpunkt im TCP\_ground-Koordinatensystem

${}^{LAP\_Strahl} P$  : Messpunkt im LAP\_Strahl-Koordinatensystem

Die dargestellte Transformationsabfolge in Formel 14 ist dabei nicht abhängig von der Änderung der Adaptionsskopfposition, weil der Adaptionsskopf mechanisch fest mit den Triangulationssensoren gekoppelt ist. Das gilt, solange die Absteckvorrichtung die Freiheitsgrade des Adaptionsskopfs in einer Grundstellung fixiert. Aus diesem Grund hat die Abfolge auch noch ihre Wirksamkeit wenn sich der Adaptionsskopf bewegt, da sich die Sensoren im gleichen Zuge mitbewegen.

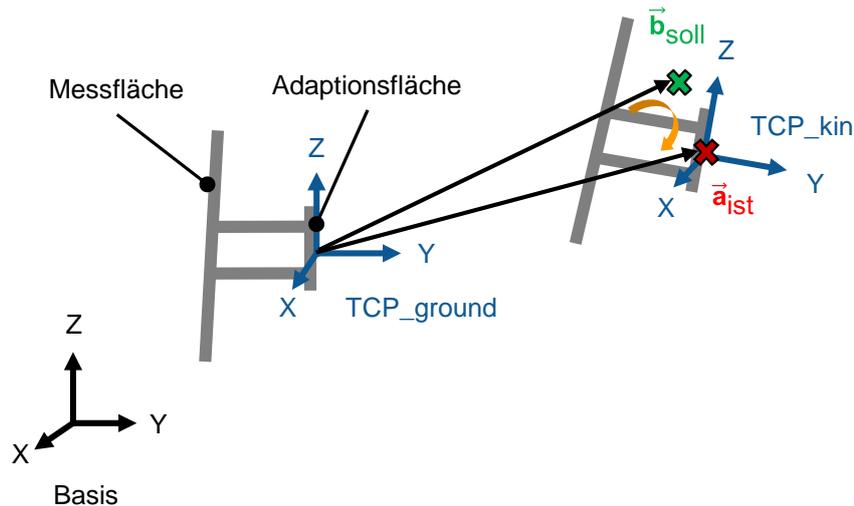
Aufgrund dessen, dass sich die Messpunkte durch die Sensoren auf den fixierten Zustand des Adaptionsskopfs beziehen, können alle weiteren Messpunkte in einen relativen Bezug dazu gesetzt werden. Daher werden neben der Einmessung der Sensorkoordinatensysteme auch die Sensordistanz-Informationen in der fixierten Grundstellung ausgelesen. Nach der Transformation der drei Punkte je Radadaptionseinheit mit Formel 14 ergeben sich drei Ebenenpunkte, die sich auf das TCP\_ground-Koordinatensystem beziehen. Durch die Bildung einer Ebene und dem damit verbundenen Normalenvektor, der sich auf das TCP\_ground-Koordinatensystem bezieht, kann ein Referenzbezug gebildet werden. Diese Referenz in Form des Normalenvektors wird bei der Einmessung jeder Radadaptionseinheit ermittelt. Im späteren Messprozess wird im nicht fixierten Adaptionsskopfzustand eine neue Ebene durch die Sensoren gebildet. Der daraus berechnete Normalenvektor wird im Verhältnis zum Referenz-Normalenvektor betrachtet. Durch diese Basis wird die spätere Koordinatensystem- und Transformationsbestimmung durchgeführt. Die Berechnung dieser Einzelschritte wird im folgenden Kapitel im Detail dargestellt.

### 5.2.3 Bestimmung einzelner Transformationen im System für eine Messung am Fahrzeug

Wie bereits vorgestellt, basieren einige Transformationen auf statischen Einmessungen, andere werden dynamisch bestimmt. Um die Transformationen aus Formel 13 zu bestimmen sind mehrere Teilschritte notwendig, die nachstehend aufgezeigt werden. Dabei werden die Erstellungen der Transformationsmatrix TCP\_ground zu TCP\_kin und TCP\_kin zu TCP\_open betrachtet. Basis zu TCP\_ground ist eine statische Transformation, deren Bildung bereits erklärt wurde. Die Berechnung der finalen Transformationsmatrix TCP\_open zu TCP\_master wird im folgenden Kapitel zur Kalibrierung des Systems erläutert.

Um die Transformationsmatrix  ${}^{\text{TCP\_ground}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_kin}}$  bestimmen zu können, wird ausgehend vom Ursprung des TCP\_ground-Koordinatensystems ein Vektor  $\vec{\mathbf{a}}_{\text{ist}}$  bestimmt. Dieser ergibt sich aus den X-, Y- und Z-Achspositionen der Kinematik der Radadaptionseinheit. Durch das vorgestellte Verfahren in Kapitel 5.1.1 wird mit diesem Vektor ein neuer Vektor  $\vec{\mathbf{b}}_{\text{soll}}$  anhand der Verhaltensfunktionen für die reale Durchbiegung und Position des Systems berechnet. Abbildung 5.11 zeigt die beiden Vektoren innerhalb des TCP\_ground-Koordinatensystems auf der linken Seite. Der translatorische Anteil der Transformationsmatrix entspricht dabei dem Soll-

vektor, in dessen Endpunkt der Ursprung des TCP\_ground-Koordinatensystems gelegt werden soll. Um die neue Orientierung für das TCP\_kin-Koordinatensystem zu ermitteln, muss die Rotationsmatrix bestimmt werden. Diese Berechnung erfolgt mit Hilfe der im Kapitel 5.2.1 vorgestellten Euler-Rodrigues-Formel. Mit ihr wird der Istvektor auf den Sollvektor rotiert. Als Ergebnis erhält man die 3x3 Rotationsmatrix, die in die 4x4 Transformationsmatrix eingesetzt wird und diese damit vervollständigt. Die Transformation  ${}^{\text{TCP\_ground}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_kin}}$  wird für jede neu angefahrne kinematische Adaptionseinsparung der Radadaptionseinheit ermittelt.



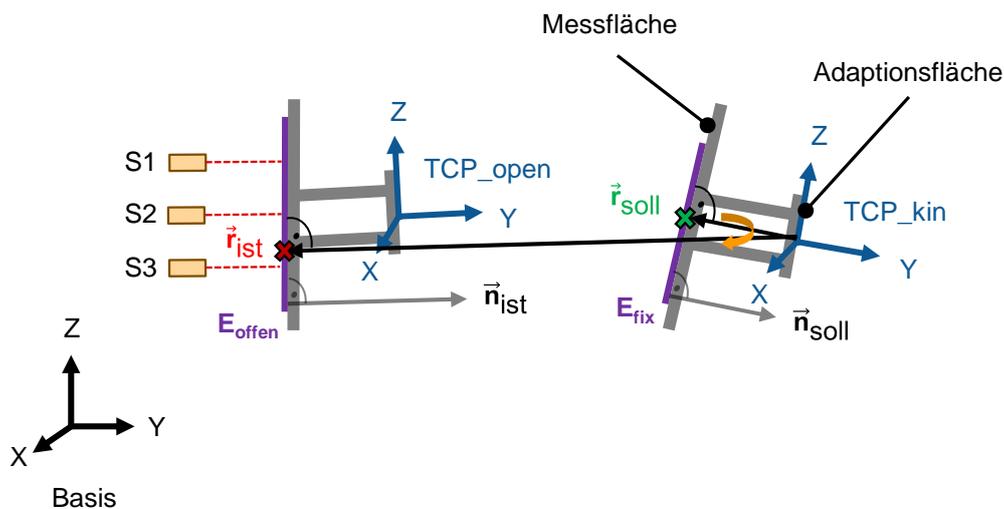
**Abbildung 5.11: Transformationsbestimmung zwischen TCP\_ground und TCP\_kin**

Nachdem das TCP\_kin-Koordinatensystem bestimmt worden ist, muss die Transformation  ${}^{\text{TCP\_kin}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$  berechnet werden. Diese Transformation hat die Besonderheit, dass sie zyklisch berechnet werden muss. Das liegt daran, dass die Schwimmebene geöffnet ist und so permanente Verschiebungs- und Orientierungsänderungen des Koordinatensystems entstehen können. Diese Änderungen werden durch die Punktriangulationssensoren in Form von Messpunkten an der Messfläche des Adaptionkopfs erfasst. Nach Erfassung der Distanzen der drei Sensoren auf die Messfläche werden diese Informationen in die Formel 14 eingesetzt. Daraufhin können drei Punkte im TCP\_ground-Koordinatensystem bestimmt werden. Mit den drei Punkten, die die Messebene bilden, kann der Normalenvektor  $\vec{n}$  der Ebene mit Formel 15 berechnet werden.

$$\vec{n} = \overrightarrow{P_1 P_2} \times \overrightarrow{P_1 P_3} = (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \times (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) \quad (15)$$

- $\vec{n}$  : Normalenvektor der Ebene
- $P_1, P_2, P_3$  : Punkte P1, P2 und P3 der Ebene
- $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3$  : Ortsvektoren der Punkte P1, P2 und P3

Abbildung 5.12 zeigt den Normalenvektor  $\vec{n}_{\text{ist}}$  der Ebene  $E_{\text{offen}}$ , der sich aufgrund der aktuellen Messflächenorientierung und -position eingestellt hat. Wie im vorherigen Kapitel bereits beschrieben, wird bei der Einmessung des Systems in der fixierten Grundstellung eine Referenzebene  $E_{\text{fix}}$  ermittelt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, kann mit der Formel 15 der Normalenvektor  $\vec{n}_{\text{soll}}$  berechnet werden, der die relative Referenz zum Vektor  $\vec{n}_{\text{ist}}$  bildet. Die Differenz zwischen den beiden Vektoren kommt aufgrund der Umorientierung des Adaptionkopfs durch die geöffneten Freiheitsgrade zustande. Damit der gleiche Referenzbezug gegeben ist, wird  $\vec{n}_{\text{soll}}$  und  $\vec{n}_{\text{ist}}$  immer im TCP\_ground-Koordinatensystem bestimmt, da lediglich die Orientierungsänderung zur Grundstellung erfasst werden kann.



**Abbildung 5.12: Transformationsbestimmung zwischen TCP\_kin und TCP\_open**

Die Normalenvektoren entstehen unter einem rechten Winkel der Ebenen, wie in der Abbildung 5.12 zu sehen ist. Wo diese jedoch auf der Ebene entstehen, ist über den Aufpunkt und dessen Ortsvektor definiert. Mit diesen Angaben könnte eine Orientierung der beiden Vektoren zueinander bestimmt werden. Da auch die Vektorlänge betrachtet werden soll, ist es notwendig, neue Vektoren zu bilden, die einen gemeinsamen Ursprung haben und auf die entsprechenden Ebenen zeigen. Dazu werden Geraden gebildet, die parallel zu den entsprechenden Normalenvektoren liegen und einen gemeinsamen Ursprung im TCP\_kin-Koordinatensystem haben. Mit Formel 16 wird der Ortsvektor  $\vec{r}$  des Durchstoßpunkts der jeweiligen Geraden mit der entsprechenden Ebene berechnet.

Die Berechnung wird für beide Normalenvektoren von  $E_{\text{offen}}$  und der Referenz  $E_{\text{fix}}$  durchgeführt. In Formel 16 entspricht der Richtungsvektor der Geraden  $\vec{a}$  ebenfalls dem Normalenvektor  $\vec{n}$ , da sie identisch zueinander liegen sollen. Der Ortsvektor  $\vec{r}_0$  zeigt in den Aufpunkt P1 der Ebene aus dem der Normalenvektor entspringt. Dieser Ortsvektor entspricht  $\vec{r}_1$  aus Formel 15. Der Ortsvektor  $\vec{r}_1$  des Aufpunkts der Geraden aus Formel 16 wird mit  $\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  angegeben, da der

berechnete Ortsvektor  $\vec{r}$  des Durchstoßpunkts der Ebene im Ursprung des TCP\_kin-Koordinatensystems beginnen soll. Nach der Berechnung erhält man, wie in Abbildung 5.12 dargestellt, den Vektor  $\vec{r}_{\text{ist}}$  zu der aktuellen Ebene und den Vektor  $\vec{r}_{\text{soll}}$  zu der Referenzebene.

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \left( \frac{\vec{n} \cdot (\vec{r}_0 - \vec{r}_1)}{\vec{n} \cdot \vec{a}} \right) \cdot \vec{a} \quad (\vec{n} \cdot \vec{a} \neq 0) \quad (16)$$

$\vec{r}$  : Ortsvektor des Durchstoßpunkts der Geraden durch die Ebene

$\vec{n}$  : Normalenvektor der Ebene (Einheitsvektor)

$\vec{a}$  : Richtungsvektor der Geraden (Einheitsvektor)

$\vec{r}_0$  : Ortsvektor des Aufpunkts der Ebene

$\vec{r}_1$  : Ortsvektor des Aufpunkts der Geraden

Im Anschluss daran kann mit der Euler-Rodrigues-Formel die Rotationsmatrix für das Eindrehen der beiden Vektoren  $\vec{r}_{\text{ist}}$  auf  $\vec{r}_{\text{soll}}$  berechnet werden. Zur Vervollständigung der Transformationsmatrix muss noch der translatorische Anteil bestimmt werden. Das kann über die Differenz der beiden Richtungsvektoren der Geraden  $\vec{r}_{\text{ist}} - \vec{r}_{\text{soll}}$  berechnet werden. Die Differenz entspricht der Translation in der Transformationsmatrix, die damit vollständig bestimmt ist. Diese Art der Translationsbestimmung funktioniert jedoch nur für kleine Orientierungsänderungen und enthält nur den Y-Anteil der translatorischen Verschiebung. Da durch die Schwimmebene der Radadaptionseinheit auch Verschiebungen des Koordinatensystemursprungs in die X-Richtung auftreten können, kann hier auch ein anderes Verfahren angewandt werden. Durch die zusätzlichen taktilen Messtaster an der Schwimmeinheit, die in Kapitel 4.3.3 beschrieben wurden, kann eine Messdifferenz zwischen der fixen Grundstellung und der aktuellen Position erfasst werden. Diese Messanteile für die X- und Y-Richtung entsprechen der Translation der Transformationsmatrix. Die Z-Richtung bleibt unverändert, weil dieser Anteil keine Änderung erfährt.

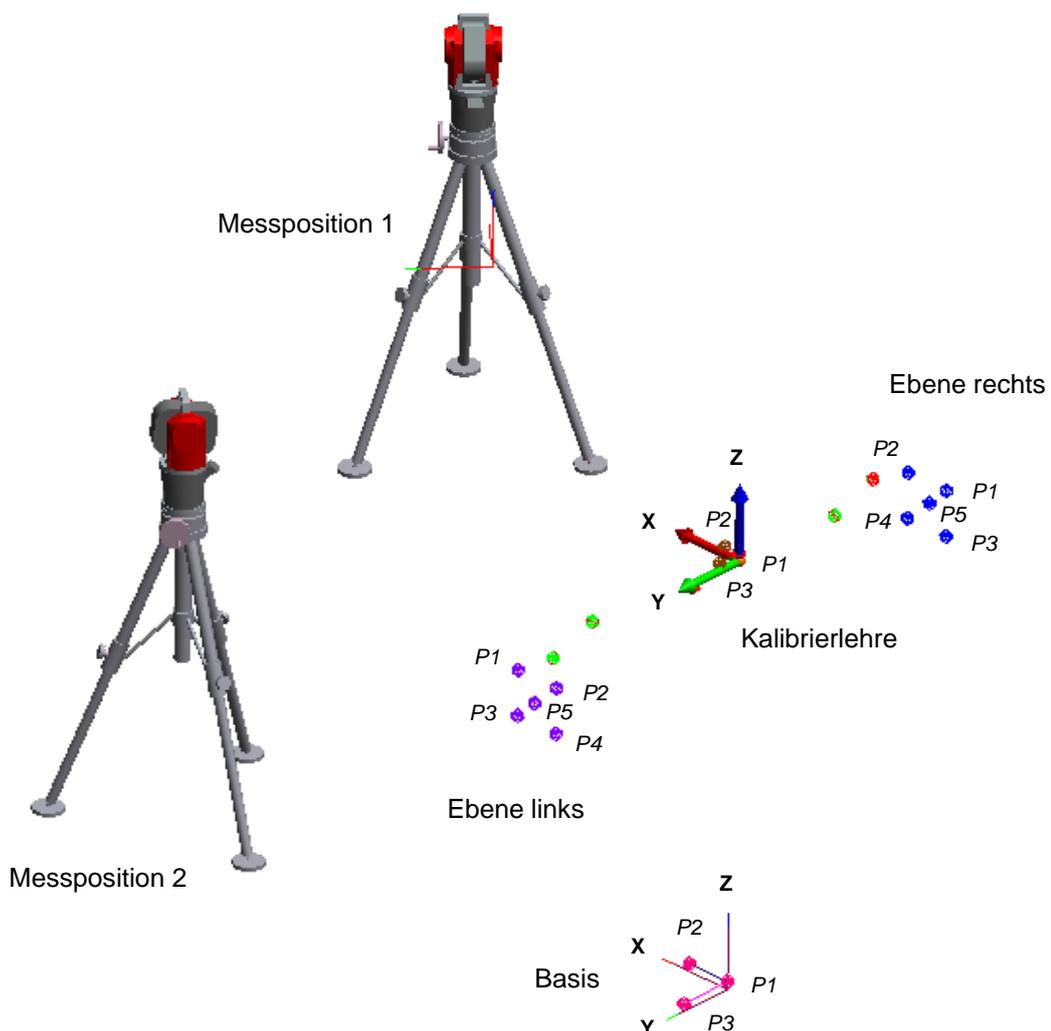
Neben den vorgestellten primären Transformationsbestimmungen muss noch die finale Transformationsmatrix von dem TCP\_open in das TCP\_master-Koordinatensystem bestimmt werden. Diese Transformation dient zur Korrektur durch die Kalibrierung des Systems. Die Ermittlung der Kalibrierdaten und die Erstellung der finalen Transformationsmatrix werden im folgenden Kapitel dargestellt.

### 5.3 Modell zur Kalibrierung des Messsystems

Neben der Vorstellung des Transformationsbaums und der damit verbundenen Matrizenerstellung wird in diesem Unterkapitel die Kalibrierung des Systems vorgestellt. Dabei wird das Einmessen der konstruierten Kalibrierlehre dargestellt. Im Anschluss daran wird die Erstellung der Transformationsmatrix und deren Anwendung für den Kalibrier- und Messprozess aufgezeigt.

### 5.3.1 Herausforderungen für den Kalibrierprozess

Zur Kalibrierung des Radadaptionssystems wurde in Kapitel 4.4 eine Kalibrierlehre entwickelt. Diese Vorrichtung kann auf der Bodenplatte des Adaptionssystems ortsfest montiert werden. An den Kalibrierebenen der Lehre können die Adaptionköpfe wie an der Fahrzeugradnabe andocken, um nachfolgend Kalibrierdaten zu erzeugen. Aus diesen Kalibrierdaten wird die finale Transformationsmatrix  $TCP\_open$  zu  $TCP\_master$  für den primären Messprozess bestimmt. Dazu muss in einem ersten Schritt die Kalibrierlehre vermessen werden. Durch die Vermessung werden die statische Transformation  $T_{Basis}^{Kalibrierlehre}$  und die Punkte an den Ebenen links und rechts ermittelt. Abbildung 5.13 zeigt die Einmessung mittels Lasertracker der Kalibrierlehre in der Basis des Radadaptionssystems.



**Abbildung 5.13: Stationäre Einmessungen der Kalibrierlehre zur Anlagenbasis**

Wie die Abbildung zeigt, wird die Kalibrierlehre bei der Vermessung auf der Bodenplatte befestigt, um so den statischen Bezug zum Radadaptionssystem herstellen zu können. Im Anschluss daran, werden die Punkte P1, P2, P3 des Basiskoordinatensystems mit dem Lasertracker in der Bodenplatte angemessen. Gleiches wird an den dafür vorgesehenen Punkten

der Kalibrierlehre durchgeführt. Mit den gemessenen Punkten können, wie bereits zuvor beschrieben, die Koordinatensysteme der Basis und der Kalibrierlehre berechnet werden. Sind die beiden Koordinatensysteme bekannt, dann kann die statische Transformation  $T_{\text{Kalibrierlehre Basis}}$  festgelegt werden. Des Weiteren werden im Lehrenkoordinatensystem an jeder Adaptionfläche für den Adaptionkopf Messpunkte aufgenommen. Abbildung 5.13 zeigt diese Punkte P1 bis P5 auf jeder Seite der Kalibrierlehre. Um im späteren Verlauf aus diesen Punkten eine Referenzebene für die Kalibrierung zu erzeugen, werden drei Punkte benötigt. Sie sind aus den Punkten P1 bis P4 frei wählbar. Mittels der erstellten Ebenen kann später die Ausrichtung des entsprechenden TCP-Koordinatensystems am Adaptionkopf kalibriert werden. Der Punkt P5 entspricht dem zentralen Mittelpunkt des Adaptionlochkreises. Bei angedocktem Adaptionkopf entspricht P5 dem Mittelpunkt des Adaptionkopfs und somit dem Ursprung des entsprechenden TCP-Koordinatensystems.

Eine weitere Besonderheit bei der Kalibrierung des Systems besteht darin, dass die Kalibrier Vorrichtung eine starre Rahmenkonstruktion ist und die Adaptionsebenen nicht drehbar wie bei einer Fahrzeugradnabe sind. Diese Drehung um die Y-Achse wurde aus toleranztechnischen Gründen der Lehre nicht gegeben und ein starrer Aufbau bevorzugt. Da der Adaptionkopf jedoch beim Messprozess am Fahrzeug eine Umschlagmessung vornimmt, muss der Rundlauf des Adaptionkopfs auch kalibriert werden. Aus diesem Grund ist der Aufnahmelochkreis an der Adaptionfläche der Lehre so gestaltet, dass ein Andocken bei einer Rotation um die Y-Achse zehnmal möglich ist. Dadurch kann der Adaptionkopf in mehreren Rotationsstellungen zu einem absoluten Bezug der Lehre kalibriert werden. Das mathematische Vorgehen dazu wird im folgenden Kapitel aufgezeigt.

### 5.3.2 Mathematisches Vorgehen bei der Kalibrierung des Systems

Nachdem die statischen Messpunkte der Kalibrierlehre ermittelt wurden, kann eine Kalibrierfahrt mit den Radadaptionseinheiten an der Kalibrierlehre durchgeführt werden. Bei der Kalibrierfahrt wird ein Kalibrierdatensatz erzeugt, der bei der späteren Messung am Fahrzeug dazu genutzt wird, die Transformation TCP\_open zu TCP\_master zu erstellen. Bei der Kalibrierfahrt befindet sich die Lehre im Radadaptionssystem und ist durch die Positionierzylinder in der Bodenplatte verriegelt. Beim Kalibrierstart des Radadaptionssystems docken die beiden Radadaptionköpfe an den Ebenen der Kalibrierlehre an. Durch einen geringen Anpressdruck des Adaptionkopfs auf die Ebene der fest verriegelten Lehre passen sich die Freiheitsgrade und somit die Messfläche des Kopfs an die Orientierung der Ebene an. Im Anschluss daran werden die Distanzen der LAP Triangulationssensoren ausgelesen und der aktuelle Drehwinkel um die Y-Achse des Adaptionkopfs erfasst.

Mit den bereits vorgestellten Berechnungsabläufen aus den Formeln 13 bis 16 kann für diese Adaptionstellung der jeweiligen Adaptionseinheit das TCP\_open-Koordinatensystem berechnet werden. Da in der aktuellen Position der Adaptionkopf an der Ebene der Lehre anliegt, sollte optimalerweise innerhalb des TCP\_open-Koordinatensystems die XZ-Ebene mit der

Ebene der Lehre übereinstimmen. Das ist jedoch aus toleranztechnischen Gründen nicht gegeben, weshalb eine Transformationsmatrix für die Übereinstimmung berechnet werden muss. Dazu müssen die zuvor bestimmten Punkte der Ebene der Kalibrierlehre in das aktuelle TCP\_open-Koordinatensystem transformiert werden. Das kann mit der Transformationsabfolge aus Formel 17 berechnet werden. Dabei bildet die Transformation  ${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{Basis}}$  die statische Einmessung von der Basis in die Kalibrierlehre, wie zuvor beschrieben. Bei Multiplikation der Transformation mit der berechneten Transformation  ${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$  in der aktuellen Adaptionposition ergibt sich die komplette Transformationskette  ${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$  von TCP\_open in das Koordinatensystem der Kalibrierlehre. Da die Punkte der Kalibrierlehre in das TCP\_open-Koordinatensystem transformiert werden sollen, muss von der Transformation  ${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$  die inverse Matrix gebildet werden, um die Rückwärtstransformation wie in Formel 17 zu erhalten.

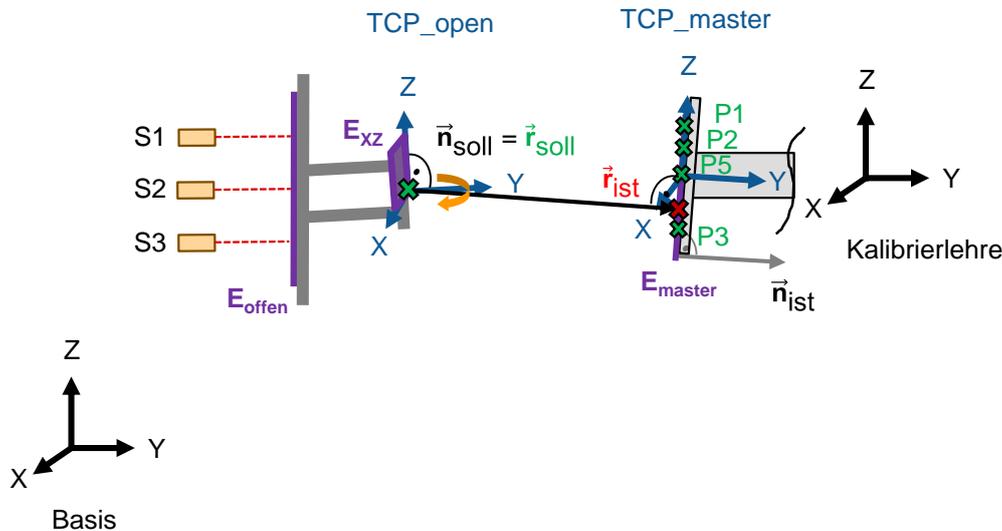
$${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}} = {}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{Basis}} \cdot {}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}} \quad (17)$$

$${}^{\text{TCP\_open}}\mathbf{P} = \left[ {}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}} \right]^{-1} \cdot {}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{P}$$

${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$	: Transformationsmatrix TCP_open zur Kalibrierlehre
${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{T}_{\text{Basis}}$	: Transformationsmatrix Basis zur Kalibrierlehre
${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_open}}$	: Transformationsmatrix TCP_open zur Basis
${}^{\text{TCP\_open}}\mathbf{P}$	: Punkt im TCP_open-Koordinatensystem
${}^{\text{Kalibrierlehre}}\mathbf{P}$	: Punkt im Kalibrierlehren-Koordinatensystem

Nach Berechnung der Punkte der Kalibrierlehre im aktuellen TCP\_open-Koordinatensystem kann die finale Transformationsmatrix TCP\_open in das TCP\_master-Koordinatensystem für eine Messung am Fahrzeug bestimmt werden. Wie die Abbildung 5.14 zeigt, kann mit den transformierten Punkten P1, P2 und P3 die Ebene  $E_{\text{master}}$  und damit der dazugehörige Normalenvektor  $\vec{\mathbf{n}}_{\text{ist}}$  mit der Formel 15 gebildet werden. Nachfolgend muss, wie bereits schon vorher angewandt, mit Formel 16 der Ortsvektor  $\vec{\mathbf{r}}_{\text{ist}}$  des Durchstoßpunkts der Geraden mit der Ebene  $E_{\text{master}}$  berechnet werden. Dadurch entspringt der Ortsvektor dem Ursprungspunkt des TCP\_open-Koordinatensystems und hat dabei die identische Ausrichtung wie der zuvor bestimmte Normalenvektor. Da die Ebene  $E_{\text{xz}}$  des TCP\_open-Koordinatensystems mit der darin bestimmten Ebene  $E_{\text{master}}$  orientierungssynchron sein soll, dient die XZ-Ebene als Referenz für die Rotationsbestimmung. Der Normalenvektor entspricht dabei dem Einheitsvektor der Y-Achse des TCP\_open-Koordinatensystems und wird mit  $\vec{\mathbf{n}}_{\text{soll}} = \vec{\mathbf{r}}_{\text{soll}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  definiert. Da folglich der Normalenvektor bereits dem Ursprungspunkt des Ausgangskoordinatensystems entspringt und seine Länge aufgrund der Plananlage an der Kalibrierlehre bedeutungslos ist, kann er für die Orientierungsbestimmung direkt benutzt werden. Im Anschluss daran kann mit der Euler-Rodrigues-Formel die Rotationsmatrix für das Eindrehen der beiden Vektoren  $\vec{\mathbf{r}}_{\text{ist}}$  auf

$\vec{r}_{\text{soll}}$  berechnet werden. Dabei wird das gleiche mathematische Vorgehen genutzt, wie es bereits zuvor angewandt wurde.



**Abbildung 5.14: Transformationsbestimmung zwischen TCP\_open und TCP\_master**

Neben der Rotationsbestimmung muss der translatorische Anteil ermittelt werden. Er entspricht, wie die Abbildung 5.14 zeigt, dem Punkt P5. Dadurch wird der Ursprung des TCP\_open-Koordinatensystems in den absolut bestimmten Mittelpunkt der Lehrenadaptionfläche verschoben. Damit ist die Transformationsmatrix für die aktuelle Adaptionposition an der Kalibrierlehre vollständig definiert.

Nach dem Speichern der ersten bestimmten Transformationsmatrix in ein Array je Radadaptionseinheit docken die Adaptionköpfe von der Lehre ab und rotieren um  $36^\circ$ . Das entspricht einem Zehntel der vollen Rotation von  $360^\circ$  um die Y-Achse. Danach wiederholt sich der Andock- und Messvorgang bis alle zehn Adaptionpositionen an der Lehre vermessen sind. Parallel dazu wird bei jeder Kopfposition an der Lehre eine Transformationsmatrix mit gleichem Verfahren bestimmt. Somit existiert nach einer Kalibrierfahrt ein Array je Radadaptionseinheit mit zehn Transformationsmatrizen  ${}^{\text{TCP\_open}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}}$  in Abhängigkeit zum Drehwinkel des Adaptionkopfs.

Beim späteren Messprozess am Fahrzeug wird die Transformationsabfolge aus Formel 13 bei der Umschlagmessung an der Fahrzeugradnabe zyklisch bestimmt. Dabei wird bei jeder Messung der Drehwinkel des Adaptionkopfs zum zugehörigen Messwert gespeichert. Zur Bestimmung der Transformationsmatrix  ${}^{\text{TCP\_open}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}}$  wird der Drehwinkel der aktuellen Messung genutzt, um die dafür korrekte Matrix aus dem Array der Kalibrierung auszuwählen. Bei einem Drehwinkel, der zwischen zwei Transformationen liegt, wird zwischen den beiden Transformationsmatrizen eine neue Matrix in Abhängigkeit des Drehwinkels interpoliert. Damit wird die finale Transformationsmatrix, die für die Kalibrierung des Systems zuständig ist, dynamisch und zyklisch für jede Einzelmessung angepasst.

## 5.4 Bestimmung der Fahrwerkgeometrien aus der Messabfolge

Nach Ermittlung der vollständigen Transformationsabfolge innerhalb der primären Anlagenkoordinatensysteme können die notwendigen Fahrwerkgeometrien des Fahrzeugs bestimmt werden. Dazu wird nachfolgend die Übersicht eines derartigen Ablaufs gegeben. Im Anschluss daran wird die Berechnung für ein Hinterachssystem und für ein Gesamtsystem, das aus Vorder- und Hinterachse besteht, aufgezeigt.

### 5.4.1 Ablauf bei der Geometrienbestimmung aus den Messdaten

Durch die Transformationen ist je Adaptionkopf das TCP\_master-Koordinatensystem als final bestimmtes System durch die Messtechnik der entsprechenden Radadaptionseinheiten bekannt. Das TCP\_master-Koordinatensystem entspricht dabei exakt dem jeweiligen Radkoordinatensystem des vermessenen Fahrzeugs. Der Ursprungspunkt ist identisch zu dem Radmittelpunkt, der in der Radmittelebene liegt. Dadurch können die Position des aktuellen Messobjekts und die Achsweiten sowie die Achsmittelpunkte berechnet werden. Des Weiteren entspricht die XZ-Ebene des Koordinatensystems der Orientierung der Radmittelebene, die je nach späterer Bewertung die Spur- und Sturzwerte enthält. Durch das Transformieren der XZ-Radebenen und der Ursprungspunkte in das Basiskoordinatensystem kann ein gemeinsamer Bezug hergestellt werden.

Da auch Einzelspuren berechnet werden sollen, die zu Ausrichtungsbezügen des Fahrzeugs bestimmt werden müssen, muss ein Hinterachs- bzw. Fahrzeugkoordinatensystem bestimmt werden. Durch das in der Basis bestimmte Koordinatensystem können die Daten aus den Radkoordinatensystemen nicht nur zur Anlagenbasis, sondern auch zur Referenz des Fahrwerks dargestellt werden. Dazu wird in den folgenden Kapiteln das Bestimmen des Hinterachskoordinatensystems mit Ausrichtung zur Hinterachs- oder Fahrzeugsymmetrieachse aufgezeigt. Das ist davon abhängig, ob nur die Hinterachse oder Hinter- und Vorderachse gemeinsam vermessen wird.

Da bei Vermessung am Fahrzeug eine Umschlagmessung durchgeführt wird, werden sämtliche Daten wie die Transformationsabfolgen und das Fahrzeugkoordinatensystem zyklisch mehrmals berechnet. Das ist erforderlich, weil das Fahrzeug sich bei der Vermessung bewegen kann und sich so Ausrichtungsbezüge wie die Fahrzeugsymmetrie ändern können. Da bei einer Umschlagmessung mit jeder Radadaptionseinheit zeitgleich 72 Teilmessungen durchgeführt werden, werden auch sämtliche vorgestellten Koordinatensysteme und Berechnungen 72 Mal ermittelt. Daher können äußere Einflussfaktoren wie Bewegungen des Fahrzeugs weitestgehend reduziert werden. Nach Beendigung der Messung stehen aus den Teilmessungen alle 72 berechneten Spur und Sturzwerte über den Drehwinkel eines jeden Fahrzeugrades zur Verfügung. Nach Filterung der Daten kann der finale Mittelwert bestimmt werden. Soll im späteren Verlauf auch eine Achseinstellung vorgenommen werden, dann kann eine Fehlerfunktion aus den berechneten Daten über den Drehwinkel einer jeden Radnabe bestimmt werden.

Dadurch kann zu jedem beliebigen Drehwinkel, bei dem eine Einstellung am Fahrwerk erfolgt, der korrekte Wert bestimmt werden, der dem späteren Mittelwert entsprechen soll.

#### 5.4.2 Ermittlung der Geometriedaten für ein Hinterachssystem

Die Ermittlung der Fahrwerkgeometrie innerhalb dieses Kapitels bezieht sich auf ein Radadaptationssystem für eine Fahrzeugachse, das eine Vermessung an der Hinterachse vornimmt. Bei dieser Vermessungsart bezieht sich die Symmetrieachse allein auf die Hinterachse. Aus diesem Grund wird das Koordinatensystem der Hinterachse so angelegt, dass die X-Achse identisch zur Symmetrieachse der Hinterachse liegt. Abbildung 5.15 zeigt dieses Koordinatensystem, bei dem aufgrund der Rechtwinkligkeit die Y-Achse in Richtung der Achslängsrichtung zeigt. Um das Koordinatensystem zu bestimmen, wird in einem ersten Schritt der Vektor in Längsrichtung der Hinterachse berechnet. Er ergibt sich von Radmittelpunkt zu Radmittelpunkt und entspricht mit seiner Länge der Spurweite der Achse. Der Radmittelpunkt entspricht dabei dem Ursprung des TCP\_master-Koordinatensystems, das identisch mit dem Radkoordinatensystem ist. Aus diesem Grund ist der translatorische Anteil der Transformation  ${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{TCP\_master}}$  dem Radmittelpunkt  ${}^{\text{Basis}}\mathbf{P}_{\text{TCP\_master}}$  in der Basis gleichzusetzen. Dieser kann entsprechend der linken und rechten Seite der jeweiligen Transformation entnommen werden. Formel 18 bildet durch die Subtraktion der Radmittelpunkte der Hinterachse den Achsvektor  $\vec{\mathbf{v}}_{\text{HA}}$ .

$$\vec{\mathbf{v}}_{\text{HA}} = {}^{\text{Basis}}\mathbf{P}_{\text{TCP\_master, HL}} - {}^{\text{Basis}}\mathbf{P}_{\text{TCP\_master, HR}} \quad (18)$$

- $\vec{\mathbf{v}}_{\text{HA}}$  : Vektor zwischen den Radmittelpunkten der Hinterachse
- ${}^{\text{Basis}}\mathbf{P}_{\text{TCP\_master, HL}}$  : Translation in Radmittelpunkt der HA links im Basis-KOS
- ${}^{\text{Basis}}\mathbf{P}_{\text{TCP\_master, HR}}$  : Translation in Radmittelpunkt der HA rechts im Basis-KOS

Auf dem bestimmten Achsvektor  $\vec{\mathbf{v}}_{\text{HA}}$  soll der Mittelpunkt der Hinterachse bestimmt werden, in dem der Ursprung des späteren Hinterachskoordinatensystems liegen soll. Daher berechnet sich der Ortsvektor  $\vec{\mathbf{mp}}_{\text{HA}}$ , der in den Mittelpunkt  $\text{MP}_{\text{HA}}$  der Hinterachse zeigt, durch die Addition eines Radmittelpunkts mit der halben Länge des zuvor berechneten Achsvektors. Diese Berechnung ist in Formel 19 dargestellt.

$$\text{MP}_{\text{HA}} = {}^{\text{Basis}}\mathbf{P}_{\text{TCP\_master, HR}} + \frac{\vec{\mathbf{v}}_{\text{HA}}}{2} \quad (19)$$

$\text{MP}_{\text{HA}}$  : Mittelpunkt der Hinterachse

Im Anschluss daran kann der Vektor  $\vec{\mathbf{vy}}_{\text{HA}}$  bestimmt werden, der mit der Y-Achse des Koordinatensystems der Hinterachse identisch sein soll. Er zeigt aus dem Mittelpunkt der Hinterachse in einen Radmittelpunkt und ist so für die Ausrichtung und Lage der Hinterachse zu ihrer

eigenen Symmetrieachse verantwortlich. Formel 20 zeigt die Berechnung, bei der die genannten Punkte subtrahiert werden.

$$\vec{v}_{HA} = {}^{\text{Basis}}P_{\text{TCP\_master, HL}} - MP_{HA} \quad (20)$$

$\vec{v}_{HA}$  : Aktueller Richtungsvektor der Y-Achse der Hinterachse

Um die benötigte Transformationsmatrix  ${}^{\text{Hinterachse}}T_{\text{Basis}}$  zu bestimmen, muss die Rotationsmatrix ermittelt werden. Da die Y-Achse des Koordinatensystems mit dem bestimmten Vektor  $\vec{v}_{HA}$  der Achsausrichtung identisch sein soll, muss die Rotation für das Eindrehen der beiden Vektoren bestimmt werden. Dazu wird wiederum die Euler-Rodrigues-Formel genutzt. Mit ihr wird der Vektor  $\vec{v}_{HA}$  auf den der Y-Achse  $\vec{y}_{HA} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  rotiert und die zugehörige Rotationsmatrix berechnet. Der translatorische Anteil entspricht dem berechneten Mittelpunkt  $MP_{HA}$  der Hinterachse. Somit ist die Transformationsmatrix vollständig bestimmt und kann nach Formel 21 dazu genutzt werden, berechnete Punkte in der Basis in das Hinterachskoordinatensystem zu transformieren.

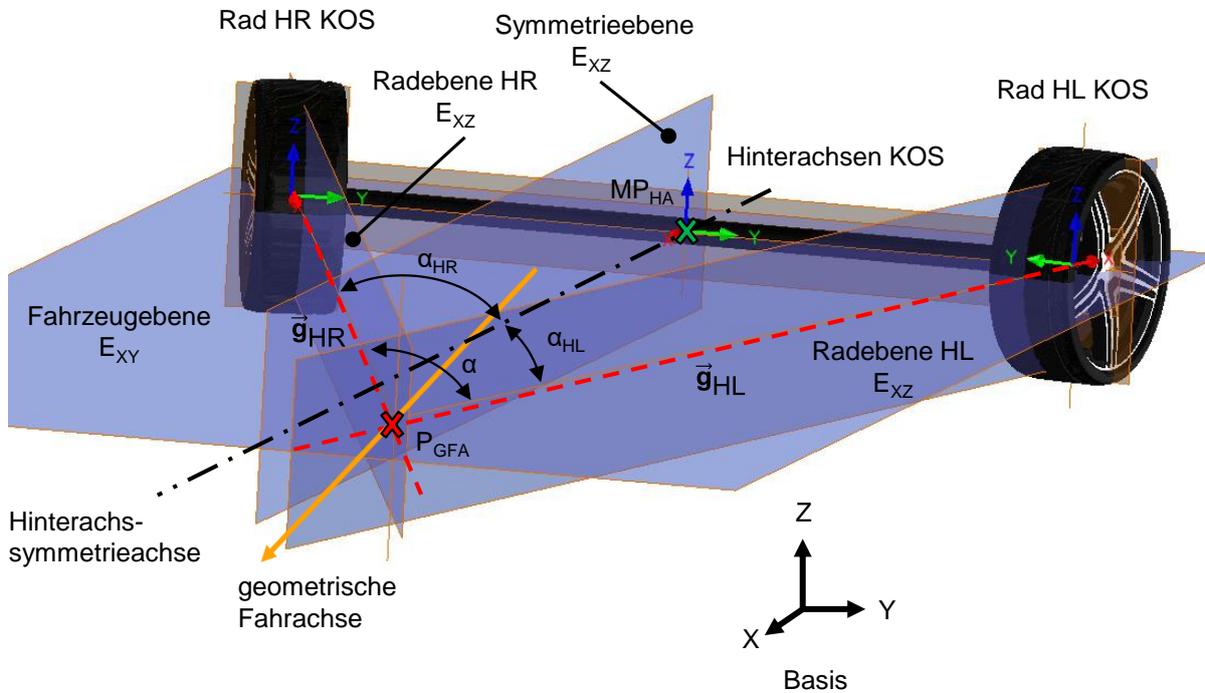
$$\text{Hinterachse } P = {}^{\text{Hinterachse}}T_{\text{Basis}} \cdot \text{Basis } P \quad (21)$$

${}^{\text{Hinterachse}}T_{\text{Basis}}$  : Transformationsmatrix Basis zur Hinterachse  
 Hinterachse  $P$  : Punkt im Hinterachsen-Koordinatensystem  
 Basis  $P$  : Punkt im Basis-Koordinatensystem

Durch das berechnete Koordinatensystem der Hinterachse entspricht dessen X-Achse der Symmetrieachse bezogen auf die Hinterachse. Der dargestellte Berechnungsablauf für die Bestimmung des Hinterachskoordinatensystems wird bei jeder Teilmessung zyklisch neu berechnet. Das ist erforderlich, um den sich ändernden Referenzbezug erfassen zu können. Nachdem die Messpunkte der Radadaptionseinheiten in das Koordinatensystem der Hinterachse transformiert werden, können die Spur- und Sturzwerte berechnet werden.

Abbildung 5.15 zeigt die Schnittgeraden für die Ermittlung der Spurwerte an der Hinterachse. Um einen Spurwinkel bestimmen zu können, müssen die Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL, HR}$  der Schnittgeraden ermittelt werden. Dazu müssen die Normalenvektoren der XZ-Radebenen im TCP\_master-Koordinatensystem über die jeweilige bestimmte Transformationsabfolge aus Formel 13 und 21 in das Koordinatensystem der Hinterachse transformiert werden. Des Weiteren muss die Fahrzeugebene bestimmt werden, die die Lage des Fahrzeugs wiedergibt. Diese entspricht der XY-Ebene des Hinterachskoordinatensystems, da das System so angelegt wurde, dass es der Achsausrichtung und -lage entspricht. Da die Vorderachse in diesem

Fall für die Festlegung der Drehung um die Y-Achse fehlt, entspricht die Orientierung der Fahrzeugebene derjenigen der Basis. Der Normalenvektor  $\vec{n}_{\text{Fahrzeugebene}, E_{XY}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  entspricht daher der Z-Achse im Koordinatensystem der Hinterachse.



**Abbildung 5.15: Bestimmung der Schnittgeraden und Winkel aus den Messebenen für eine Hinterachsvermessung**

Mit den beiden Normalenvektoren der Rad- und Fahrzeugebene können mit Formel 22 für die linke und rechte Seite die Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL}$  und  $\vec{g}_{HR}$  der Schnittgeraden der entsprechenden Ebenen bestimmt werden. Die zugehörigen Stützvektoren der Richtungsvektoren werden dabei nicht benötigt.

$$\vec{g}_{HL, HR} = \vec{n}_{\text{Radebene HL, HR}, E_{XZ}} \times \vec{n}_{\text{Fahrzeugebene}, E_{XY}} = \vec{n}_{\text{Radebene HL, HR}, E_{XZ}} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

- $\vec{g}_{HL, HR}$  : Richtungsvektor der Schnittgeraden zwischen Rad- und Fahrzeugebene
- $\vec{n}_{\text{Radebene HL, HR}, E_{XZ}}$  : Normalenvektor der Radebene im HA-Koordinatensystem
- $\vec{n}_{\text{Fahrzeugebene}, E_{XY}}$  : Normalenvektor der Fahrzeugebene im HA-Koordinatensystem

Nach Bestimmung der Richtungsvektoren der Spurgeraden an der Hinterachse können die Einzelspurwinkel  $\alpha_{HL}$  und  $\alpha_{HR}$  berechnet werden. Dazu wird der Winkel zwischen dem jeweils

bestimmten Richtungsvektor  $\vec{g}_{HL, HR}$  und der X-Achse des Hinterachskoordinatensystems berechnet. Das erfolgt in Formel 23. Dabei beziehen sich die Einzelspurwinkel auf die Symmetrieachse der Hinterachse, die mit der X-Achse des Koordinatensystems identisch ist.

$$\alpha_{HL, HR} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{g}_{HL, HR} \cdot \vec{x}_{HA}}{|\vec{g}_{HL, HR}| \cdot |\vec{x}_{HA}|} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{g}_{HL, HR} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}{|\vec{g}_{HL, HR}| \cdot \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right|} \right) \quad (23)$$

- $\vec{g}_{HL, HR}$  : Richtungsvektor der Schnittgeraden zwischen Rad- und Fahrzeug ebene  
 $\vec{x}_{HA}$  : Richtungsvektor der X-Achse des HA-Koordinatensystems  
 $\alpha_{HL, HR}$  : Einzelspurwinkel Hinterachse

Mittels der Summe der Einzelspuren kann demzufolge auch die Gesamtspur an der Hinterachse gebildet werden. Der Dackellaufwinkel berechnet sich mit bereits vorgestellter Formel 1. Die Richtung der geometrischen Fahrachse bildet die Winkelhalbierende der Gesamtspur. Um später die geometrische Fahrachse für externe Betriebsmittel nutzbar zu machen, muss diese als Richtungsvektor angegeben werden. Dieses Vorgehen wird im folgenden Kapitel dargestellt.

Neben der Bestimmung der Einzelspuren im Koordinatensystem der Hinterachse gibt es noch die Möglichkeit, die Gesamtspur innerhalb der Basis zu bestimmen. Dafür ist die Ermittlung des Hinterachskoordinatensystems nicht erforderlich, da die Gesamtspur keine Referenz benötigt und daher unabhängig von der Orientierung des Fahrzeugs berechnet werden kann. Aus diesem Grund kann auch die Ausrichtung der geometrischen Fahrachse direkt über die ermittelte Gesamtspur in der Basis bestimmt werden. Um den Gesamtspurwinkel unabhängig von der Hinterachsausrichtung darzustellen, reicht es aus, die Richtungsvektoren der Spurgeraden innerhalb der Basis zu bilden. Die Fahrzeugebene stellt dabei die XY-Fahrbahnebene des Basiskoordinatensystems dar. Im Anschluss daran kann mit der Formel 23 der Gesamtspurwinkel berechnet werden. Dazu werden die beiden Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL}$  und  $\vec{g}_{HR}$  in die Formel eingesetzt und der Winkel zwischen ihnen bestimmt.

Zusätzlich kann zu den Spurwerten auch der Sturz ermittelt werden. Diese Berechnung erfolgt je Radebene analog zur Spur, jedoch mit anderen Referenzbezügen der Ebenen. Dazu müssen wie bei der Spur die Schnittgeraden für den Sturz bestimmt werden. Dabei werden die bekannte XZ-Radebene und die YZ-Ebene des Koordinatensystems der Hinterachse betrachtet. Mit Formel 22 kann der Richtungsvektor der Schnittgeraden bestimmt werden. Dazu wird lediglich der Normalenvektor der XY-Fahrzeugebene durch den der YZ-Ebene

$\vec{n}_{\text{Fahrzeugebene, E}_{YZ}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  ersetzt. Der Normalenvektor der Radebene entspricht dem gleichen

wie bei der Spurberechnung. Nach der Berechnung des Richtungsvektors der Schnittgeraden für den Sturz des entsprechenden Fahrzeugrades kann der Sturzwinkel  $\gamma$  bestimmt werden. Dazu wird mit Formel 23 der Winkel zwischen dem berechneten Richtungsvektor und der

Z-Achse  $\vec{z}_{HA} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  des Hinterachskoordinatensystems ermittelt. Folglich kann der Sturzwinkel für jedes Rad in Abhängigkeit zur aktuellen Hochachse ermittelt werden.

### 5.4.3 Ermittlung der Geometriedaten für ein Gesamtsystem

In diesem Kapitel wird die Ermittlung der Fahrwerkgeometrien analog zum vorherigen Kapitel aufgezeigt, jedoch für ein Radadaptionssystem, das ein komplettes Fahrwerk vermessen kann. Demnach stehen neben den primären Transformationen der Hinterachse auch die der Vorderachse in der Basis zur Verfügung. Damit werden die XZ-Radebenen aller vier Räder an der Vorder- und Hinterachse ermittelt. Durch diese vorhandenen Daten kann die Fahrzeugsymmetrieachse nicht nur in Bezug auf die Hinterachse, sondern für das gesamte Fahrzeug bestimmt werden. Dabei ergibt sich die Fahrzeugsymmetrieachse vom Mittelpunkt der Hinterachse zum Mittelpunkt der Vorderachse. Da auch hier das Koordinatensystem der Hinterachse in seiner X-Richtung mit der Symmetrieachse identisch sein soll, muss die Berechnung entsprechend an die vorhandenen Vorderachsdaten angepasst werden. Da das folgende erstellte Koordinatensystem nicht nur der Hinterachssymmetrie sondern auch der des Gesamtfahrzeugs entspricht, wird das Koordinatensystem folglich Fahrzeugkoordinatensystem genannt. Abbildung 5.16 zeigt das angelegte Fahrzeugkoordinatensystem an der Hinterachse.

Um die Transformationsmatrix für das Fahrzeugkoordinatensystem erstellen zu können, müssen die Achsmittelpunkte von der Hinterachse  $MP_{HA}$  und der Vorderachse  $MP_{VA}$  ermittelt werden. Dazu wird die Vorgehensweise aus vorherigem Kapitel mit Formel 18 und 19 genutzt, um den Mittelpunkt der Hinterachse zu bestimmen. Analog dazu wird mit Formel 24 und 25 der Mittelpunkt der Vorderachse berechnet. Als erstes muss dafür der Achsvektor  $\vec{v}_{VA}$  zwischen den Radmittelpunkten der Vorderachse bestimmt werden. Dabei entsprechen die Radmittelpunkte auch dem translatorischen Anteil der jeweiligen Transformationen  $TCP\_master$  zur Basis.

$$\vec{v}_{VA} = {}^{Basis}P_{TCP\_master, VL} - {}^{Basis}P_{TCP\_master, VR} \quad (24)$$

- $\vec{v}_{VA}$  : Vektor zwischen den Radmittelpunkten der Vorderachse
- ${}^{Basis}P_{TCP\_master, VL}$  : Translation in Radmittelpunkt der VA links im Basis-KOS
- ${}^{Basis}P_{TCP\_master, VR}$  : Translation in Radmittelpunkt der VA rechts im Basis-KOS

Im Anschluss daran kann mit Formel 25 der Mittelpunkt der Vorderachse durch die Addition eines Radmittelpunkts mit der halben Länge des zuvor berechneten Achsvektors bestimmt werden.

$$MP_{VA} = {}^{\text{Basis}}P_{TCP\_master, VR} + \frac{\vec{v}_{VA}}{2} \quad (25)$$

$MP_{VA}$  : Mittelpunkt der Vorderachse

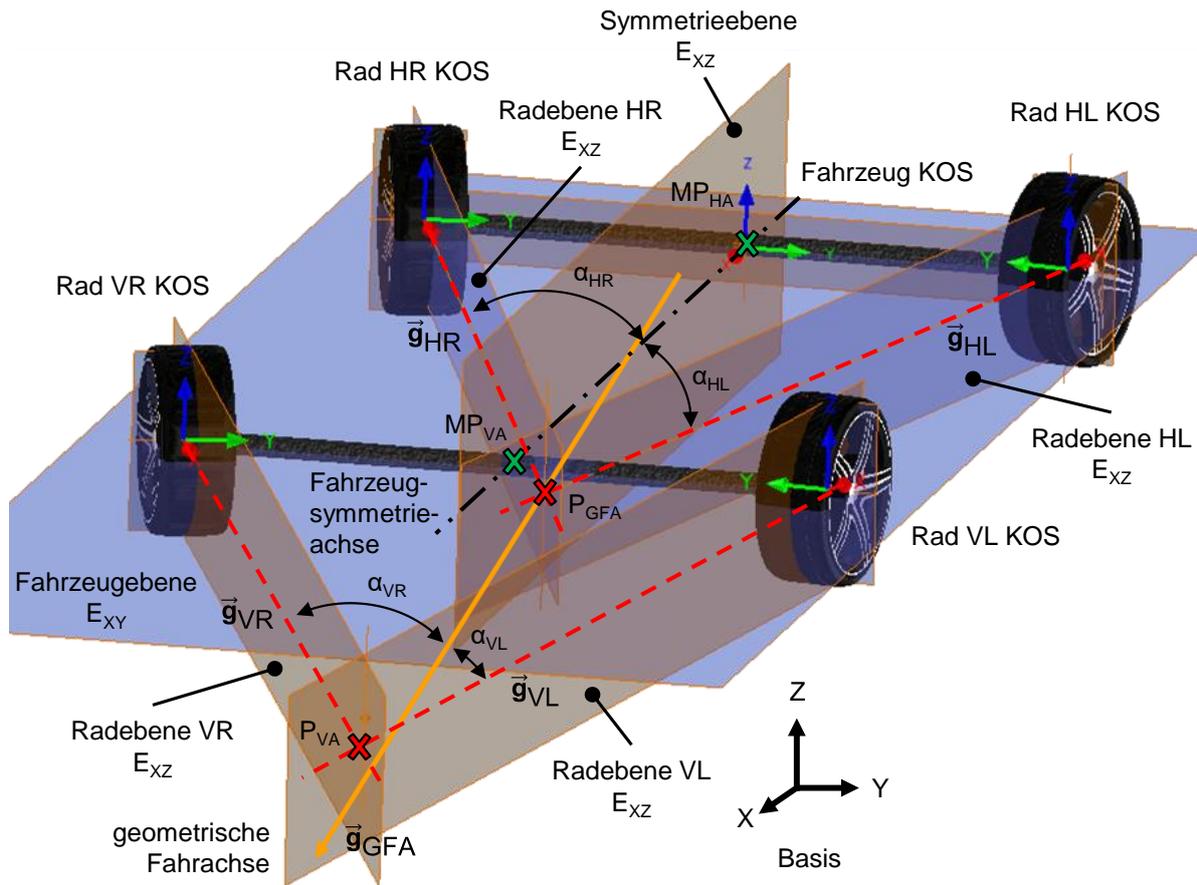
Mit den berechneten Achsmittelpunkten der Hinterachse  $MP_{HA}$  aus Formel 19 und der Vorderachse  $MP_{VA}$  aus Formel 25 kann der Richtungsvektor  $\vec{v}_{x_{HA}}$  der Symmetrieachse gebildet werden. Dieser berechnet sich aus der Subtraktion der beiden Ortsvektoren der Achsmittelpunkte. Das ist in Formel 26 dargestellt.

$$\vec{v}_{x_{HA}} = MP_{VA} - MP_{HA} \quad (26)$$

$\vec{v}_{x_{HA}}$  : Aktueller Richtungsvektor der X-Achse der Hinterachse

Wie bei der Bestimmung des Koordinatensystems der Hinterachse wird bei der des Fahrzeugkoordinatensystems die X-Achse der Basis auf den ermittelten Richtungsvektor  $\vec{v}_{x_{HA}}$  der Symmetrieachse rotiert. Dadurch erhält man die Rotationsmatrix, die zur Erstellung der Transformationsmatrix benötigt wird. Diese mathematische Berechnung erfolgt mit der bekannten Euler-Rodrigues-Formel. Die Translation der Matrix entspricht dem Mittelpunkt der Hinterachse  $MP_{HA}$ . Wie auch bei der Bestimmung des Hinterachskoordinatensystems liegt der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems im gleichen Punkt. Es ändert sich lediglich die Orientierung durch die Symmetrieachse. Auch dieses Koordinatensystem wird bei einer Vermessung zyklisch neu berechnet, um eventuelle Positions- und Lageänderungen des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Nach der vollständigen Bestimmung der Transformationsmatrix können die Radebenenpunkte in der Basis in das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden. Das kann mit Formel 21 realisiert werden.

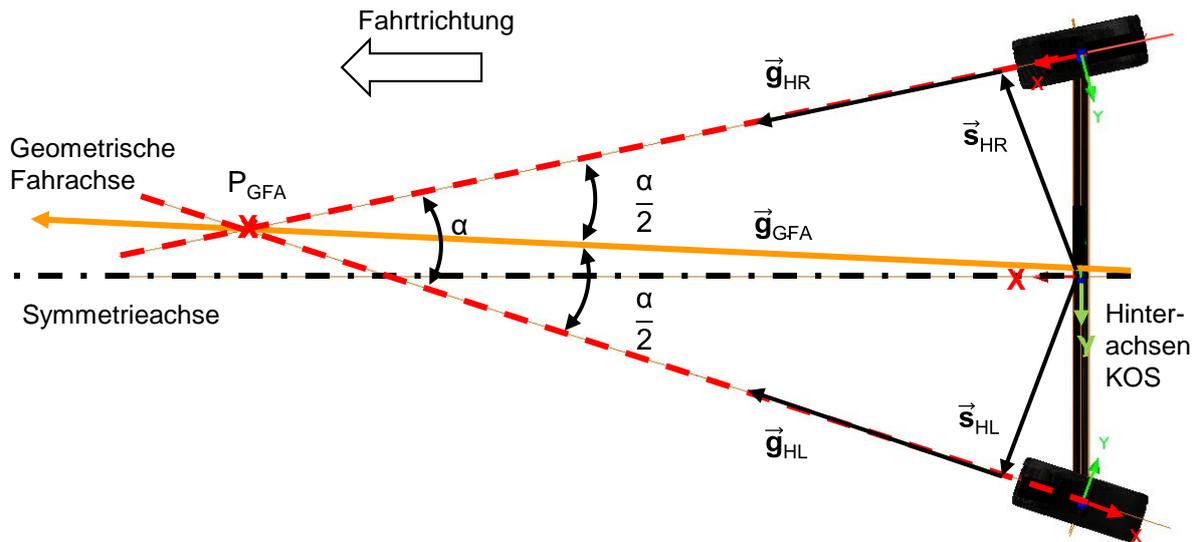
Abbildung 5.16 zeigt die Bildung der Richtungsvektoren der Schnittgeraden für die Spurwinkelberechnung an einem Gesamtfahrzeug. Die Berechnung der Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL}$  und  $\vec{g}_{HR}$  an der Hinterachse erfolgt wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt. Dazu wird die Formel 22 verwendet. Auch die Einzelspurwinkel  $\alpha_{HL}$  und  $\alpha_{HR}$  der Hinterachse können demzufolge mit der Formel 23 berechnet werden. Die Ermittlung des Sturzes für jedes Rad ist mit dem zuvor vorgestellten Vorgehen identisch. Dabei wird die Schnittgerade an jedem Rad zwischen der entsprechenden XZ-Radebene und der YZ-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems gebildet. Der Winkel zwischen der Schnittgeraden und der aktuellen Z-Achse ergibt den Sturzwinkel des Rades.



**Abbildung 5.16: Bestimmung der Schnittgeraden und Winkel aus den Messebenen für eine Gesamtvermessung**

Um die Einzelspuren der Vorderachse zu bestimmen, muss im Vorfeld der Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse berechnet werden. Das ist erforderlich, da sich, wie die Abbildung zeigt, die Schnittgeraden der Spur an der Vorderachse als Referenz auf die geometrische Fahrachse beziehen. Zur Ermittlung der geometrischen Fahrachse als Richtungsvektor muss ein Richtungsvektor der Schnittgeraden an der Hinterachse um die Z-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems gedreht werden.

Abbildung 5.17 zeigt die Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL}$  und  $\vec{g}_{HR}$  der Hinterachse sowie die zugehörigen Stützvektoren  $\vec{s}_{HL}$  und  $\vec{s}_{HR}$ . Durch die Berechnung der Gesamtspur  $\alpha$  über die Summe der Einzelspurwinkel oder des Winkels zwischen den Richtungsvektoren kann die Winkelhalbierende für die Fahrachse bestimmt werden. Zur Bestimmung des Richtungsvektors  $\vec{g}_{GFA}$  muss eine Schnittgerade der Spur um die Winkelhalbierende  $\frac{\alpha}{2}$  in der XY-Ebene gedreht werden. Diese Drehung um die Z-Achse ist nur möglich, weil die beiden Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL}$  und  $\vec{g}_{HR}$  einen gemeinsamen Schnittpunkt  $P_{GFA}$  besitzen und im Fahrzeug- bzw. Hinterachs-koordinatensystem liegen. Die geometrische Fahrachse verläuft ebenfalls durch diesen Schnittpunkt, wie die Abbildung 5.17 darstellt.



**Abbildung 5.17: Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse**

Um die beschriebene Drehung des Vektors durchzuführen, muss eine Drehmatrix für die Drehung eines Winkels  $\alpha$  um die Z-Achse erstellt werden. Dazu wird die entsprechende Rotationsmatrix aus Formel 5 benutzt und als Winkel die Winkelhalbierende der Gesamtspur der Hinterachse eingesetzt. Nach Multiplikation der Rotationsmatrix mit dem Richtungsvektor  $\vec{g}_{HR}$  der Schnittgeraden erhält man den rotierten Richtungsvektor  $\vec{g}_{GFA}$  der geometrischen Fahrachse. Die Berechnung ist in Formel 27 dargestellt.

$$\vec{g}_{GFA} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} & -\sin \frac{\alpha}{2} & 0 \\ \sin \frac{\alpha}{2} & \cos \frac{\alpha}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{g}_{HR} \quad (27)$$

$\vec{g}_{GFA}$  : Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse

$\vec{g}_{HR}$  : Richtungsvektor der Schnittgeraden zwischen Rad- und Fahrzeugebene

$\alpha$  : Gesamtpurwinkel der Hinterachse

Bei der Drehung muss auf die korrekte Richtung geachtet werden. Deshalb muss die Matrix mit dem rechten Richtungsvektor der Schnittgeraden multipliziert werden. Bei einer Multiplikation mit dem linken Richtungsvektor muss die Drehrichtung negativ sein, um die gewünschte Rotation zwischen den beiden Schnittgeraden zu erzielen. Der erhaltene Vektor der Fahrachse im Fahrzeugkoordinatensystem dient demnach nicht nur als Referenz für die Bestimmung der Einzelspuren an der Vorderachse, sondern auch für das Kalibrieren der Umfeldsensoren des Fahrzeugs. Durch die Rückwärtstransformation kann der Richtungsvektor  $\vec{g}_{GFA}$  der geometrischen Fahrachse in die Basis und so zu einem weiteren Koordinatensystem eines Betriebsmittels transformiert werden. Das wird in Kapitel 6.3 weiterführend beschrieben.

Zur Ermittlung der Einzelspurwinkel  $\alpha_{VL}$  und  $\alpha_{VR}$  an der Vorderachse müssen die Richtungsvektoren  $\vec{g}_{VL}$  und  $\vec{g}_{VR}$  der Schnittgeraden an der Vorderachse berechnet werden. Das erfolgt analog zu der Berechnung an der Hinterachse mit Formel 22. Dabei werden die Normalenvektoren der vorderen linken und rechten XZ-Radebenen zu der XY-Fahrzeugebene eingesetzt. Anschließend können zwischen den erhaltenen Richtungsvektoren der Spur und des zuvor ermittelten Richtungsvektors der geometrischen Fahrachse die entsprechenden Einzelspurwinkel mit Formel 28 berechnet werden.

$$\alpha_{VL, VR} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{g}_{VL, VR} \cdot \vec{g}_{GFA}}{|\vec{g}_{VL, VR}| \cdot |\vec{g}_{GFA}|} \right) \quad (28)$$

$\vec{g}_{VL, VR}$  : Richtungsvektor der Schnittgeraden zwischen Rad- und Fahrzeugebene

$\vec{g}_{GFA}$  : Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse

$\alpha_{VL, VR}$  : Einzelspurwinkel Vorderachse

Die Gesamtspur an der Vorderachse kann wiederum aus der Summe der Einzelspurwinkel gebildet oder aus der Berechnung des Winkels der Schnittgeraden zueinander mit Formel 28 ermittelt werden. Die vorgestellte Berechnung der geometrischen Fahrachse und der Einzelspurwinkel an der Vorderachse wird bei einer Vermessung ebenfalls zyklisch berechnet, um einer eventuellen Lage- und Orientierungsänderung des Fahrzeugs im Radadaptionssystem entgegenzuwirken. Diese gesamten mathematischen Abläufe werden im folgenden Kapitel in einen Softwareablauf implementiert.

## 5.5 Erstellung des Messalgorithmus in einer Software

Nachdem die mathematischen Berechnungsvorgänge vorgestellt wurden, soll im folgenden Kapitel daraus ein Ablauf in einer Software realisiert werden. Neben den Berechnungen durch die Software soll auch der dazugehörige Prozessablauf realisiert werden. Daher müssen auch Schnittstellen zu der Messtechnik und der Anlagensteuerung geschaffen werden. Des Weiteren soll die Entwicklungsumgebung leicht konfigurierbar und validierbar sein. Aus diesem Grund wurde die Software Matlab ausgewählt, die sich für prototypische mathematische Prozessabläufe bestens eignet. Weiterhin kann mit Hilfe der Software schnell und flexibel auf Änderungen reagiert werden, was sich besonders für ein Prototypsystem in einem frühen Entwicklungsstadium eignet. Für einen späteren Serienbetrieb bietet es sich jedoch an, eine Software zu nutzen, die einen schnelleren und stabileren Ablauf gewährleisten kann, da die Änderungsflexibilität dann nicht mehr im Vordergrund steht.

Abbildung 5.18 zeigt eine Übersicht des erstellten Programmablaufs in Matlab. Dabei können die Hauptroutrinen Fahrzeugvermessung oder Kalibrierung aufgerufen werden. Bei der Kalibrierung führt die Anlagensteuerung eine Kalibrierfahrt durch. Dabei wird die Kalibrierlehre in

unterschiedlichen Stellungen angefahren. Die Messdaten, bestehend aus den ermittelten Ebenenpunkten an der Kalibrierlehre, werden in ein txt-File geschrieben und als Kalibrierdatei abgespeichert. Bei jeder neuen Kalibrierung des Systems wird so eine Kalibrierdatei eines neueren Datums erstellt, die dann für die Fahrzeugvermessung genutzt wird.

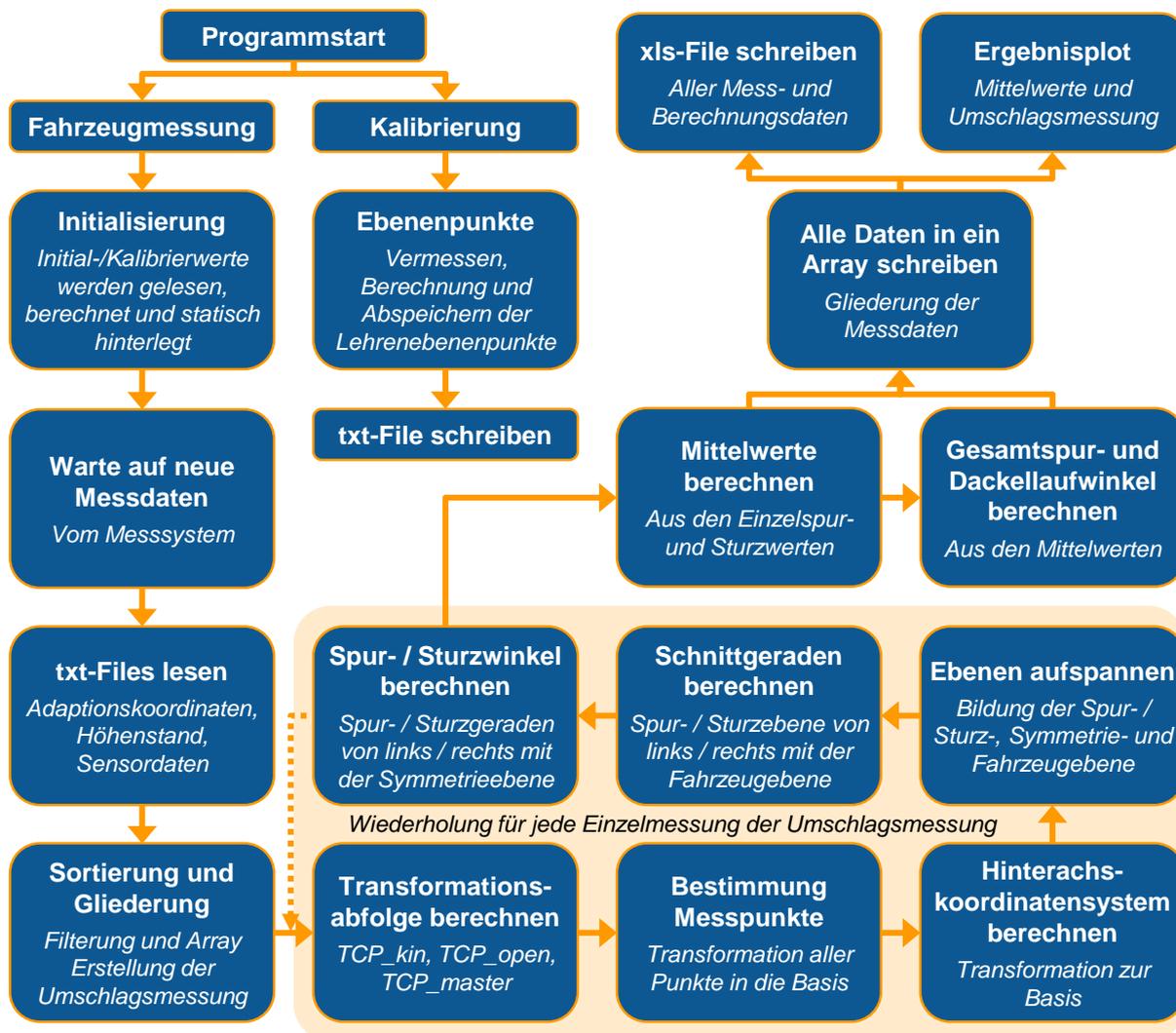
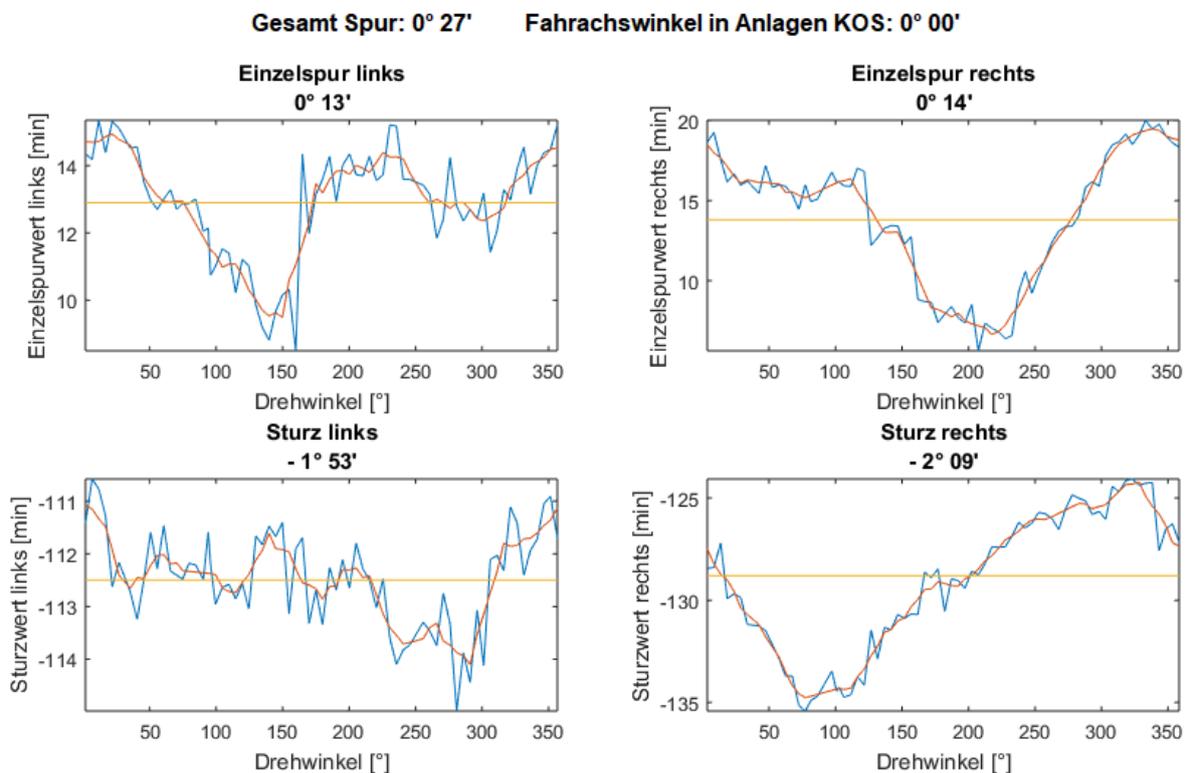


Abbildung 5.18: Übersicht der Programmstruktur für die Berechnung

Bei einer Fahrzeugvermessung wird zum Programmstart als erster Schritt die Initialisierung des Systems durchgeführt. Dabei werden alle statisch hinterlegten Transformationen berechnet und abgespeichert, um einen schnelleren Programmablauf zu realisieren. Auch die TCP\_master Transformation wird aus der zuletzt abgespeicherten Kalibrierdatei mit den Ebenenpunkten und Adaptionskoordinaten erstellt. Im Anschluss daran wartet das Programm auf neue Messdaten von der Anlagensteuerung. Sind neue Messdaten vorhanden, werden die entsprechenden txt-Files eingelesen, die die aktuellen Adaptionskoordinaten, Höhenstand und Ebenenpunkte mit dem dazugehörigen Kopffrotationswinkel enthalten. Nach Gliederung der eingelesenen Daten in Arrays werden die Daten auf fehlende Messwerte und Ausreißer untersucht. Im Anschluss an die Datenfilterung erfolgt der eigentliche Berechnungsablauf. Wie in

der Abbildung 5.18 zu erkennen ist, wird jede Teilmessung aus der gesamten Umschlagmessung in einer Programmschleife komplett berechnet. Für jede ermittelte Radebene wird daher eine volle Berechnung der jeweiligen Fahrwerkgeometrien durchgeführt. Dazu werden als erstes die Transformationsmatrizen für die Bestimmung der primären Koordinatensysteme aus den Messdaten berechnet. Danach werden aus den bestimmten Radebenenpunkten die Normalenvektoren berechnet, transformiert und daraus das Hinterachsen- bzw. Fahrzeugkoordinatensystem gebildet. Innerhalb dieses Koordinatensystems werden die Schnittgeraden der jeweiligen Ebenen bestimmt, aus denen folglich die Spur- und Sturzwerte berechnet werden.

Nach Durchlauf aller Messdaten durch die Programmschleife stehen sämtliche Einzelspur- und Sturzwerte zum entsprechenden Rotationswinkel aus der Umschlagmessung in einem Array zur Verfügung. Im Anschluss an die Filterung der Daten können die Mittelwerte berechnet werden. Parallel dazu können die Gesamspurwinkel, Fahrachs- bzw. Dackellaufwinkel und die Richtungsvektoren der geometrischen Fahrachse berechnet werden. Auch diese Daten entstehen mehrfach bei der Umschlagmessung, aus denen später ein Mittelwert gebildet werden muss. Abschließend werden die Ausgangswerte und die berechneten Daten in ein xls-File geschrieben, um alle Daten für diesen Messvorgang zu sichern. Diese Datei könnte auch von anderen Betriebsmittel-Programmttools zur weiteren Nutzung eingelesen werden. Neben der Erstellung des Trace-Files wird ein Ergebnisplot in Form einer Visualisierung ausgegeben, die in Abbildung 5.19 dargestellt ist.



**Abbildung 5.19: Visualisierung der Messdaten für die Hinterachse in Matlab**

Abbildung 5.19 zeigt die Visualisierung der Messdaten, die in Matlab erstellt wurde. Die Ausgabe wurde dabei für die berechneten Geometrien des betrachteten Radadaptionssystems für eine Hinterachsvermessung erstellt. Dabei enthält die Visualisierung die berechneten Daten aus der Umschlagmessung für die Einzelspur- und Sturzwerte über den Drehwinkel von  $360^\circ$  des Adaptionkopfs. Die blaue Kurve gibt die ungefiltert berechneten Werte wieder, die auch mit Ausreißern behaftet sind. Zur Glättung der Werte über den zeitlichen Verlauf wurde ein gleitender Mittelwertfilter 5. Ordnung verwendet. Die Anwendung dieses Filters auf die Daten ist in der jeweiligen roten Kurve dargestellt. Der daraus berechnete Mittelwert für die Spur- und Sturzwinkel sind durch die orangenen Linien dargestellt. Des Weiteren ist der Mittelwert über den entsprechenden Kurven angegeben. Er entspricht dem finalen Wert, der für das vermessene Fahrzeug ermittelt wurde. Zusätzlich werden noch die Gesamtspur und der Winkel der geometrischen Fahrachse bezogen auf die X-Achse der Anlagenbasis angegeben. Dieser Wert ist anlagenbezogen und wird zur späteren Inbetriebnahme der Umfeldsensoren benötigt.

## 5.6 Validierung des Messprozesses

Nachdem das System durch die Anlagentechnik und der erstellten mathematischen Messalgorithmik in der Lage ist Vermessungen durchzuführen, soll eine Validierung des prototypischen Systems durchgeführt werden. In diesem Unterkapitel wird die Vorgehensweise für die Validierung des Systems durch eine Messsystemanalyse vorgestellt. Anschließend werden der Validierungsaufbau und die möglichen Einflussfaktoren diskutiert. Danach werden die Qualitätsfähigkeitskenngrößen des Messsystems bestimmt und ein Vergleich zum Stand der Technik gezogen.

### 5.6.1 Vorgehensweise für die Validierung des Messprozesses

Um die Validierung des Systems durchzuführen, soll ein bekanntes Verfahren angewendet werden, das auch in der Automobilindustrie Akzeptanz und Anwendung findet. Die Bewertung eines Messsystems durch die Messsystemanalyse (MSA) hat sich seit dem Jahr 1990 etabliert und kontinuierlich durch eigene Firmenrichtlinien der unterschiedlichen OEMs weiterentwickelt. Relevante Firmenrichtlinien im Umfeld der Automobilindustrie stammen von Ford, GM, Mercedes, Bosch etc. und haben in diesen Konzernen weltweit Gültigkeit. [DIE11] Parallel dazu hat der Verband der Automobilindustrie (VDA) 13 Jahre später den Band 5 „Prüfprozesseignung“ herausgegeben [VDA10]. Basierend auf dem VDA Band 5 wurde 2012 seitens der International Standard Organisation (ISO) die Norm ISO 22515-7 „Capability of Measurement Processes“ veröffentlicht [DIE15b].

Prinzipiell ist die Vorgehensweise zur Beurteilung des verwendeten Messsystems bzw. Messprozesses bei der MSA anhand der Firmenrichtlinien und dem VDA Band 5 sehr ähnlich. Es werden unter realen Gegebenheiten Untersuchungen durchgeführt, die Messwerte grafisch und numerisch analysiert, Kennwerte bestimmt und diese mit vorgegebenen Grenzwerten verglichen. Anhand dieser Bewertung wird eine Entscheidung über die Fähigkeit bzw. Eignung

getroffen. Der Unterschied liegt in der Berechnung der Kennwerte und der Anzahl der berücksichtigten Einflussgrößen, die während der Messung wirken. [DIE11] Die MSA muss vor Inbetriebnahme neuer Messsysteme durchgeführt werden. Darüber hinaus sollte sie durchgeführt werden, falls das Messsystem wesentlich verändert wurde. Dies kann zum Beispiel nach Neuaufrüstung an einem anderen Ort sowie beim Wechsel von beeinflussenden Komponenten der Fall sein. [DIE02] Mit der MSA wird dabei geprüft, ob die verwendeten Messmittel und Messsysteme den Anforderungen an den Messprozess gerecht werden. Um fehlerhafte Interpretationen zu vermeiden, müssen die gemessenen Werte den realen Sachverhalt ausreichend sicher wiedergeben. [DIE17]

Vor dem ersten Versuchsbeginn ist eine Funktionsprobe mit einem Messobjekt zur Überprüfung der Funktionalität des Systems durchzuführen. Nach der Überprüfung wird Verfahren 1 zur Ermittlung der Prüfmittelfähigkeit angewendet. Als Ergebnis des ersten Verfahrens erhält man die Fähigkeitsindizes. Die Prüfmittelfähigkeitsuntersuchung bewertet vor allem die kombinierte Auswirkung von Genauigkeit  $c_{gk}$  und Wiederholbarkeit  $c_g$ . Die Untersuchung wird dabei an der Kalibrierlehre des Radadaptionssystems durchgeführt, um ein einheitliches Prüfobjekt sicherzustellen. Dadurch entsteht keine Beeinflussung des Messsystems durch das Messobjekt Fahrzeug. Weiterhin muss gewährleistet werden, dass die Lehre während der gesamten Untersuchung immer die gleiche Orientierung hat und der Versuch möglichst in einer realen Produktionsumgebung stattfindet. [BRU16, S. 267f.] Des Weiteren stehen, wie schon beschrieben, unterschiedliche Berechnungsverfahren je nach OEM oder Automobilverbänden zur Verfügung. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht der verschiedenen Berechnungsvarianten für die Bewertung der Prüfmittelfähigkeit.

**Tabelle 5.1: Vergleich der Berechnungsarten für die Prüfmittelfähigkeit [BAN17, S. 236]**

Firma, Verfahren	Formel $c_g$	Formel $c_{gk}$	Ergebnis $c_g / c_{gk}$
▪ MSA 3: 2002	$\frac{0,2 \cdot T}{5,15 \cdot s_g}$	$\frac{0,1 \cdot T - Bi}{2,575 \cdot s_g}$	$\geq 1,33$
▪ GM ▪ Bosch ▪ MSA 4: 2010	$\frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_g}$	$\frac{0,1 \cdot T - Bi}{3 \cdot s_g}$	$\geq 1,33$
▪ BMW ▪ Q-DAS GmbH ▪ VW / Audi ▪ VDA 5: 9.2010	$\frac{0,2 \cdot T}{4 \cdot s_g}$	$\frac{0,1 \cdot T - Bi}{2 \cdot s_g}$	$\geq 1,33$
▪ Ford	$\frac{0,15 \cdot T}{6 \cdot s_g}$	$\frac{0,075 \cdot T - Bi}{3 \cdot s_g}$	$\geq 1$

Um im folgenden Verlauf dieser Arbeit die Prüfmittelfähigkeit zu bestimmen, wurde das Berechnungsverfahren nach dem VDA Band 5 gewählt, das auch bei führenden OEMs wie BMW, Daimler und dem VW Konzern Anwendung findet. Die Formeln für die Berechnung der Fähigkeitsindizes  $c_g$  und  $c_{gk}$  können daher der Tabelle 5.1 entnommen werden. Zur Durchführung

der Berechnung müssen unter anderem der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung aus den ermittelten Versuchsmesswerten bestimmt werden. Das kann mit den Formeln 29 erfolgen.

$$\bar{x}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2} \quad (29)$$

- $\bar{x}_g$  : Arithmetischer Mittelwert
- $x_i$  : Merkmalswert
- $s_g$  : Standardabweichung
- $n$  : Umfang der Stichprobe

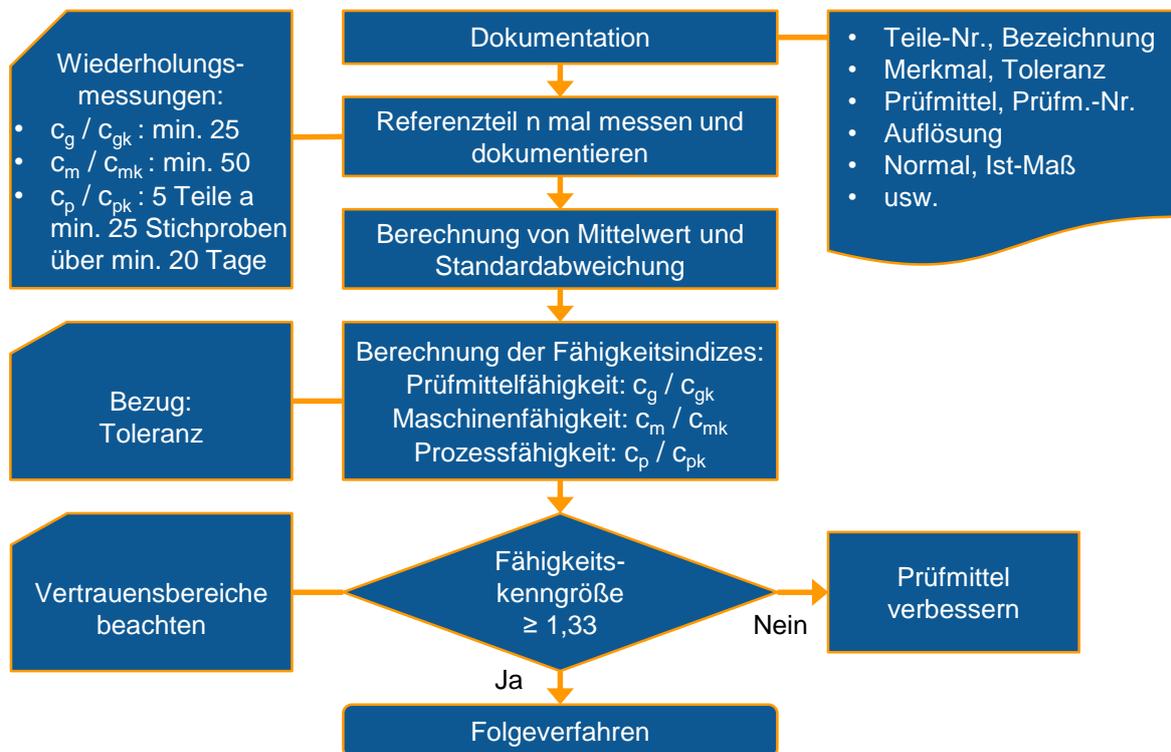
Neben dem Mittelwert und der Standardabweichung der Messprobendaten ist auch der festgelegte Toleranzbereich von Bedeutung. Er definiert sich über die obere und untere Spezifikationsgrenze, die sich beispielsweise aus dem Einstellfenster für die Einstellung bzw. Kalibrierung der Fahrzeugsysteme ergibt. Parallel dazu ist die systematische Messabweichung zu bestimmen, die für die Ermittlung des  $c_{gk}$  Werts benötigt wird. Sie ergibt sich aus der Differenz des Mittelwerts zu dem vorliegenden Istwert der Kalibrierlehre. Diese Werte können mit den Formeln 30 bestimmt werden.

$$B_i = |\bar{x}_g - x_m| \quad T = OSG - USG \quad (30)$$

- $B_i$  : Systematische Messabweichung
- $x_m$  : Istmaß des Kalibriernormals
- $T$  : Toleranzbereich
- $OSG$  : Obere Spezifikationsgrenze
- $USG$  : Untere Spezifikationsgrenze

Der Messprobenablauf ist in Abbildung 5.20 für die Bestimmung aller Fähigkeitskenngrößen allgemein dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass eine definierte Anzahl an Messobjekten und Stichproben je nach Verfahren berücksichtigt werden muss. Bei allen in dieser Arbeit berechneten Fähigkeitsindizes muss ein Wert größer 1,33 erreicht werden, damit die Fähigkeit bzw. Eignung des Systems nachgewiesen ist. [BRU16] Nach Untersuchung der Prüfmittelfähigkeit wird im nächsten Schritt die Prüfsystemstreuung mit Verfahren 2 oder 3 ermittelt. Verfahren 2 ermittelt die Anteile aus der Wiederholpräzision (EV) und der Vergleichspräzision (AV). Bei eindeutig nicht durch Bediener beeinflussbaren Messsystemen wie es beim Radadaptionssystem der Fall ist, wird nur das Verfahren 3 durchgeführt, das die Wiederholpräzision ermittelt. [DIE15a]

Um parallel dazu die geforderten Qualitätsansprüche des Systems zu gewährleisten, ist auch die Prozessfähigkeitsuntersuchung relevant. Die hierzu berechneten Kennzahlen geben an, mit welcher Sicherheit die geforderten Spezifikationen des Gesamtprozesses erreicht werden. Dabei gibt es mehrere Arten zur Fähigkeitsbewertung des Produktionssystems. Die Maschinenfähigkeitsuntersuchung oder auch die Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung genannt liefert eine erste Aussage über die Systemfähigkeit. Sie wird in der finalen Produktionsumgebung direkt nach der Inbetriebnahme des Systems durchgeführt. Dabei werden die Fähigkeitsindizes  $c_m$  und  $c_{mk}$  ermittelt. Die Langzeit-Prozessfähigkeitsuntersuchung hingegen dient der Beurteilung des laufenden Produktionsprozesses über einen längeren Zeitraum. Dadurch sollen alle relevanten Streuungsfaktoren des Prozesses erfasst werden. Das Ergebnis wird über die Indizes  $c_p$  und  $c_{pk}$  ausgegeben. Das Prinzip der Verfahrensweise und die Berechnung sind bei beiden Fähigkeitsuntersuchungen identisch, jedoch unterscheiden sich die Anzahl der zu messenden Teile und der Zeitraum der entnommenen Stichproben. [BRU16, S. 221–224] Die Unterschiede sind in Abbildung 5.20 dargestellt.



**Abbildung 5.20: Vorgehensweise für die Bestimmung der jeweiligen Fähigkeitskenngrößen [DIE15a]**

Bei der folgenden Validierung des Radadaptionssystems kann hinsichtlich des Prozesses nur die Maschinenfähigkeitsuntersuchung durchgeführt werden, da es sich um ein Prototypsystem in einer Modellfabrik handelt. Dabei sind mindestens 50 Wiederholungsmessungen an darauf folgenden Fahrzeugen durchzuführen. Da in der Modellfabrik nur zwei Fahrzeuge zur Verfügung stehen, wurde das Verfahren so geändert, dass jeweils zwei Untersuchungen für je ein Fahrzeug durchgeführt worden sind. Die Fahrzeuge wurden dabei jeweils 100-mal nacheinander vermessen. Des Weiteren wurde nach jeder Vermessung das Fahrzeug aus der Anlage

herausgefahren und anschließend für die Vermessung neu gerüstet. Eine weiterführende Untersuchung ist aufgrund des aktuellen Aufbaus nicht möglich, da eine Langzeit-Prozessfähigkeitsuntersuchung wegen der fehlenden Produktion über mehrere Tage in der Modellfabrik nicht realisiert werden kann. Um die Fähigkeit der kurzzeitigen Maschinenfähigkeit zu bestimmen, können die Indizes nach den Formeln 31 berechnet werden.

$$c_m = \frac{OSG - USG}{6 \cdot s_g} \quad c_{mk} = \min(c_{mko}; c_{mku}) \quad (31)$$

$c_m$  : Wiederholbarkeit der Maschinenfähigkeitskenngröße

$c_{mk}$  : Genauigkeit der Maschinenfähigkeitskenngröße

Mit der ersten Formel lässt sich die Maschinenfähigkeit  $c_m$  als Verhältnis der vorgegebenen Toleranzbreite zur Prozessstreuung ermitteln. Die Maschinenfähigkeitskenngröße  $c_{mk}$  berücksichtigt die Lage des Mittelwertes aller Einzelstichproben gegenüber den vorgegebenen Toleranzgrenzen. Dazu muss der obere  $c_{mko}$  und untere  $c_{mku}$  Kennwert mit den Formeln 32 ermittelt werden. Der Kennwert mit dem kleineren Abstand zur Toleranzgrenze entspricht der Maschinenfähigkeitskenngröße  $c_{mk}$ . [BRU16, S. 223]

$$c_{mko} = \frac{OSG - \bar{x}_g}{3 \cdot s_g} \quad c_{mku} = \frac{\bar{x}_g - USG}{3 \cdot s_g} \quad (32)$$

$c_{mko}$  : Genauigkeit-Obergrenze der Maschinenfähigkeitskenngröße

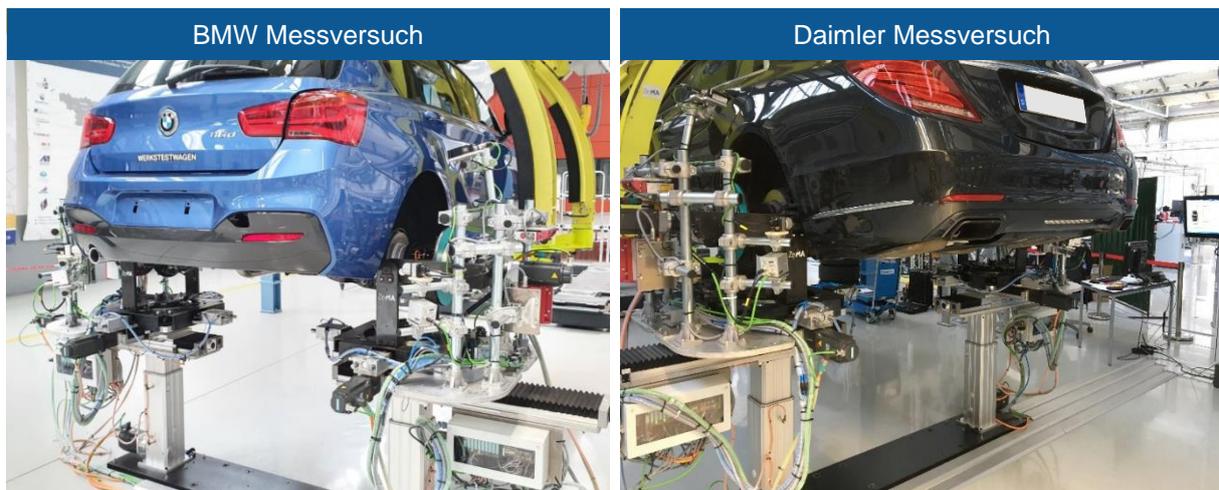
$c_{mku}$  : Genauigkeit-Untergrenze der Maschinenfähigkeitskenngröße

Auch die Kennwerte der Maschinenfähigkeit müssen einen Wert von mindestens 1,33 erreichen, um die Eignung des Radadaptionssystems nachzuweisen. Bei diesem Wert besteht ein minimaler Ausschussanteil. Zum Nachweis einer sehr guten Fähigkeit muss ein Wert von mindestens 1,67 erreicht werden, bei dem statistisch kein Ausschuss mehr existiert. [BRU16, S. 227] Abschließend zu den Fähigkeitsuntersuchungen der MSA wird ein Audit des Radadaptionssystems zu Betriebsmitteln des Status Quo durchgeführt. Dadurch kann ein Vergleich über die Genauigkeiten der unterschiedlichen Betriebsmittel gezogen werden. Parallel dazu können eventuelle Fehlereinflussquellen des Systems aus den Versuchsmessdaten ermittelt und den entsprechenden Systemkomponenten zugeordnet werden.

### 5.6.2 Testaufbau für die Validierung des Systems

Zur Durchführung der Systemvalidierung wurden unterschiedliche Messaufbauten gewählt. Für die Ermittlung der Prüfmittelfähigkeit befindet sich die Kalibrierlehre im Radadaptionssystem. Der Unterschied zur Kalibrierfahrt besteht jedoch darin, dass das System bereits kalibriert ist und die Messungen an der Kalibrierlehre wie an einem Fahrzeug durchgeführt werden, um

die Fähigkeitskenngröße zu bestimmen. Neben den Messungen an der Lehre wurde zur Bestimmung des Verfahrens 3 der MSA und der Maschinenfähigkeitsuntersuchung ein realer Produktionsbetrieb nachgestellt. Dazu wurden mit dem prototypischen Radadaptionssystem in der Modellfabrik Fahrzeuge in der Fördertechnik der Montagelinie vermessen. Abbildung 5.21 zeigt die Versuchsmessungsaufbauten, die für ein BMW 1er und ein Daimler S-Klasse Testfahrzeug erstellt worden sind. Die beiden Fahrzeuge wurden unter gleichen Bedingungen mit dem Radadaptionssystem vermessen. Neben den unterschiedlichen Achslasten besitzen beide Fahrzeuge eine Mehrlenkerachse, an denen sowohl die Spur als auch der Sturz eingestellt werden kann. Der Daimler besitzt zusätzlich ein Luftfederungssystem, während der BMW mit Standard-Stahlfedern ausgestattet ist.

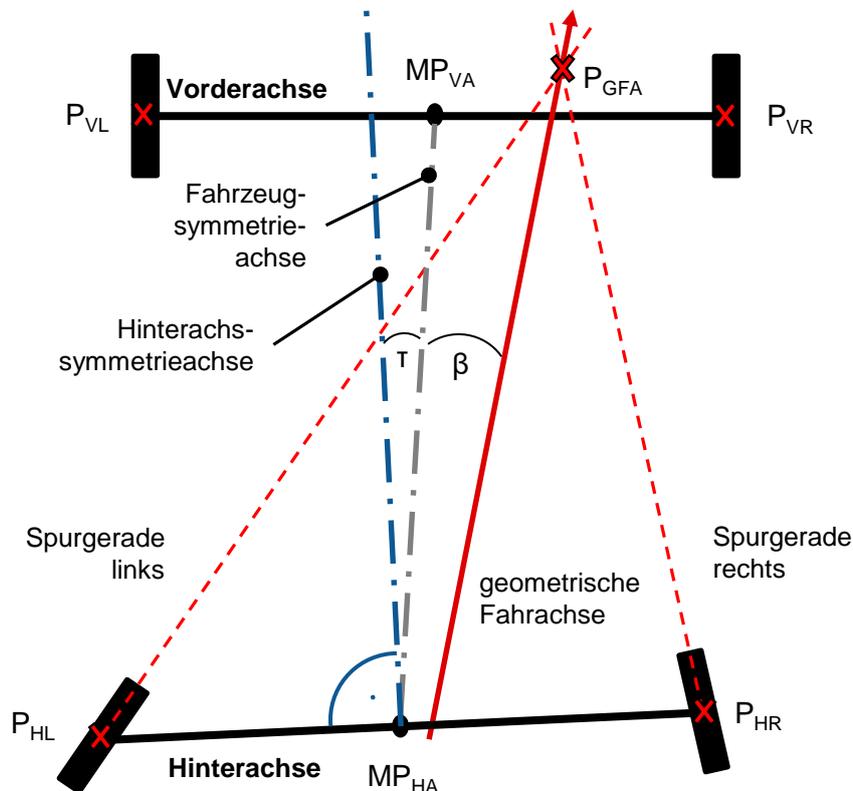


**Abbildung 5.21: Versuchsaufbauten für die Messsystemanalyse**

Da das zu validierende Radadaptionssystem ein einachsiges System für eine Fahrzeughinterachse ist, ist beim Vergleich zu bestehenden Betriebsmitteln für eine Vermessung an beiden Achsen eine Besonderheit zu beachten. Das prototypische Radadaptionssystem kann die Einzelspurwinkel der Hinterachse und den Dackellaufwinkel  $\beta$  aufgrund der nicht vermessenen Vorderachse nur zur Hinterachssymmetrieachse bestimmen. Ein Fahrwerkstand im EOL bestimmt diese Winkel zur Fahrzeugsymmetrieachse, die sich zwischen den Mittelpunkten der Hinterachse  $MP_{HA}$  und Vorderachse  $MP_{VA}$  ergibt. Bedingt durch den toleranzbehafteten Verbau der Achsen im Fahrzeug zueinander müssen diese Symmetrieachsen nicht deckungsgleich sein. Beide entspringen bzw. verlaufen jedoch durch den Mittelpunkt der Hinterachse.

Wie die Abbildung 5.22 zeigt, kann zwischen der Fahrzeug- und Hinterachssymmetrieachse ein Differenzwinkel  $\tau$  entstehen. Um im weiteren Validierungsverlauf des aktuellen Radadaptionssystems einen Vergleich zu Messdaten eines Auditprüfstands des EOLs ziehen zu können, müssen die Daten vergleichbar sein. Aus diesem Grund muss der Winkel  $\tau$  für jedes Testfahrzeug ermittelt werden, um die gemessenen Einzelspurwinkel der Hinterachse und den Dackellaufwinkel dem Wert entsprechend korrigieren zu können. Dann können die Betriebsmittel untereinander verglichen werden. Da sich nach dem Verbau der Achsen ihre Orientierung und Lage zueinander nicht mehr verändern kann, sind die Symmetrieachsen fest definiert. Daher

ist lediglich eine Ermittlung des Differenzwinkels  $\tau$  für jedes Testfahrzeug zu Beginn der Validierung vorzunehmen.



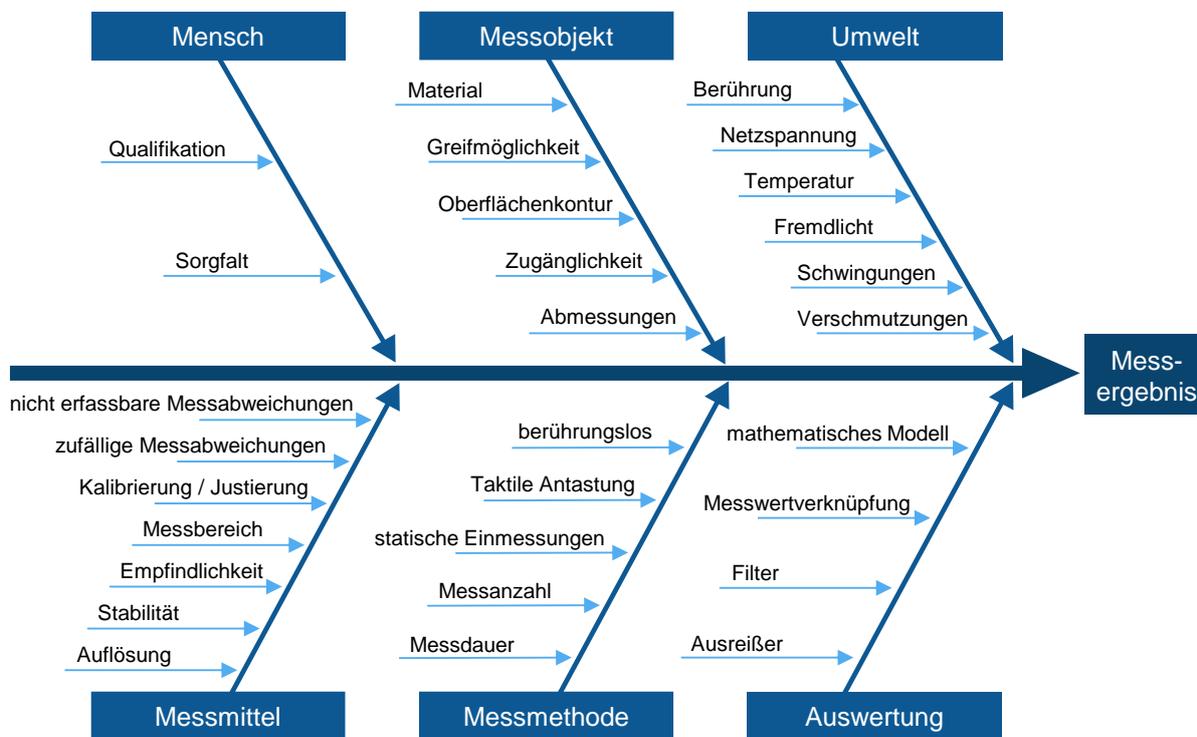
**Abbildung 5.22: Unterscheidung zwischen der Hinterachs- und Gesamtvermessung**

Um den jeweiligen Differenzwinkel zwischen den Symmetrieachsen zu bestimmen, werden mit dem Lasertracker an einem ortsfesten positionierten Fahrzeug die vier Radmittelpunkte  $P_{HL}$ ,  $P_{HR}$ ,  $P_{VL}$  und  $P_{VR}$  vermessen. Aus diesen vier bestimmten Punkten im Lasertrackerkoordinatensystem können die jeweiligen Achsmittelpunkte an Hinterachse und Vorderachse berechnet werden. Anschließend kann der Vektor für die Fahrzeugsymmetrieachse zwischen den Achsmittelpunkten errechnet werden. Danach kann der Vektor für die Hinterachssymmetrieachse ermittelt werden, der im rechten Winkel aus dem Mittelpunkt der Hinterachse herausstößt. Nach Ermittlung der beiden Vektoren kann zwischen ihnen der Differenzwinkel  $\tau$  bestimmt werden. Dazu können die Formeln benutzt werden, die bereits in Kapitel 5.4 vorgestellt wurden.

### 5.6.3 Untersuchung der Umweltfaktoren und Auswirkungen auf die Anlagenparameter

Da alle Prüfmittel und Prüfeinrichtungen ein gewisses Maß an Fehlern und Messunsicherheiten aufweisen, muss ermittelt werden, wodurch eine eventuell verursachte Messwertstreuung entsteht. Das ist insbesondere vor einer Validierung eines Systems abzuschätzen, um systematische Einflussfaktoren auf das Messergebnis zu identifizieren und auszuschließen. Zur Visualisierung dieser Einflussfaktoren dient ein Ishikawa-Diagramm. Damit werden in diesem

Fall Ursachen aufgezeigt, die das Messergebnis maßgeblich beeinflussen könnten. Ein solches Diagramm wurde für das Radadaptionssystem in Abbildung 5.23 erstellt. Dabei sind die sechs Haupteinflussgrößen zu erkennen, die durch die Umwelt, das Messobjekt, das Messmittel, die Messmethode, die Auswertung und in geringen Maßen auch durch den Menschen entstehen können. Da das Adaptionssystem vollständig automatisiert ist, entstehen dabei lediglich Einflüsse bei der Bedienung durch das Personal.



**Abbildung 5.23: Darstellung der Messergebniseinflüsse mittels Ishikawa-Diagramm**

Größere Einflüsse bestehen durch das Messmittel und die damit verbundene Messmethode. Die Sensoren, die auf dem Adaptionssystem verbaut sind, müssen eingemessen und kalibriert werden. Dadurch können indirekte Beeinflussungen entstehen. Im Zusammenhang damit ist auch die Auswertung relevant, die durch den Messalgorithmus durchgeführt wird. Aus diesem Grund muss eine korrekte Messwertfilterung und Ausreißerererkennung gewährleistet sein. Des Weiteren ist das Ergebnis von der Greifmöglichkeit durch das Dehnungsgreifersystem abhängig, das beispielsweise bei Abnutzung eine Messwertstreuung hervorruft, wie bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben wurde. Auch eventuelle mechanische Beschädigungen am Adaptionssystem und dessen Messfläche wirken sich negativ auf das Ergebnis aus. Diese Ursachen betreffen das Messobjekt selbst.

Die größten Einflüsse die nicht direkt durch die Systemkomponenten oder das Messobjekt entstehen, sind die umweltbedingten Ursachen, die innerhalb der Produktionsumgebung auftreten können. Diese Ursachen müssen während des Messbetriebs überwacht und ausgeschlossen werden. Dabei sind vor allem die Punkte der Verschmutzung und Fremdlicht zu nennen, damit die Messwerte der optischen Sensorsysteme nicht verfälscht werden. Alle möglichen Ursachen wurden in einem Testlauf des Radadaptionssystems überprüft und dabei

keine systematischen Messabweichungen festgestellt. Daher wurden nachfolgend die Versuchsmessungen für die Verfahren der MSA durchgeführt.

### 5.6.4 Bewertung der Prüfmittelfähigkeit

Zur Untersuchung des prototypischen Radadaptionssystems auf seine Eignung für das besagte Vorhaben werden in einem ersten Schritt die Messversuche zur Ermittlung der Fähigkeitsindizes der Prüfmittelfähigkeit durchgeführt. Bei Durchführung der Untersuchung wird das bekannte Normal mit dem zu untersuchenden Prüfmittel bzw. Prüfverfahren wiederholt gemessen. Das Normal stellt die Kalibrierlehre des Systems dar, die in das System eingelegt und ortsfest über Positionierzylinder fixiert wird. Wie bereits in der Vorgehensweise dargestellt wurde, sind mindestens 25 Messungen für den Versuch an der Kalibrierlehre erforderlich. In der Fahrzeugindustrie ist die Anzahl der Messungen zur Berechnung der Prüfmittelfähigkeit üblicherweise auf 30 eingestellt. Das wurde auch bei diesem Versuch übernommen. Die anschließende komplette Datenauswertung je Messgröße ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Eine vollständige grafische Auswertung ist für die relevanten Spurdaten im Anhang beigefügt.

**Tabelle 5.2: Gesamtauswertung der Prüfmittelfähigkeitsbewertung**

Verfahren 1 $c_g / c_{gk}$	Spur Links	Spur Rechts	Gesamspur	Sturz Links	Sturz Rechts
Mittelwert gesamt ( $x_g'$ )	-1,533622	20,071454	18,537832	-2,237638	-5,808726
Ist-Wert ( $x_m'$ )	-1,5	20	18	-2	-6
Bias ( $B_i'$ )	0,466378	0,071454	0,537832	0,237638	0,191274
Max gesamt ( $'$ )	-1,46514	20,15466	18,64488	-2,14362	-5,68356
Min gesamt ( $'$ )	-1,63722	19,99302	18,40044	-2,33646	-5,9496
Reproduzierbarkeit ( $r_p'$ )	0,17208	0,16164	0,24444	0,19284	0,26604
Standardabweichung ( $s_g'$ )	0,035540982	0,040285298	0,060368024	0,044799632	0,069982658
$c_g$	19,69557273	17,37606602	11,59554272	15,62512818	10,00247805
$c_{gk}$	19,2226	16,48921643	7,140932771	12,9728966	8,635896627
2 Sigma ( $'$ )	0,071081964	0,080570596	0,120736048	0,089599265	0,139965316
4 Sigma ( $'$ )	0,142163929	0,161141193	0,241472095	0,17919853	0,279930632

Die Datenauswertung in Tabelle 5.2 wurde für jede Erfassungsgröße der Einzelspuren links/rechts, Gesamspur und Sturz links/rechts berechnet. So kann jede Messgröße aus dem

Versuch individuell beurteilt werden. In der Tabelle sind sämtliche Merkmalsgrößen und berechnete Größen dargestellt. Der Toleranzbereich für die Auswertung wurde auf ein für die Hinterachse typisches Spureinstellfenster von 14 Winkelminuten gewählt. Dadurch entspricht die untere und obere Spezifikationsgrenze jeweils 7 Winkelminuten. Für diesen gewählten Toleranzbereich liegen die berechneten Fähigkeitsindizes über dem Vertrauenswert von 1,33. Da die Werte sogar alle über 7 liegen, gibt es statistisch gesehen keine schlechten Messungen. Betrachtet man die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Messwert aus der Versuchsmessreihe, dann erhält man die Reproduzierbarkeit, die im Worst Case auftreten kann. Sie liegt bei den Spurgößen bei maximal 0,25 Winkelminuten, was einem besseren Wert als den geforderten 0,4 Winkelminuten der Anforderungen entspricht.

### 5.6.5 Bewertung der Maschinenfähigkeit

Neben der Prüfmittelfähigkeit wird nachstehend die Maschinenfähigkeit bewertet, um eine Aussage über den Messprozess unter realen Produktionsbedingungen zu erhalten. Für den Versuch sind mindestens 50 Messungen an aufeinander folgenden Fahrzeugen in der Montagelinie durchzuführen. Da dies in der Modelllandschaft nicht umsetzbar ist, wurde die Ermittlung so abgewandelt, dass die Fähigkeitsindizes für je ein Testfahrzeug ermittelt wurden. An jedem Testfahrzeug wurden dazu 100 Messungen immer wieder erneut durchgeführt. Die 100 Wiederholungsmessungen zur Ermittlung der Maschinenfähigkeit sind dabei als gängiger Wert üblich. Die Tabelle 5.3 zeigt die Datenauswertung für das Testfahrzeug von BMW und Tabelle 5.4 für das von Daimler.

**Tabelle 5.3: Gesamtauswertung der Maschinenfähigkeitsbewertung - BMW**

BMW $C_m / C_{mk}$	Spur Links	Spur Rechts	Gesamspur	Sturz Links	Sturz Rechts
Mittelwert gesamt ( $x_g'$ )	3,305053333	3,549923833	6,854977167	-45,21802583	-53,42856183
Sollwert ( $x_s'$ )	3	3,5	7	-45	-53
Reproduzier- barkeit ( $r_p'$ )	1,17395	1,75805	1,140516667	2,126908333	1,783608333
Standardab- weichung ( $s_g'$ )	0,255452318	0,307481341	0,223574357	0,406288481	0,410335325
$C_m$	9,13412473	7,588536362	10,43649802	5,743045752	5,686406197
$C_{mk}$	8,736068274	7,534415102	10,22027937	5,564169704	5,338266674
$C_{mko}$	8,736068274	7,534415102	10,65271666	5,9219218	6,034545721
$C_{mku}$	9,532181187	7,642657623	10,22027937	5,564169704	5,338266674

Auch bei diesen Versuchsmessungen wurde eine Auswertung je Testfahrzeug und je Messgröße durchgeführt, wie die beiden Tabellen zeigen. Eine vollständige grafische Auswertung der relevanten Spurdaten der beiden Fahrzeuge ist im Anhang beigefügt. Der Toleranzbereich wurde ebenfalls mit 14 Winkelminuten bewertet. Das entspricht wiederum einer oberen und einer unteren Spezifikationsgrenze von 7 Winkelminuten. Neben dem berechneten arithmetischen Mittelwert und der Standardabweichung über die jeweils 100 Messungen ist der Sollwert, der am Fahrzeug vorliegt, angegeben. Parallel dazu wurde aus der Differenz des minimalen und maximalen Messwerts eine Worst Case Ermittlung der Reproduzierbarkeit für die Messgrößen erstellt. Dabei wird ersichtlich, dass bei der Messung am Fahrzeug größere Streuungen als an der starren und ortsfesten Kalibrierlehre auftreten. Diese Messwertstreuungen kommen teilweise durch das Messobjekt selbst zu Stande, da die Elastokinematik des Fahrwerks diese negativ beeinflusst.

**Tabelle 5.4: Gesamtauswertung der Maschinenfähigkeitsbewertung - Daimler**

Daimler $c_m / c_{mk}$	Spur Links	Spur Rechts	Gesamspur	Sturz Links	Sturz Rechts
Mittelwert gesamt ( $x_g'$ )	13,105576	13,65399725	26,75957325	-112,5872473	-128,858578
Sollwert ( $x_s'$ )	13,2	13,2	27	-110	-127
Reproduzier- barkeit ( $r_p'$ )	1,718841667	1,34775	1,385858333	1,123875	1,5372
Standardab- weichung ( $s_g'$ )	0,286881187	0,293606781	0,2477482	0,262267874	0,307533772
$c_m$	8,133448414	7,947137064	9,418164611	8,89675619	7,58724258
$c_{mk}$	8,023735166	7,431711582	9,094681939	5,608454943	5,572745132
$c_{mko}$	8,243161661	7,431711582	9,741647284	12,18505744	9,601740029
$c_{mku}$	8,023735166	8,462562545	9,094681939	5,608454943	5,572745132

Trotz des schlechteren Werts der Reproduzierbarkeit liegen die Spurwerte bei maximal 1,8 Winkelminuten. Da gemäß Anforderungen bis zu 2 Winkelminuten toleriert werden, ist auch dieses Merkmal erfüllt. Die Reproduzierbarkeitswerte des Sturzes unterliegen Streuungen über 2 Winkelminuten. Das ist jedoch zulässig, da diese Messwerte stark vom Fahrzeughöhenstand abhängig und auch größer als die Spurwerte toleriert sind. Um die Eignung des Radadaptionssystems für den Messprozess nachzuweisen, spielen die Fähigkeitsindizes eine noch essenziellere Rolle. Wie anhand der beiden Tabellen zu erkennen ist, liegen die Werte für die Spurgößen mindestens über 7 und für die Sturzgrößen mindestens über 5. Daher ist auch nachgewiesen, dass das System prozessfähig ist und statistisch gesehen keine NIO-Messungen produziert. Diese Aussage betrifft, wie schon in der Vorgehensweise dargestellt, nur die kurzfristige Eignung des Adaptionssystems bzw. des Messprozesses. Eine langfristige

Eignung muss innerhalb des späteren Serienbetriebs über längere Produktionszeiten und Stichproben nachgewiesen werden.

### 5.6.6 Vergleich der Messgenauigkeit unter aktuellen Prüfmitteln

Neben den Fähigkeitsuntersuchungen der MSA konnte zusätzlich ein Prüfmittelvergleich durchgeführt werden. Er ist zwar kein Bestandteil der MSA, da die Genauigkeiten des Systems bereits durch die Fähigkeitsindizes bestimmt wurden, er dient aber dem Vergleich des Radadaptionssystems zu Prüfständen des Status Quo. Dadurch wird weiterhin eine erhöhte Akzeptanz bei den OEMs erwirkt, sollte das Radadaptionssystem vergleichbare Messwerte zu den aktuellen Technologien erreichen. Der Vergleich wurde mit dem Testfahrzeug Daimler S-Klasse vorgenommen. Dazu wurde das Fahrzeug im Werk Sindelfingen auf dem dortigen Fahrwerkstand für die Serienproduktion im EOL vermessen. Zusätzlich wurde eine Vermessung des Testfahrzeugs auf dem Auditfahrwerkstand vorgenommen. Dieser dient im Werk als Masterprüfstand für Auditierungen und für eventuelle Nacharbeit.

Nach den Vermessungen wurde das Testfahrzeug von Sindelfingen zum ZeMA nach Saarbrücken transportiert, ohne Änderungen am Fahrwerk vorzunehmen. In der Modellfabrik am ZeMA wurde das Fahrzeug in die Fördertechnik der Montagelinie aufgenommen und mit dem prototypischen Radadaptionssystem vermessen. Da das System nur die Hinterachse vermisst, mussten zum Vergleich die Einzelspurwerte, wie im Kapitel 5.6.2 beschrieben, umgerechnet werden. Im Anschluss an die Versuchsmessungen in der Montagelinie wurde das Fahrzeug auf einem aktuellen Werkstattfahrwerkstand vermessen. Dieser ist ebenfalls am ZeMA vorhanden und stellt einen der aktuellen Prüfstands-Generationen für den Werkstattbereich dar. Auch in manchen Nacharbeitsbereichen bei OEMs ist dieser Prüfstand anzutreffen. Die Auswertung der Messergebnisse ist in Tabelle 5.5 dargestellt.

**Tabelle 5.5: Prüfmittelvergleich zur Messgenauigkeit**

Daimler Prüfmittelvergleich	Radadaptionssystem	Auditfahrwerkstand	Produktionsfahrwerkstand	Werkstattfahrwerkstand
<b>Fahrzeugniveau Antriebswellenwinkel</b>	Links : - 2,1° Rechts : - 2,1°	Links : - 2,2° Rechts : - 2,2°	Wert nicht vorhanden	Links : - 1,9° Rechts : - 1,8°
<b>Spur</b>	Gesamt : + 26,8' Links : + 13,1' Rechts : + 13,7'	Gesamt : + 27' Links : + 13,2' Rechts : + 13,2'	Gesamt : + 26,7' Links : + 13,2' Rechts : + 12,6'	Gesamt : + 16' Links : + 10' Rechts : + 06'
<b>Fahrachswinkel</b>	0'	0'	0'	- 2'
<b>Sturz</b>	Links : - 113' Rechts : - 129'	Links : - 110' Rechts : - 127'	Links : - 110' Rechts : - 104'	Links : - 123' Rechts : - 134'

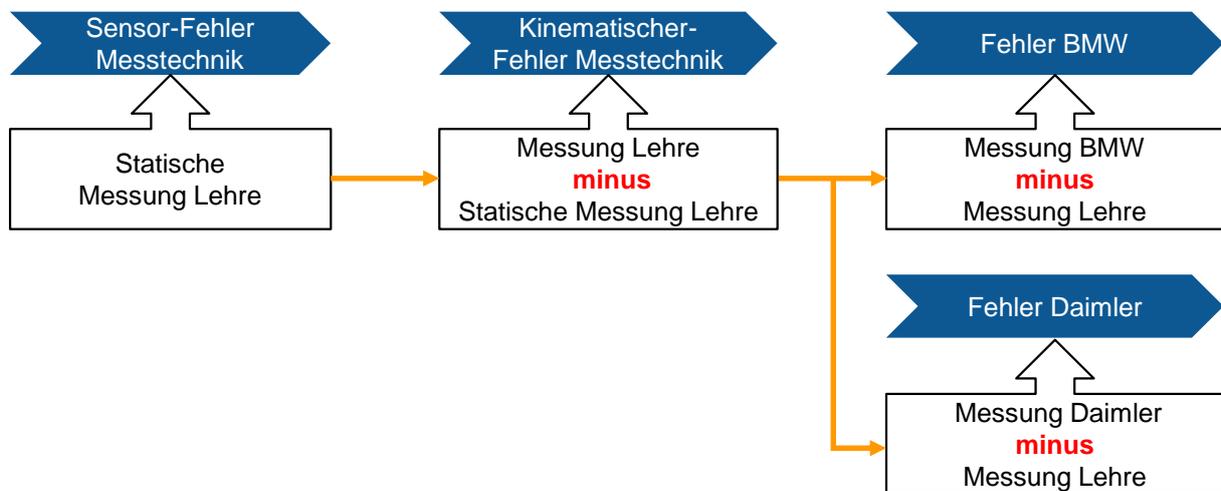
Die Tabelle wurde entsprechend nach den Prüfständen und den Messgrößen gegliedert. Die Messgröße Antriebswellenwinkel ist ein daimlerspezifischer Wert, der für das jeweilige Fahrzeugmodell auf den Fahrzeughöhenstand umgerechnet werden kann. Dieser Wert wird mit einem Messgerät direkt an den Antriebswellen gemessen und dient in der Produktion nur zu Auditierungen des Höhenstands. In der Serienproduktion kann dieser Wert nicht erfasst werden. Dort wird der Höhenstand über die Kotflügelkanten ermittelt. Die von den Prüfständen ermittelten Daten sind die Spurwerte und der daraus berechnete Winkel zwischen Fahrachse und Symmetrieachse des Fahrzeugs. Der Sturz ist zwar für die angestrebte Aufgabe des Radadaptionssystems keine essenzielle Größe, wurde aber auch bei den Vergleichsmessungen ermittelt.

Beim Vergleich der Messergebnisse aus Tabelle 5.5 ist zu erkennen, dass die Werte zwischen dem Radadaptionssystem und dem Daimler Auditfahrwerkstand fast identisch sind. Die Differenzen im Spurbereich betragen maximal 0,5 Winkelminuten und maximal 3 Winkelminuten beim Sturz. Das zeigt, dass nicht nur die Eignung des Radadaptionssystems erfüllt ist, sondern auch die Vergleichbarkeit zu den Prüfständen des heutigen EOLs gegeben ist. Die geringfügigen Abweichungen zwischen Audit- und Serienfahrwerkstand bei Daimler lassen auf einen nicht korrekten Höhenstand bzw. eine Verkipfung des Fahrzeugs bei der Vermessung schließen. Das zeigt wiederum, dass in der Serienproduktion aktuell keine Kontrollmechanismen vorhanden sind, diese Inbetriebnahmeprozesse abzusichern. Der abschließende Vergleich zum Werkstattprüfstandsystem zeigt größere Abweichungen bis zu 7 Winkelminuten bei den Spurwerten. Diese Abweichungen dürften selbst bei leicht unterschiedlichen Fahrzeughöhenständen nicht auftreten. Das offenbart, dass das Werkstattsystem den Anforderungen aus der Fahrzeugproduktion nicht gerecht werden kann. Dem stehen natürlich die Anschaffungskosten gegenüber, die nur ca. ein Zehntel dessen ausmachen, was ein Prüfstandsystem aus der Fahrzeugproduktion kostet. Dies beweist aber auch, dass zukünftig nicht nur Maßnahmen im Produktionsumfeld sondern auch im späteren After-Sales-Bereich getroffen werden müssen.

### 5.6.7 Fazit: Fähigkeiten des Radadaptionssystems

Bevor ein abschließendes Fazit über die Messfähigkeit des Radadaptionssystems gegeben wird, soll aufgezeigt werden, welches Teilsystem die größte Messwertstreuung verursacht. Um das zu identifizieren, wurde aus der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) die Untersuchung eines Fehlerbaums bzw. einer Fehlerkette genutzt. So können durch die verknüpften Systemzusammenhänge die Einzelsysteme bis hin zum Messobjekt isoliert und ein Streuwert bestimmt werden. Um das, ausgehend von den Triangulationssensoren des Radadaptionssystems zu bestimmen, muss neben den Messreihen für die Prüfmittelfähigkeit und Maschinenfähigkeiten eine Messreihe zur statischen Sensormessung durchgeführt werden. Dadurch werden alle Einflüsse durch das Messobjekt und die Kinematik des Radadaptionssystems eliminiert und nur der Sensor-Fehler ermittelt. Dazu wird das Adaptionssystem an der Kalibrierlehre statisch positioniert und nicht mehr bewegt. Anschließend wurden nacheinander

30 Messungen mit der verbauten Messtechnik durchgeführt, ohne das System zu bewegen. Nach der Auswertung der Reproduzierbarkeit steht der größte Streuwert durch die Sensoren fest. Um anschließend den Fehler aus dem kinematischen Aufbau des Adaptionssystems zu ermitteln, wird der Streuwert der statischen Sensormessung vom Wert aus der Versuchsreihe der Prüfmittelfähigkeit abgezogen. Daraus ergibt sich die Differenz zwischen dem statischen Vermessen der Lehre zu den immer wieder erneuten Messungen nach dem An- und Abdocken an der Lehre. Um in einem letzten Schritt den Einfluss durch das Messobjekt selbst zu bestimmen, wird der Streuwert der Versuchsreihe der Prüfmittelfähigkeit vom jeweiligen Wert der Maschinenfähigkeit abgezogen. Die Differenz ergibt den Fehler, der unter anderem durch die Elastokinematik des entsprechenden Testfahrzeugs entsteht. Die Abfolge dieser Bestimmung der Fehlerwerte aus den jeweiligen Messreihen ist in Abbildung 5.24 dargestellt.



**Abbildung 5.24: Übersicht der Fehlerkettenbewertung aus den Versuchsmessungen**

Nachdem die statischen Versuchsmessungen an der Lehre durchgeführt worden sind, wurden die Berechnungen der einzelnen Schritte aus der Abbildung 5.24 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5.6 visualisiert. Dabei wurden die ermittelten maximalen Streuungen je Messgröße und Teilsystem dargestellt. Als Teilsystem wurde, wie oben beschrieben, der entstandene Fehler aus den Sensoren und dem kinematischen Aufbau des Radadaptionssystems ermittelt. Zusätzlich wurde der Einflussfaktor durch das Messobjekt dargestellt. Da eine Messreihe für das Testfahrzeug BMW und Daimler existiert, können auch beide bewertet werden.

Die größte Messwertstreuung, die durch die Sensoren hervorgerufen wird, liegt, wie der Tabelle zu entnehmen ist, bei ca. 0,2 Winkelminuten. Das ist ein sehr guter Wert, da aufgrund der technischen Wiederholgenauigkeit der Sensoren von  $\pm 16 \mu\text{m}$  und einem Sensorabstand von ca. 230 mm ein Winkelfehler von ca. 0,5 Winkelminuten entstehen dürfte. Weiterhin ist der Einfluss durch den kinematischen Aufbau des Radadaptionssystems zu entnehmen. Dieser liegt bei ca. 0,1 Winkelminuten und stellt sogar einen kleineren Einfluss als die Messtechnik selbst dar. Den größten Einfluss auf die Messwertstreuung hat das Messobjekt

selbst. Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, entstehen je nach Testfahrzeug Werte bis zu 2 Winkelminuten. Durch die starke Höhenstandabhängigkeit des Sturzes sind bei dieser Messgröße die Streuungen am größten. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Werte beim Sturz des Testfahrzeugs BMW höher sind als diejenigen des Daimlers. Das liegt an den Fahrwerkstypen der Testfahrzeuge. Der Daimler kann durch sein Luftfedersystem einen vorgegebenen Höhenstand effektiver erreichen als das Stahlfederfahrwerk beim BMW. Das beeinträchtigt vor allem die Reproduzierbarkeit des Sturzes und wird bei der hier gezeigten Auswertung deutlich erkennbar.

**Tabelle 5.6: Gesamtauswertung der Fehlerkettenbewertung**

Fehlerketten-aufschlüsselung	Spur Links	Spur Rechts	Gesamtspur	Sturz Links	Sturz Rechts
Sensor-Fehler Messtechnik	0,144'	0,103'	0,206'	0,175'	0,161'
Kinematischer-Fehler Messtechnik	0,027'	0,058'	0,038'	0,017'	0,104'
Fehler BMW	1,001'	1,596'	0,896'	1,934'	1,517'
Fehler Daimler	1,546'	1,186'	1,141'	0,931'	1,271'

Als abschließendes Fazit lässt sich durch die Untersuchungen die Eignung des prototypischen Radadaptionssystems nachweisen. Die Untersuchung der Einflüsse auf das System hat gezeigt, dass diese im laufenden Prozess beherrschbar sind. Weiterhin wurde ein stabiler Wert für die Prüfmittelfähigkeit im Bereich der Wiederholbarkeit von  $c_g > 10$  und der Genauigkeit von  $c_{gk} > 7$  nachgewiesen. Das gleiche gilt für die Maschinenfähigkeit, die an zwei Testfahrzeugen in der Modellfabrik einer Fahrzeugproduktion nachgewiesen wurde. Dabei wurde eine Wiederholbarkeit  $c_m > 5$  und eine Genauigkeit von  $c_{mk} > 5$  nachgewiesen. Bei einem Vergleich zu bestehenden Fahrwerkständen der heutigen Produktion wurden auch vergleichbare Messwerte erzielt. Dadurch ist nicht nur die Eignung des Radadaptionssystems nachgewiesen, sondern auch die Vergleichbarkeit zum Status Quo gegeben.

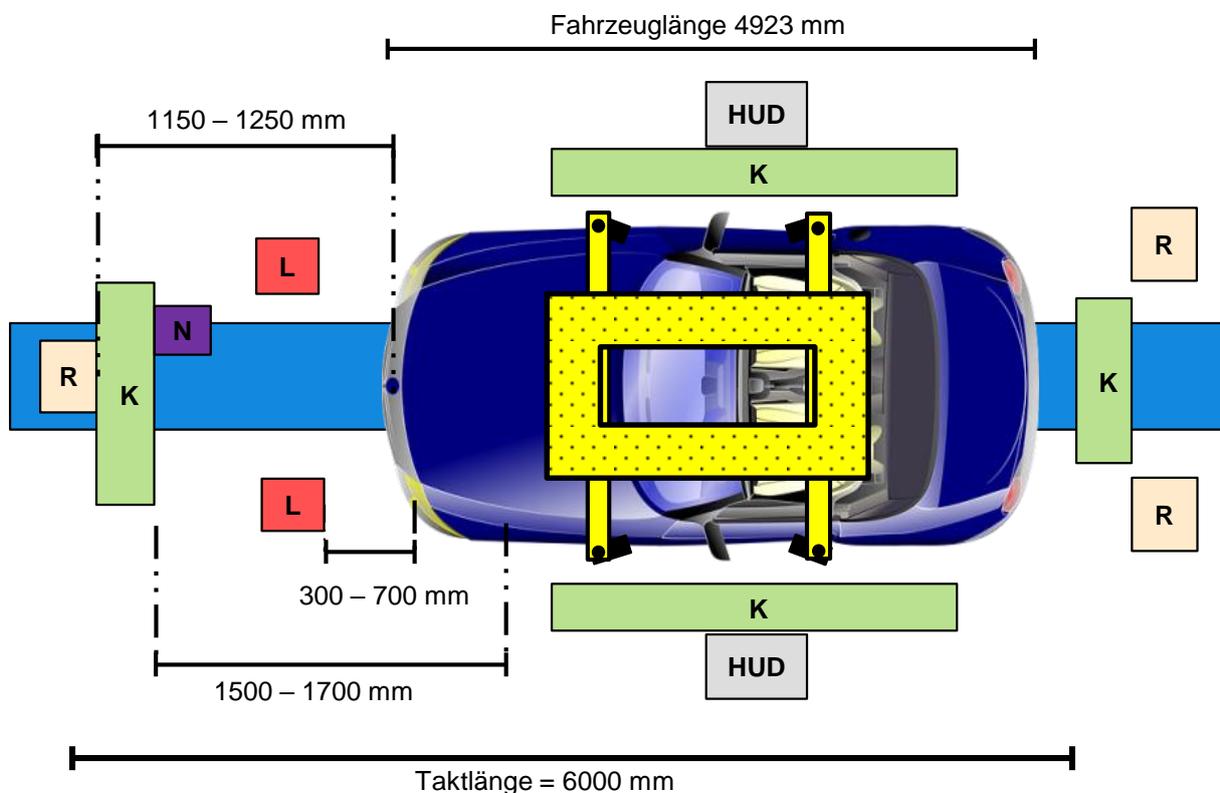
Die abschließende Betrachtung der möglichen Fehlerquellen hat gezeigt, dass die größte Streuung durch das Messobjekt selbst erzeugt wird. Die Testfahrzeuge haben dabei Streuungen bis zu 2 Winkelminuten verursacht. Die entstehenden Einflüsse durch die Messtechnik und den Aufbau des Radadaptionssystems liegen bei ca. 0,3 Winkelminuten und entsprechen damit absolut den Anforderungen. Somit sind alle Fähigkeiten des Systems nachgewiesen, die vor der Serienproduktion untersucht werden können. Eine Langzeituntersuchung des Systems und des Prozesses in der Serienproduktion muss bei einer späteren Implementierung des Systems bei einem OEM untersucht werden.

## 6 Konzeptionelle Entwicklung eines Targetmoduls

In diesem Kapitel wird nach dem erbrachten Fähigkeitsnachweis des Radadaptionssystems eine Übersicht über die konzeptionelle Target-Entwicklung gegeben. Daher ist das Kapitel in fünf Bereiche unterteilt. Im ersten Teil werden die Anforderungen an das Betriebsmittel aufgezeigt, das in der Montagelinie unterschiedliche Kalibriernormale führen soll. Im zweiten Teil wird die Ausgestaltung eines möglichen Targetmoduls für den getakteten Einsatz beschrieben. Im dritten Teil werden die Implementierung und die mathematischen Zusammenhänge mit dem Radadaptionssystem dargestellt. Bevor im letzten Teil in einem Versuchsaufbau das Gesamtsystem auf seine Eignung untersucht wird, wird im vierten Teil ein alternatives Konzept entworfen. Dabei ist es möglich, die Fahrwerkvermessung und die Umfeldsensor-Kalibrierung innerhalb der Montagelinie örtlich zu trennen. Im Teil fünf wird abschließend die Fähigkeit des Gesamtsystems am Beispiel eines Radarsensors untersucht.

### 6.1 Anforderungen und möglicher Aufbau des Targets

Da im Fahrzeug eine Vielzahl von Umfeldsensoren kalibriert werden müssen, muss untersucht werden, welche Sensoren davon in der Montagelinie in Betrieb genommen werden können. Abbildung 6.1 zeigt eine beispielhafte Platzierung der benötigten Targets im Montagetak.



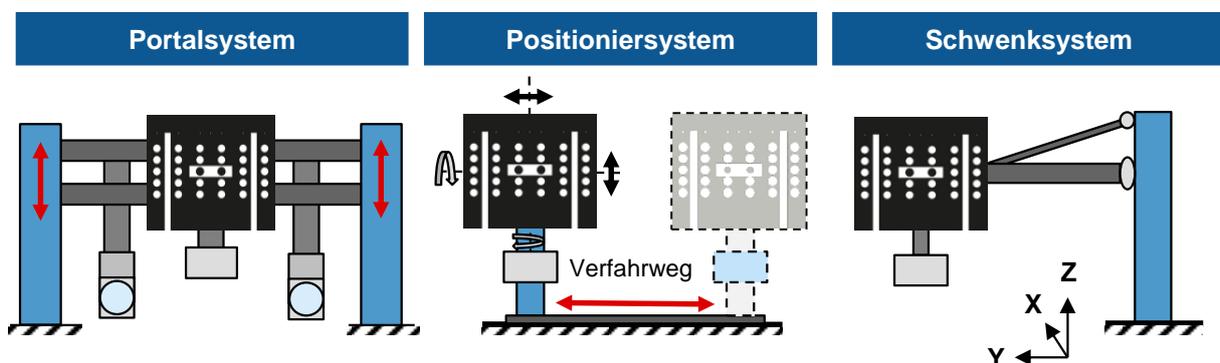
#### Legende:

K: Kamera Target; L: Lichtsammelkasten; N: Nachtsichtkamera Target; R: Radarsensor Target  
 HUD: Head-Up-Display Kamera

Abbildung 6.1: Platzbedarf für Kalibrierbetriebsmittel in der Montagelinie

Die Abbildung bezieht sich auf ein Mittelklassefahrzeug in einer Montageumgebung mit einer Standardtaktlänge von 6 Metern. Jedes farblich markierte Feld zeigt benötigte Betriebsmittel, um die jeweilige Einrichtung des Fahrzeugs zu kalibrieren. Da in verschiedenen Modellreihen der Fahrzeuge unterschiedliche Technik verbaut sein kann, ist diese Darstellung lediglich ein Beispiel, das auch die benötigten Kalibrierabstände zum Fahrzeug wiedergibt. Bei genauerer Betrachtung des Platzbedarfs wird schnell ersichtlich, dass in der Montagelinie nicht Flächen wie im EOL vorhanden sind. Aus diesem Grund ist es schwer, alle aktuellen Betriebsmittel in einen Montagetakt zu integrieren. Durch diesen Mangel an Fläche sollen nicht alle sondern nur essenzielle Umfeldsensoren mit einer hohen Ausstattungsquote in der Montagelinie kalibriert werden. Dazu gehören unter anderem die Kamera- und Radarsensoren in der Fahrzeugfront sowie die notwendige Scheinwerfereinstellung über alle Modellreihen hinweg. Durch die Inbetriebnahme dieser primären Systeme in der Montagelinie lässt sich auch die Vorbefähigung des Fahrzeugs sicherstellen. Alle anderen Systeme, die eine geringe Ausstattungsquote haben und nicht sicherheitsrelevant sind, können bei der Absicherung im späteren EOL oder durch Sensordatenfusion mit den bereits kalibrierten primären Sensoren in Betrieb genommen werden. Deshalb wird beim in dieser Arbeit vorgestellten Targetmodul lediglich das Konzept für die genannten Systeme in der Fahrzeugfront erstellt.

Da die Entwicklung der Komponenten bis hin zum autonomen Fahren kontinuierlich fortschreitet, werden des Öfteren neue Sensoren eingesetzt. Deshalb soll das Targetmodul eine Skalierungsmöglichkeit haben, um auf eventuelle neue Technologien flexibel reagieren zu können. Parallel dazu steht die Integrierbarkeit des Systems in die Montagelinie, bei der das Fahrzeug in einer flurfreien Fördertechnologie bewegt wird. Dabei wird nachfolgend der getaktete Produktionsbetrieb betrachtet. Um die benötigten Kalibriernormale wie Kalibriertafel und Lichtsammelkasten in die entsprechende Position und Orientierung zu bewegen, muss als erstes das Positioniersystem konzipiert werden. Dazu stehen mehrere Konzeptideen zur Auswahl, wie die Abbildung 6.2 zeigt.



**Abbildung 6.2: Mögliche Konzeptionen zur Auslegung des Targetmoduls**

Von den drei Bewegungseinrichtungen kann das Schwenksystem aufgrund des fehlenden Platzbedarfs zwischen zwei Fahrzeugen nicht in der Montagelinie genutzt werden. Somit ist ein sicheres Schwenken, auch aufgrund der notwendigen prozesszeitbedingten hohen

Schwenkgeschwindigkeit, nicht umsetzbar. Das Portalsystem, wie es bereits im EOL verbaut ist, bietet eine sehr gute Systemsteifigkeit und –stabilität, kommt jedoch aufgrund des Platzbedarfs beim Durchfahren der Fördertechnik nur bedingt in Frage. Anders als im EOL muss das Fahrzeug samt Fördertechnik über das Portal fahren. Das ist nur möglich, wenn die Aufbauhöhen der Kalibriernormale, die am Portal angebracht sind, gering bleiben, und das Portal ganz auf den Boden fährt. Das wiederum hat einen negativen Einfluss auf die Flexibilität des Systems, weshalb für diesen Anwendungsfall das Portal nicht geeignet ist. Daher bleibt nur der Einsatz eines bodengeführten Positioniersystems. Durch das System können die Kalibriernormale in die benötigte Position gebracht und zur Durchfahrt der Fördertechnik aus der Montagelinie gefahren werden.

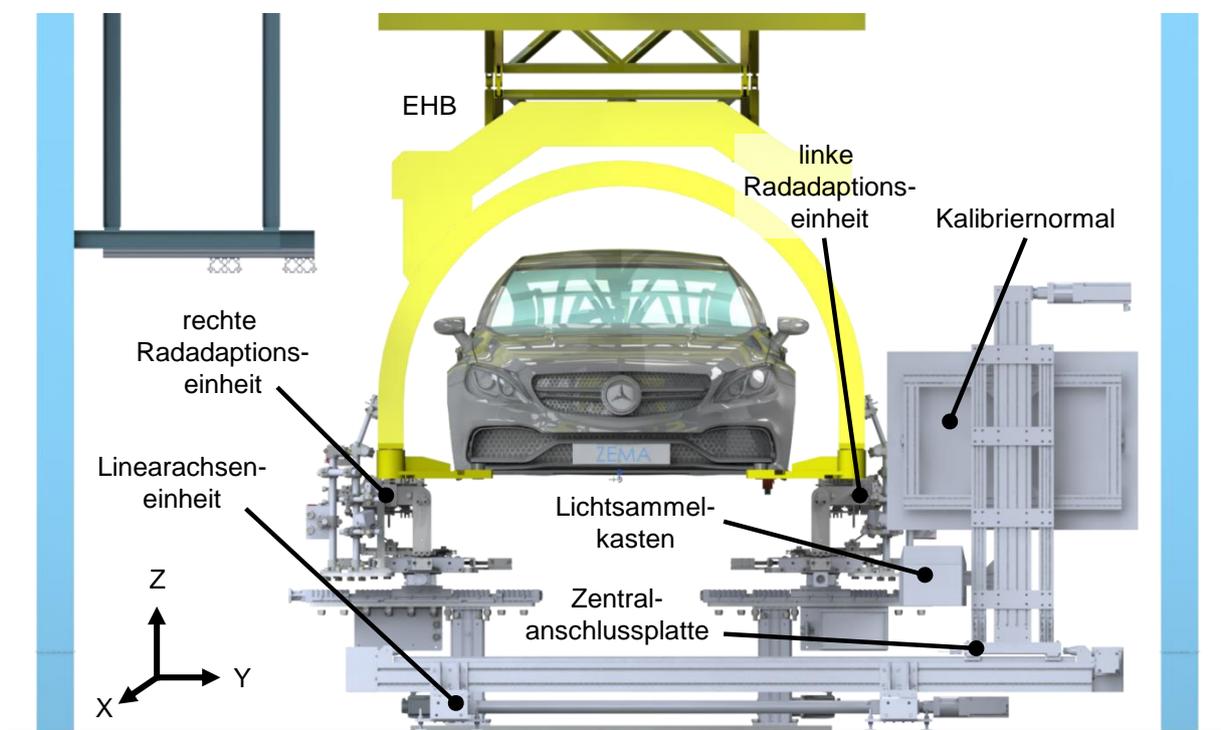
Die Anforderungen an die Genauigkeit des Positioniersystems fallen dabei nicht sonderlich ins Gewicht, jedoch die Orientierung des Kalibriernormals stellt ein bedeutendes Merkmal dar. Dabei muss sichergestellt werden, dass in der Kalibrierposition das Kalibriernormal um die Drehachse  $R_z$  im Winkel  $90^\circ \pm 0,05^\circ$  zur geometrischen Fahrachse und um die Drehachse  $R_y$  im Winkel  $90^\circ \pm 0,1^\circ$  zur Fahrbahnoberfläche ausgerichtet werden kann. Daher muss bei der Auslegung des Targetmoduls auf die entsprechenden Bewegungsmöglichkeiten und Steifigkeiten geachtet werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. Des Weiteren muss auch eine Überprüf- bzw. Kalibriermöglichkeit in Verbindung mit dem Radadaptionssystem geschaffen werden.

## 6.2 Auslegung des Targetmoduls

Gemäß Konzeptauswahl der Aufbauart für das Targetmodul wurde ein konstruktiver Aufbau abgeleitet. Die Implementierung zusammen mit dem Radadaptionssystem ist in der Abbildung 6.3 dargestellt. Dabei ist das Grundmodul in der Fahrzeugfront zu sehen. Die Linearachseinheiten können die Zentralanschlussplatte in die X-, Y- und Z-Richtung des Basiskoordinatensystems positionieren. Das ist in der Förderrichtung X notwendig, um die geforderten Distanzen zum Kalibrieren auch bei unterschiedlichen Fahrzeugdimensionen anfahren zu können. Die Achsen Y und Z dienen der Positionierung des Kalibriernormals in der entsprechenden Position vor dem Fahrzeug. Zusätzlich dient die Y-Achse zum Herausfahren der Zentralanschlussplatte und der damit verbundenen Kalibrierelemente, um das Durchfahren der Fördertechnik zu ermöglichen. Deshalb muss die Y-Achse so gestaltet werden, dass sie ein- oder beidseitig soweit aus der Montagelinie herausragt, um die Elemente vollständig nach links oder rechts aus dem Förderbereich zu fahren.

Die Zentralanschlussplatte soll die Aufnahme von unterschiedlichen Kalibrierelementen ermöglichen. Dazu sind der Anschlussflansch und die Medienversorgung so gestaltet, dass entsprechende Modulgruppen aufgenommen werden können. Wie in der Abbildung 6.3 zu erkennen ist, sind entsprechend des aktuellen Konzepts eine Modulgruppe zur Kamera und Radarsensor-Kalibrierung sowie zur Scheinwerfereinstellung verbaut. Dazu sind an der Baugruppe

ein Lichtsammelkasten und ein Kalibriernormal in Form einer bedruckten Targetplatte angebracht. Beide Elemente sind entsprechend der Drehachse  $R_Y$  und  $R_X$  im rechten Winkel zur Fahrbahnoberfläche ausgerichtet. Durch den soliden Aufbau können mittels einer einmaligen Ausrichtung in den primären Kalibrierpositionen des Moduls die Anforderungen aus vorherigem Kapitel erfüllt werden. Um die geforderte Ausrichtung der Kalibrierelemente um die Drehachse  $R_Z$  sicherzustellen, müssen die Elemente mit Schwenkeinrichtungen versehen werden. Das ist erforderlich, da die geometrische Fahrachse je Fahrzeugorientierung eine unterschiedliche Ausrichtung haben kann, und folglich die geforderte Genauigkeit nicht gewährleistet werden kann. Bei einer pendelnden Bewegung des Fahrzeugs in der Elektrohängebahn (EHB) muss auch eine aktive Korrektur des Kalibriernormals zur aktuellen Orientierung der geometrischen Fahrachse durchgeführt werden.



**Abbildung 6.3: Systementwurf des Targetmoduls in der Montagelinie**

Damit das Targetmodul mit dem Radadaptionssystem zusammen arbeiten kann, müssen Koordinatensysteme eingemessen und das Verhalten über die Verfahrswege der Linearachse-einheit ermittelt werden. Dieses Vorgehen ist adäquat zu dem bereits vorgestellten bei der Ermittlung des kinematischen Verhaltens der Radadaptionseinheiten. Die mathematischen Zusammenhänge und die entsprechenden Koordinatensysteme werden im folgenden Kapitel dargestellt. Damit nach den Einmessungen der Erstinbetriebnahme das Gesamtsystem überprüfbar bleibt, kann es durch die Kalibriervorrichtung des Radadaptionssystems kontrolliert werden. Dazu können an der bereits vorgestellten Kalibriervorrichtung des Radadaptionssystems Punktlasermodule angebracht werden. Diese Lasermodule werden zu definierten Punkten des Targetmoduls in einer vorgegebenen Grundstellung ausgerichtet. Durch die definierte Positionierung der Lehre zur Anlagenbasis kann so der Bezug dazu hergestellt werden. Bei einem

Kalibriervorgang kann nach dem Anfahren der Grundstellung überprüft werden, ob die Laserstrahlen immer noch in die definierten Punkte an dem Targetmodul leuchten. Ist dies nicht der Fall und es liegt eine Positionsabweichung vor, deutet das auf einen Systemverschleiß oder eine Beschädigung hin. Dann muss der Fehler behoben und eine neue Einmessung mit anschließender erneuter Lasermodulausrichtung erfolgen.

Je benötigter Kalibrierelemente kann die Modulgruppe auf der Zentralanschlussplatte unterschiedlich aufgebaut sein. Dadurch entsteht eine Skalierungsmöglichkeit entsprechend den Anforderungen des OEMs. Mit jedem Wechsel des Moduls ist jedoch eine erneute Inbetriebnahme des Systems erforderlich. Bei dem aktuellen Modul ist ein Lichtsammelkasten zur Scheinwerfereinstellung und Kalibrierung von Radarsensoren mittels Hilfsspiegel vorhanden. Dieser kann einfach oder je nach vorhandener Prozesszeit zweifach verbaut werden. Der Lichtsammelkasten wird entsprechend dem Inbetriebnahmeprozess unabhängig zum restlichen Aufbau positioniert. Da der Prozess vollständig automatisiert abläuft, kann die Scheinwerfereinstellung mit Hilfe eines am Targetmodul verbauten Leichtbaurobotersystems oder allein durch die Aktorik der Scheinwerfer durchgeführt werden. Die bedruckte Targetplatte, die als Kalibriernormal für das Kamerasystem hinter der Windschutzscheibe dient, kann bei entsprechender Ausführung in Stahl auch zur Kalibrierung der Radarsensoren genutzt werden. Das ist umsetzbar bei Sensoren, die mittels Drehplatte in Betrieb genommen werden müssen.

Um eine größtmögliche Flexibilität des Inbetriebnahmeprozesses zu gewährleisten, könnte anstelle der bedruckten Targetplatte auch ein Bildschirm genutzt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit die Kalibriermuster für die Kamera aktiv abzubilden. Durch diesen Vorteil können je Fahrzeug unterschiedliche Kalibriermuster aufgerufen werden. Das ist beispielsweise bei unterschiedlichen Komponentenherstellern oder einem Wechsel der Modellreihe notwendig. Zusätzlich kann statt des statischen Kalibrierpatterns auch eine Videosequenz auf dem Bildschirm abgespielt werden, um nicht die Kamera allein zu kalibrieren, sondern auch softwareseitige Szenenerkennung zu überprüfen. Neben diesen Vorteilen kann die Schwenkvorrichtung des Monitors eingespart werden, da die Drehung des Bildes auch durch eine Pixelverzerrung dargestellt werden kann. Zusätzlich sorgt die Hintergrundbeleuchtung des Monitors für einen besseren Kontrast, der bei einem bedruckten Target nur durch zusätzliche Ausleuchtung erzielt wird.

Um die Eignung des Monitors für diesen Prozess aufzuzeigen, muss das größte Kalibriertarget der OEMs für die Kamerakalibrierung betrachtet werden. Das derzeit größte Kalibriertarget hat eine Größe von 1340 x 960 mm [KUN19]. Das entspricht einem Seitenverhältnis von 1,4. Im Format 4:3 würde ein 70 Zoll Bildschirm ausreichen, da er dem Seitenverhältnis mit 1,33, dem des notwendigen Verhältnisses, am nächsten kommt. Handelsübliche Bildschirme besitzen jedoch Formate 16:9, so dass deren Seitenverhältnisse im Bereich 1,78 liegen. Für die notwendige Bildschirmgröße bedarf es eines Formats 16:9, einem 80 Zoll Bildschirm, da er eine Größe von 1770 x 1000 mm abbilden kann. Da die Pixelgröße den entstehenden Messfehler ausmacht, muss sich diese dem der bedruckten Targetplatte annähern. Die Platte ist mit einer

Druckauflösung von 300 dots per inch (dpi) bedruckt. Das entspricht 300 Punkten bzw. Pixeln pro 25,4 mm. Deshalb müsste ein Monitor eine Pixelgröße von 0,085 mm besitzen, um einen vergleichbaren Wert zu erzielen. Für den Monitor ist die Auswahl auf einen am Markt verfügbaren 8K Bildschirm mit den Spezifikationen Format 16:9, Diagonale 82 Zoll und Auflösung 7680 x 4320 Pixel mit Displaygröße 1804 x 1015 mm gefallen. Mit diesen Eigenschaften berechnet sich die Pixelhöhe mit Formel 33, die aufgrund der Displaydimensionen auch der Pixelbreite entspricht.

$$\text{Pixelhöhe} = \frac{\text{Displayhöhe}}{\text{Anzahl der Pixel}} = \frac{1015 \text{ mm}}{4320 \text{ Pixel}} = 0,23 \text{ mm/Pixel} \quad (33)$$

Um den auftretenden Winkelfehler zu ermitteln, ist die Distanz zwischen der Kamera im Fahrzeug und dem Monitor relevant. Dieser Abstand liegt je nach Modell bei ca. 2300 mm. Mit Formel 34 kann der Winkelmessfehler berechnet werden.

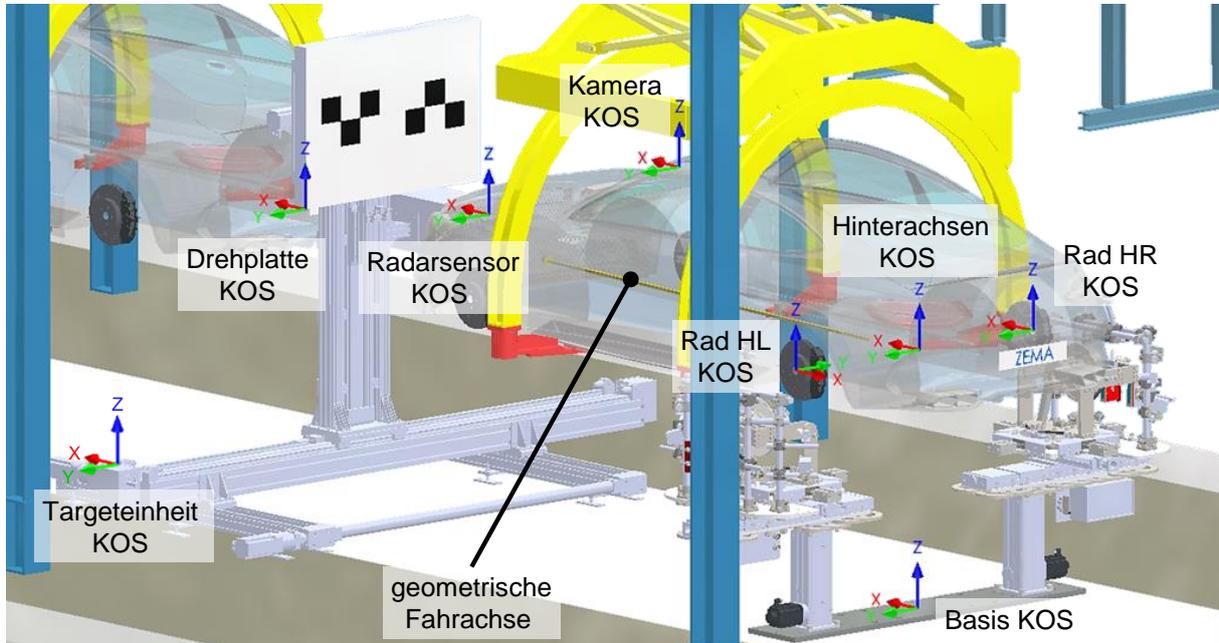
$$\text{Winkelmessfehler} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Pixelhöhe}}{\text{Messdistanz}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{0,23 \text{ mm}}{2.300 \text{ mm}} \right) = 0,006^\circ/\text{Pixel} \quad (34)$$

Wegen der Pixelgröße des verwendeten Monitors entsteht ein Winkelfehler von 0,006°/Pixel, was ca. 0,35 Winkelminuten entspricht. Dieser Wert ist dreifach schlechter als der Fehler, der durch eine bedruckte Targetplatte entsteht. Der Wert liegt bei 0,002°/Pixel, wenn man ihn mit Formel 34 berechnet. Die maximale Auflösung derzeitiger Kamerasysteme im Fahrzeug liegt bei 0,04°/Pixel [ROB17b]. Somit bietet die Kalibriermöglichkeit über den Monitor eine immer noch ca. siebenfach bessere Auflösung als die zu kalibrierende Kamera selbst. Folglich kann das vorgestellte Konzept nach einer Validierung in realer Produktionsumgebung genutzt werden. Um die Detailauslegung des Targetmoduls je Anwendungsfall darzustellen, bedarf es über diese Arbeit hinaus noch weiteren Forschungsbedarfs.

### 6.3 Implementierung und mathematische Einbindung zusammen mit dem Radadaptionssystem

Damit das Targetmodul zusammen mit dem Radadaptionssystem in einem Montagetakt arbeiten kann, müssen die mathematischen Zusammenhänge erstellt werden. Dazu müssen Koordinatensysteme angelegt werden und deren Transformationen untereinander bekannt sein. Abbildung 6.4 zeigt die relevanten Koordinatensysteme, die für eine Ausrichtung des Kalibriernormals zur aktuellen Orientierung der geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs benötigt werden. Die geometrische Fahrachse wird wie zuvor beschrieben als Richtungsvektor im Koordinatensystem der Hinterachse ermittelt. Der Richtungsvektor kann mittels einer Transformationsabfolge über das Basis Koordinatensystem in das der Targeteinheit und der damit verbundenen Drehplatte transformiert werden. Dazu werden das Koordinatensystem der

Targeteinheit und das der Drehplatte an dafür vorgesehenen definierten Punkten eingemessen. Das Verfahren ist gleichartig zu dem der Einmessung der Koordinatensysteme mit dem Lasertracker am Radadaptionssystem. Bei der Vermessung wird aus der gleichen Messposition des Lasertrackers auch die Basis der Adaptionseinheiten eingemessen. Dadurch wird der mathematische Zusammenhang zwischen den Teilsystemen hergestellt.



**Abbildung 6.4: Relevante Koordinatensysteme für die Umfeldsensor-Inbetriebnahme**

Der Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse kann zur Ausrichtung der Drehplatte bzw. aller Kalibrierelemente der eingesetzten Modulgruppe mit der Formel 35 in das Targetmodul transformiert werden. Dabei bildet die Matrix  $\cdot^{Targeteinheit} T_{Basis}$  eine statische Transformation, die aufgrund der örtlichen Positionierung der Systeme in dem Montagetak entsteht.

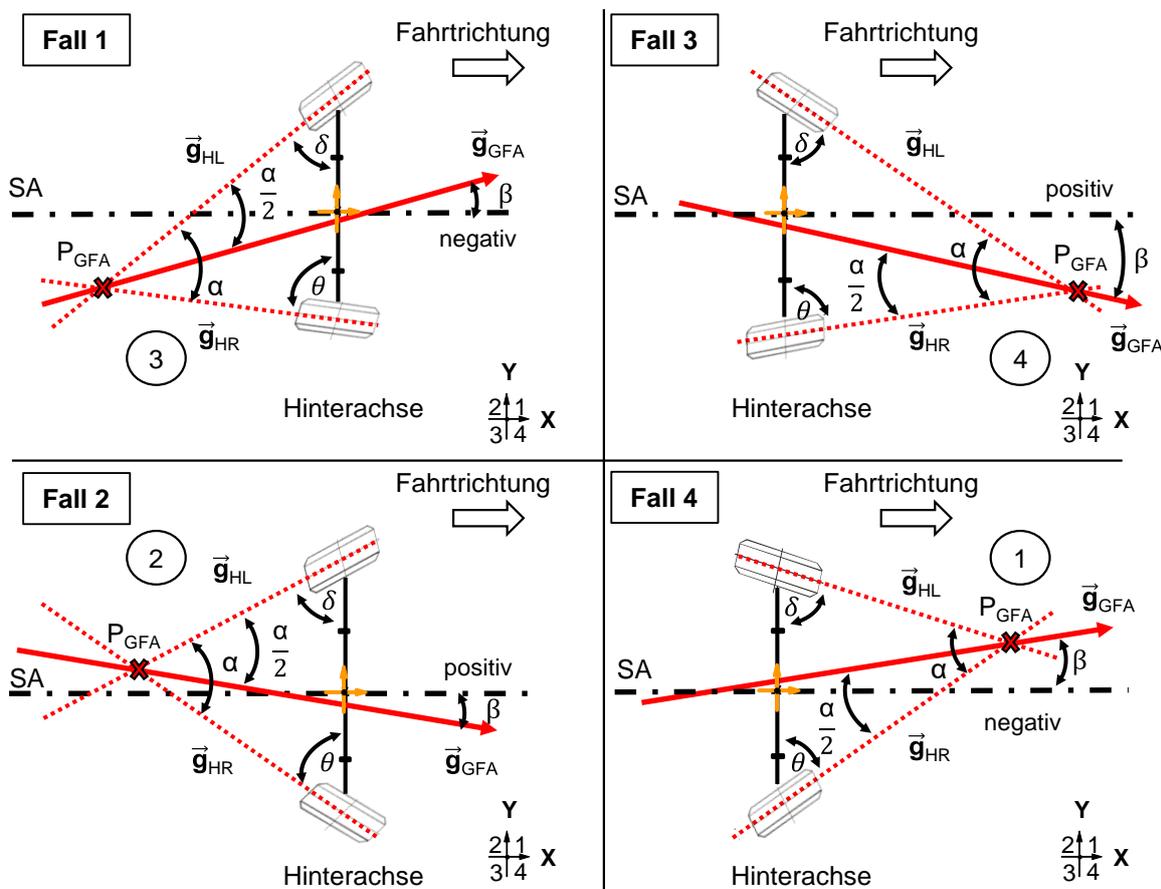
$$\text{Drehplatte } \mathbf{p} = \text{Drehplatte } \mathbf{T}_{\text{Targeteinheit}} \cdot \text{Targeteinheit } \mathbf{T}_{\text{Basis}} \cdot \text{Basis } \mathbf{T}_{\text{Hinterachse}} \cdot \text{Hinterachse } \mathbf{p} \quad (35)$$

- $\text{Basis } \mathbf{T}_{\text{Hinterachse}}$  : Transformationsmatrix Hinterachse zur Basis
- $\text{Targeteinheit } \mathbf{T}_{\text{Basis}}$  : Transformationsmatrix Basis zur Targeteinheit
- $\text{Drehplatte } \mathbf{T}_{\text{Targeteinheit}}$  : Transformationsmatrix Targeteinheit zur Drehplatte
- $\text{Hinterachse } \mathbf{p}$  : Richtungsvektor im Hinterachsen-Koordinatensystem
- $\text{Drehplatte } \mathbf{p}$  : Richtungsvektor im Drehplatten-Koordinatensystem

Innerhalb des Targetmoduls ist jedem Kalibriernormal ein Koordinatensystem zugeordnet. Für den konzeptionellen Aufbau ist ein Koordinatensystem der Targetdrehplatte zugeordnet, wie in Abbildung 6.4 zu erkennen ist. Dieses Koordinatensystem ist innerhalb der Targeteinheit über alle Fahrwege der Lineareinheiten mittels Lasertracker eingemessen. Dadurch sind Korrekturfaktoren vorhanden, die nach dem Anfahren einer Targetposition genutzt werden

können, um die Transformation  $T_{\text{Drehplatte}}^{\text{Targeteinheit}}$  zu bestimmen. Dazu werden die Positionsggeber der Antriebsmotoren ausgelesen, die Korrektur für diese Position bestimmt und die Transformation erstellt. Nachdem die aktuelle Transformationsabfolge berechnet wurde und der Richtungsvektor der Fahrachse im Koordinatensystem der Drehplatte vorliegt, soll diese im rechten Winkel dazu ausgerichtet werden. Deshalb muss der aktuelle Winkel bestimmt werden, um den die Platte um ihre Drehachse  $R_z$  rotiert werden muss. Da das Koordinatensystem der Drehplatte so angelegt ist, dass die YZ-Ebene in der Plattenoberfläche liegt, muss die Y-Achse des Koordinatensystems im rechten Winkel zur geometrischen Fahrachse stehen. Mit Formel 23 kann der Winkel zwischen der Y-Achse des Koordinatensystems der Drehplatte und dem Richtungsvektor der Fahrachse bestimmt werden. Dieser Winkel sollte bei korrekter Ausrichtung  $90^\circ$  ergeben. Die Differenz zu  $90^\circ$  ist der Wert, um den die Targetplatte gedreht werden muss, damit der Kalibrierprozess beginnen kann. Da sich das Fahrzeug samt geometrischer Fahrachse mit der EHB bewegen kann, muss die vorgestellte Berechnung zyklisch durchgeführt werden, um die Drehplatte kontinuierlich nachzuregeln.

Die geometrische Fahrachse kann sich je nach Spureinstellung des Fahrzeugs unterschiedlich bilden. Dabei ist die Richtung, in die die Fahrachse zeigt, für die Drehung der Targetplatte von Bedeutung. Abbildung 6.5 zeigt die vier möglichen Fälle.



Legende: GFA: geometrische Fahrachse; SA: Symmetrieachse

Abbildung 6.5: Bestimmung der Fahrachsrichtung durch die Quadranten

Wie in der Abbildung zu sehen ist, kann die Fahrachse zur linken oder rechten Seite der Symmetrieachse gerichtet sein und der Schnittpunkt der Spurgeraden sich vor oder hinter der Achse bilden. Neben den vier gezeigten Fällen können noch vier weitere Sonderfälle auftreten. Sie entstehen dadurch, dass jeweils ein Rad in Vorspur- und eines in Nachspurrichtung zeigt. Da derartige Einstellungen für das Fahrwerk unrealistisch sind, werden die Sonderfälle nicht weiter behandelt. Sollten diese Einstellungen dennoch vorkommen, wird die Bestimmung analog zu den vier gezeigten Fällen durchgeführt. Für die Richtungsbestimmung der Fahrachse muss nachfolgend der Schnittpunkt  $P_{GFA}$  aus den Richtungsvektoren  $\vec{g}_{HL}$  und  $\vec{g}_{HR}$  der Schnittgeraden bestimmt werden. Ist der Schnittpunkt innerhalb des Koordinatensystems der Hinterachse ermittelt, kann der Quadrant ermittelt werden, in dem der Schnittpunkt liegt. Dabei entspricht jeder Quadrant einem Fall aus der Abbildung 6.5 und gibt somit die Drehrichtung der Fahrachse bzw. der Tragetdrehplatte vor. Um den Schnittpunkt  $P_{GFA}$  zu ermitteln, müssen die beiden Schnittgeradengleichungen der Spur gleich gesetzt werden. Formel 36 zeigt das zu lösende Gleichungssystem.

$$\vec{s}_{HL} + \lambda_1 \cdot \vec{g}_{HL} = \vec{s}_{HR} + \lambda_2 \cdot \vec{g}_{HR} \quad (36)$$

$\vec{s}_{HL, HR}$  : Stützvektor der Schnittgeraden zwischen Rad- und Fahrzeugebene

$\vec{g}_{HL, HR}$  : Richtungsvektor der Schnittgeraden zwischen Rad- und Fahrzeugebene

$\lambda_{1, 2}$  : Parameterwerte der Geradengleichungen

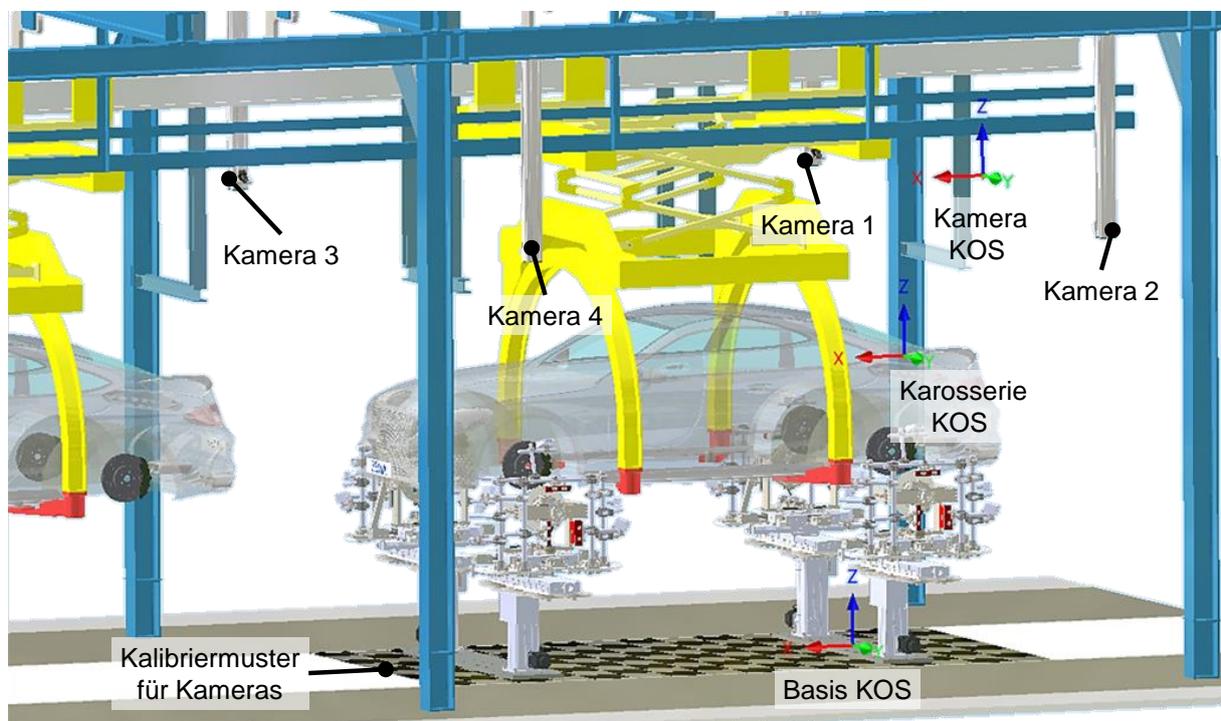
Die Stützvektoren der Gleichungen müssen berechnet und die Richtungsvektoren können der Formel 22 entnommen werden. Nach dem Ein- und Gleichsetzen erhält man ein lineares Gleichungssystem aus drei Gleichungen mit den unbekannt Parameterwerten  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ . Durch Lösen der Parameterwerte des Gleichungssystems können diese in eine Geradengleichung eingesetzt werden, um den Ortsvektor des Schnittpunktes  $P_{GFA}$  bestimmen zu können. Anschließend wird anhand der Koordinaten des Schnittpunkts geprüft, in welchem Quadranten er liegt. Befindet sich der Schnittpunkt im 1. oder 4. Quadranten, wird der Richtungsvektor  $\vec{g}_{HL}$  der Schnittgeraden in die geometrische Fahrachse gedreht. Liegt er im 2. oder 3. Quadranten, wird der Richtungsvektor  $\vec{g}_{HR}$  der Schnittgeraden in die geometrische Fahrachse gedreht. Dadurch ist eine definierte Drehrichtung vorgegeben, die für die Drehung der Targetplatte genutzt werden kann.

## 6.4 Alternatives Konzept zum Transfer der gemessenen Fahrwerkdaten

Um die größtmögliche Flexibilität und Integrationsmöglichkeit in der Montagelinie zu gewährleisten, soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Fahrwerkvermessung mittels Radadaptionsystem und die Umfeldsensor-Kalibrierung mittels Targetmodul örtlich zu trennen. Dazu

muss im ersten Takt die ermittelte geometrische Fahrachse, die als Referenz für die Kalibrierung der Umfeldsensoren dient, dem Fahrzeug in den Folgetakt mitgegeben werden. Das kann über eine externe Messtechnik erfolgen. So soll in dem vorgestellten Konzept ein Kamerasystem genutzt werden, um den Richtungsvektor der Fahrachse an ein Merkmal der Fahrzeugkarosserie zu heften. In dem Montagetak, in dem die Umfeldsensor-Kalibrierung stattfinden soll, soll ein identisches Kamerasystem dieses Merkmal des Fahrzeugs unter gleichen Bedingungen ermitteln und den Richtungsvektor entsprechend der aktuellen Merkmalsorientierung wiedergeben. Zusammen mit dem bereits vorgestellten Targetmodul können dann die Inbetriebnahmeprozesse erfolgen.

Abbildung 6.6 zeigt den Aufbau des Systems und die relevanten Koordinatensysteme für den ersten Montagetak, in dem die Vermessung stattfindet. Ob für die Mitnahme der geometrischen Fahrachse das Radadaptionssystem nur die Hinterachse oder das gesamte Fahrwerk vermisst, spielt für den folgenden Prozess keine Rolle. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, sind zusätzlich zum Adaptionssystem vier Kameras über dem Fahrzeug vorhanden. Sie werden so positioniert, dass möglichst alle seitlichen Karosseriebereiche abgebildet werden. Des Weiteren können alle vier Kameras über ein fixes Kalibriermuster am Boden in ein gemeinsames Kamerakoordinatensystem überführt werden. Durch die Kalibrierung zueinander können dreidimensionale Informationen der Fahrzeugkarosse ermittelt werden. Dabei wird das Koordinatensystem so angelegt, dass es definierte Punkte besitzt, die mittels Lasertracker anmessbar sind.



**Abbildung 6.6: Übergabe der Fahrachse an ein Fahrzeugmerkmal in Takt 1**

Durch das definierte Kamerakoordinatensystem kann mittels Lasertracker eine statische Transformation  ${}^{\text{Basis}}T_{\text{Kamera}}$  zwischen Basis und Kamera ermittelt werden. Zusätzlich müssen

bei dem aktiven Messprozess Merkmale der Karosserie ermittelt werden, um die Transformation  ${}^{\text{Kamera}}\mathbf{T}_{\text{Karosserie}}$  zu bestimmen. Dazu werden mindestens drei Punkte an der Karosserie detektiert, die wiederholgenau ermittelt werden können. Mittels dieser drei Punkte wird ein Koordinatensystem aufgespannt, wie es bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben wurde. Dabei ist es nicht wichtig, wo die Punkte aufgenommen werden bzw. wo sich daraus das Koordinatensystem ergibt, sondern lediglich, dass sie durch das Kamerasystem reproduzierbar ermittelt werden. Somit kann eine Transformation zwischen dem Koordinatensystem der Kamera und Karosserie erstellt werden. Dadurch ergibt sich die finale Transformationsabfolge aus Formel 37. Da die Transformationsrichtung von der Karosserie in die Basis zeigt, muss die Inverse Matrix der Transformation  ${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{Karosserie}}$  gebildet werden. Mit der Rückwärtstransformation kann der Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse von der Basis in das Koordinatensystem der Karosserie transformiert werden. Das geschieht in dem Moment, in dem die Merkmale der Karosserie durch das Kamerasystem und der Richtungsvektor der Fahrachse durch das Radadaptationssystem vorliegen. Durch einen gemeinsamen Trigger kann eine synchronisierte Berechnung erfolgen.

$$\text{Basis } \mathbf{P} = \text{Basis } \mathbf{T}_{\text{Kamera}} \cdot \text{Kamera } \mathbf{T}_{\text{Karosserie}} \cdot \text{Karosserie } \mathbf{P} \quad (37)$$

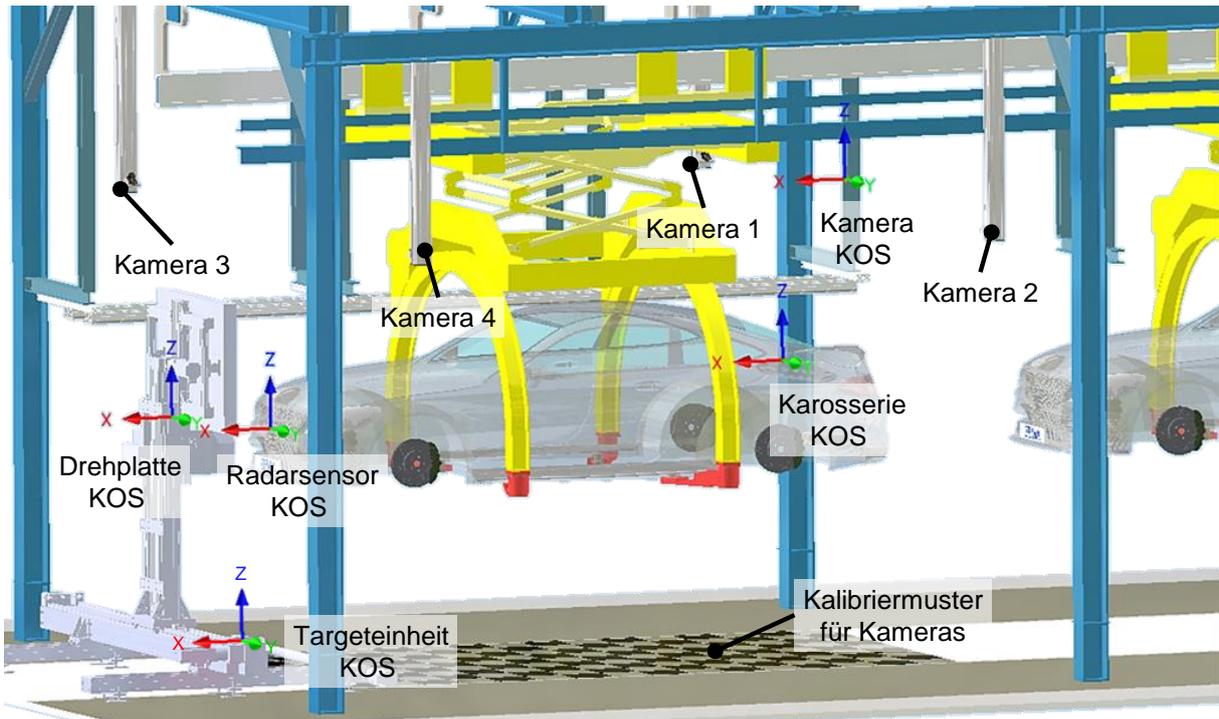
$$\text{Karosserie } \mathbf{P} = [ \text{Basis } \mathbf{T}_{\text{Karosserie}} ]^{-1} \cdot \text{Basis } \mathbf{P}$$

${}^{\text{Basis}}\mathbf{T}_{\text{Kamera}}$	: Transformationsmatrix Kamera zur Basis
${}^{\text{Kamera}}\mathbf{T}_{\text{Karosserie}}$	: Transformationsmatrix Karosserie zur Kamera
$\text{Basis } \mathbf{P}$	: Richtungsvektor im Basis-Koordinatensystem
$\text{Karosserie } \mathbf{P}$	: Richtungsvektor im Karosserie-Koordinatensystem

Nachdem der Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse mit den individuellen Karosseriemerkmalen eines jeden Fahrzeugs verknüpft ist, können diese Informationen auf dem zentralen Werksrechner abgelegt werden. Diese Daten stehen in allen folgenden Takten der Montagelinie zur Verfügung und können in der Station zur Umfeldsensor-Kalibrierung genutzt werden. Durch Mitgeben des Richtungsvektors zu einem Koordinatensystem der Karosserie wird jedes Fahrzeug gewissermaßen zu einer individuellen Kalibriervorrichtung für das System im Folgetakt. Das setzt jedoch voraus, dass beide Kamerasysteme in Takt 1 und 2 identisch sind. Dabei ist es nicht wichtig, dass die Systeme die Karosseriemerkmale absolut ermitteln, sondern immer mit dem gleichen Reproduzierbarkeitsfehler. Das ist notwendig, um durch die Karosseriemerkmale das Koordinatensystem von seiner aktuellen Lage und Orientierung exakt wie in der ersten Station zu bestimmen.

Abbildung 6.7 zeigt den zweiten Takt, in dem der Richtungsvektor der Fahrachse in seiner aktuellen Lage wieder ermittelt wird und die Umfeldsensoren kalibriert werden. Dabei sind wieder die vier Kameras über dem Fahrzeug zu erkennen. Diese müssen bauart- und umweltbedingt gleich zum Messsystem aus dem ersten Montagetakt sein. Mittels des Kalibrierungsmusters

können die einzelnen Kameras wiederum in ein gemeinsames Kamerakoordinatensystem überführt werden. Demzufolge kann durch Einmessen mit dem Lasertracker eine statische Transformation zwischen der Targeteinheit und dem Kamerasystem erstellt werden. Um den Richtungsvektor des entsprechenden Fahrzeugs im Koordinatensystem der Drehplatte bestimmen zu können, müssen die aktuellen Karosseriemerkmale wiederholt ermittelt werden. Daraus wird wiederum das Karosseriekoordinatensystem errechnet, um die Transformationsabfolge darstellen zu können.



**Abbildung 6.7: Auslesen der Fahrachse und Umfeldsensor-Kalibrierung in Takt 2**

Durch Diagnoseanbindung kann das jeweilige Fahrzeug identifiziert und die auf dem Werksrechner gespeicherten Daten aus dem ersten Takt aufgerufen werden. Nach Einsetzen des gespeicherten Richtungsvektors in die bestimmte Transformationsabfolge aus Formel 38 wird der Vektor innerhalb des Koordinatensystems der Drehplatte berechnet. Somit kann die Kalibrierung der entsprechenden Sensoren, analog zu dem aufgezeigten Vorgehen des vorherigen Kapitels, durchgeführt werden.

$$\text{Drehplatte } \mathbf{p} = \text{Drehplatte } \mathbf{T}_{\text{Targeteinheit}} \cdot \text{Targeteinheit } \mathbf{T}_{\text{Kamera}} \cdot \text{Kamera } \mathbf{T}_{\text{Karosserie}} \cdot \text{Karosserie } \mathbf{p} \quad (38)$$

- Drehplatte  $\mathbf{T}_{\text{Targeteinheit}}$  : Transformationsmatrix Targeteinheit zur Drehplatte
- Targeteinheit  $\mathbf{T}_{\text{Kamera}}$  : Transformationsmatrix Kamera zur Targeteinheit
- Kamera  $\mathbf{T}_{\text{Karosserie}}$  : Transformationsmatrix Karosserie zur Kamera
- Drehplatte  $\mathbf{p}$  : Richtungsvektor im Drehplatten-Koordinatensystem
- Karosserie  $\mathbf{p}$  : Richtungsvektor im Karosserie-Koordinatensystem

Während der Zeit des Kalibrierprozesses werden die definierten Merkmale der Karosserie zyklisch ermittelt. Dementsprechend wird die Transformation, die sich aufgrund der aktuellen Lage und Orientierung des Fahrzeugs ergibt, kontinuierlich aktualisiert. Dadurch wird die Orientierung des Richtungsvektors der geometrischen Fahrachse innerhalb des Drehplattenkoordinatensystems ständig neu berechnet, was in die aktive Regelung der Targetausrichtung einfließt.

Neben der Nutzung eines Kamerasystems kann das Konzept auch mittels anderer optischer Sensoren umgesetzt werden. Beispielsweise können Linientriangulationssensoren zum Einsatz kommen. Im ersten Takt sind sie bereits an den Adaptionseinheiten vorhanden, um über die Kotflügelkanten den Fahrzeughöhenstand zu ermitteln. Durch diese Sensoren kann im ersten Takt ein Punkt an jedem Kotflügel bestimmt werden. Daraus kann ebenfalls ein Karosseriekordinatensystem aufgespannt werden. Dadurch kann eine Transformation, direkt in die Basis des Radadaptionssystems, bestimmt werden. Das ist möglich, weil durch die Kalibrier Vorrichtung des Radadaptionssystems die Triangulationssensoren untereinander zur Basis kalibriert werden. Das ist aber nur umsetzbar, wenn die Anlagenmodule für die Vermessung der Vorder- und Hinterachse vorhanden sind.

Im zweiten Takt müssen die benötigten Sensoren zusätzlich mit dem Targetmodul zusammen implementiert werden. Wegen der Zugänglichkeit zu den Kotflügeln müssen die Sensoren zusätzlich verfahren werden, um das Durchfahren der Fördertechnik zu ermöglichen. Dazu sind Rahmenkonstruktionen mit Linearachsen notwendig, die die Sensoren ähnlich wie bei den Radadaptionseinheiten vor den Kotflügelkanten platzieren. Um diese Sensoren und deren Bewegungseinheiten in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen, ist wiederum eine Kalibrierlehre erforderlich. Da die Messsysteme wie beim Kameraszenario einen identischen Fehler aufweisen müssen, muss die Kalibrierlehre des Radadaptionssystems in beiden Stationen genutzt werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass keine Messabweichungen durch zwei unterschiedliche Kalibriervorrichtungen entstehen. Wenn die Sensoren aus Takt 2 innerhalb des Koordinatensystems der Targeteinheit bekannt sind, kann über die Punkte der Kotflügelkanten das Karosseriekordinatensystem ermittelt werden. Demzufolge ist es möglich, die Transformation zu berechnen und analog zum Kameraszenario den Richtungsvektor der Fahrachse im Koordinatensystem der Drehplatte darzustellen.

Um die zuvor beschriebene Kalibrierung der Triangulationssensoren umzusetzen, muss für einen Kalibriervorgang die Lehre zur Station des Radadaptionssystems und zu der der Targeteinheit bewegt werden. Das ist innerhalb der Montagelinie schwer zu realisieren. Aufgrund der schlechten Überführbarkeit der Sensoren in ein gemeinsames Koordinatensystem durch die benötigte Kalibriervorrichtung und der Kosten für die Vorrichtung zur Sensorpositionierung in Takt 2 sind die Linientriangulationssensoren weniger als das Kamerasystem geeignet. Hinzu kommt die ungenaue Fahrzeugpositionierung durch die Fördertechnik im Montagetak. Dadurch kann nicht sichergestellt werden, dass der Hochpunkt des entsprechenden Kotflügels immer durch den jeweiligen Sensor erfasst wird. Das kann sich negativ auf den Gesamtprozess auswirken.

Des Weiteren ist die Auslegung für den Fließbetrieb für beide messtechnische Szenarien schwer darzustellen. Dabei müssen unter anderem die Zugänglichkeit und die kontinuierliche Erfassung des Fahrzeugs über einen Förderweg der benötigten Prozesszeit untersucht werden. Das benötigt weiteren Forschungsbedarf außerhalb dieser Arbeit. In einem ersten Schritt bietet das vorgestellte Kamerasystem den besten Ansatz, die Mitnahme der geometrischen Fahrachse für einen getakteten Förderbetrieb zu realisieren. Möchte man dieses Szenario nutzen, muss das Konzept in weiteren Untersuchungen zusammen mit dem Radadaptionssystem und dem Targetmodul validiert werden.

## 6.5 Erprobung am Beispiel einer Kalibrierung des Radarsensors

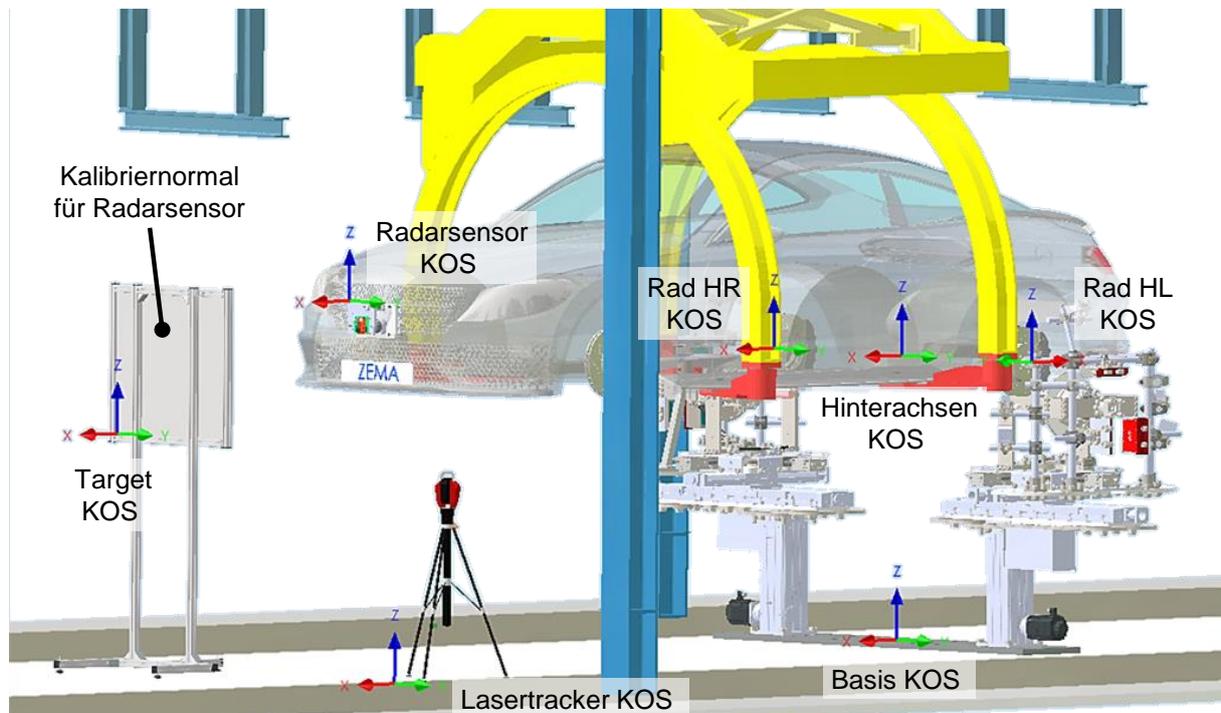
Nach der konzeptionellen Entwicklung und der Implementierung des Targetmoduls zusammen mit dem Radadaptionssystem soll in diesem Unterkapitel die Validierung für einen realen Inbetriebnahmeprozess durchgeführt werden. Dazu wurde die Kalibrierung eines Radarsensors mittels Drehplatte gewählt. Folglich werden der Versuchsaufbau und die dazugehörigen Rahmenbedingungen aufgezeigt. Da der reale Aufbau des Targetmoduls noch nicht existiert, wurde das experimentell nachgestellt. Im Anschluss daran werden die Versuchsdaten ausgewertet und ein Fazit gezogen. Parallel dazu wurde die Maschinenfähigkeit des Teilsystems zusammen mit dem Radadaptionssystem für den untersuchten Prozess bewertet und eine Zuordnung je Einflussfaktor vorgenommen.

### 6.5.1 Versuchsaufbau und Ablauf

Um den Inbetriebnahmeprozess eines Umfeldsensors qualitativ bewerten zu können, wurde ein Kalibrierversuch mit dem Gesamtaufbau in der Montagelinie der Modellfabrik vorgenommen. Bei dem Versuch soll ein LRR Radarsensor kalibriert werden. Der Sensor ist ein experimentelles Testsystem, das frei parametrierbar sein kann. Ein realer Sensor aus den Serienfahrzeugen bietet keine zugänglichen Schnittstellen, die bei dem Versuch genutzt werden können. Das Sensorsystem wurde im Frontbereich an das Testfahrzeug BWM montiert und befindet sich in der gleichen Position wie der Radarsensor der Serienmodelle. Zusätzlich bietet die Grundplatte des experimentellen Sensorsystems die Möglichkeit, diese mittels Lasertracker anzumessen und daraus ein Sensorkoordinatensystem zu erstellen.

Neben dem zu kalibrierenden Radarsensor am Fahrzeug und dem Radadaptionssystem, das in dem Montagetakt benötigt wird, muss ein Kalibriernormal in der Fahrzeugfront vorhanden sein. Da das zuvor beschriebene Targetmodul als realer Aufbau noch nicht zur Verfügung steht, wurde eine Targetplatte in einem Halterahmen stationär aufgebaut. Die Targetplatte erfüllt dabei die gleichen Anforderungen an Material, Dimensionen, Ebenheit und Rauheit wie beim späteren realen Aufbau. Diese Anforderungen werden durch die Inbetriebnahmeverfahren des entsprechenden Sensorsystems durch den OEM vorgegeben. Der Aufbau des Targets kann jedoch nur in einer festen Position und Orientierung vor dem Fahrzeug aufge-

stellt werden. Eine Drehung der Platte, unabhängig vom Grundrahmen, ist nicht möglich. Zusätzlich bietet das Versuchstarget wie die Grundplatte des Radarsensors die Möglichkeit, diese mit dem Lasertracker anzumessen und somit ein Targetkoordinatensystem zu bilden. Das Koordinatensystem ist dabei so angelegt, dass es sich in der YZ-Ebene der Plattenoberfläche befindet. Abbildung 6.8 zeigt den gesamten Versuchsaufbau mit den entsprechenden relevanten Koordinatensystemen.



**Abbildung 6.8: Versuchsaufbau zur Radarsensor-Inbetriebnahme in der Modellfabrik**

Um den Versuch mit den vorhandenen Komponenten durchführen zu können, wird zusätzlich ein Lasertracker benötigt. Durch ihn werden die entsprechenden Koordinatensysteme gemessen und daraus die statischen Transformationen erstellt. Dazu wird in einem ersten Schritt das Target entsprechend der Prüfvorschrift vor dem Fahrzeug positioniert. Im Anschluss daran wird das Target- und das Basiskoordinatensystem eingemessen, um daraus eine statische Transformation erstellen zu können. Der Targetaufbau darf ab diesem Zeitpunkt nicht mehr bewegt werden. Die ermittelte Transformation  $T_{\text{Basis}}^{\text{Target}}$  kann zusammen mit der Formel 35 genutzt werden, um den Richtungsvektor der geometrischen Fahrachse zu der aktuellen Position des Targetaufbaus zu bestimmen. Dabei ersetzt die ermittelte statische Transformation des Versuchs die von der Basis in die Targeteinheit und die von dort in die damit verbundene Drehplatte. Im Anschluss daran kann analog zum realen Targetmodul der Winkel berechnet werden, unter dem der Richtungsvektor auf das Kalibriernormal trifft. Wie schon im Kapitel 6.3 beschrieben, wird dazu der Winkel zwischen dem transformierten Richtungsvektor und Y-Vektor des Targetkoordinatensystems mit Formel 23 berechnet. Da der Targetaufbau nicht durch eine automatisierte Regelung so ausgerichtet werden kann, dass die Fahrachse im rechten Winkel auf das Kalibriernormal trifft, wird der berechnete Winkel in der aktuellen Konstellation

abgespeichert. Abschließend muss noch bestimmt werden, unter welchem Winkel der Radarsensor das Kalibriernormal in der aktuellen Ausrichtung erfasst. Das ist erforderlich, da dieser Wert dem Kalibrierwert des Sensors entspräche, wäre die Targetplatte im rechten Winkel zur Fahrachse ausgerichtet. Um bei der Ermittlung des Winkels durch den Radarsensor nicht dessen Ungenauigkeiten zu erhalten, wurden die Punkte für das Koordinatensystem der Sensorgrundplatte mittels Lasertracker angemessen. Dadurch kann über das lokale Koordinatensystem des Trackers eine Transformation in das Targetkoordinatensystem erstellt werden. Folglich kann der X-Richtungsvektor des Radarsensorkoordinatensystems in dem des Targets dargestellt und der Winkel zwischen dem Vektor und der Y-Achse des Targetkoordinatensystems bestimmt werden. Daraus ergibt sich der Winkel, unter dem der Radarsensor das Kalibriernormal erfasst. Dieses Vorgehen zur Ermittlung der Ausrichtung mittels Lasertracker ist sinnvoll, weil die Produkttoleranzen nicht beachtet werden und so das Betriebsmittel unabhängig vom Produkt bewertet werden kann. Da das Kalibriernormal durch den stationären Versuchsaufbau einen größeren Kalibrierwinkel zum Radarsensor aufweisen kann, kommen durch das Vorgehen auch keine größeren Messfehler durch den Radarsensor zustande, denn diese nehmen mit größeren Winkeln zu.

Die beschriebene Berechnung der Winkel erfolgt einmalig als Kalibrierung des Radarsensors, bei dem ein Offsetkalibrierwert für den Sensor berechnet wird. Im Versuchsverlauf werden nach der Kalibrierung 50 Messungen durchgeführt, bei denen das Fahrzeug immer wieder neu durch das System vermessen und ein Offsetwert bestimmt wird. Jeder dieser Werte wird mit dem ersten Kalibrieroffsetwert verglichen und sollte optimalerweise nur eine geringe Abweichung dazu aufweisen. Der Targetaufbau wird über die gesamte Versuchsreihe nicht bewegt, da er statisch zu der Basis eingemessen wurde und somit eine konstante Größe darstellt.

### 6.5.2 Auswertung und Ergebnisse der Versuchsmessungen

Durch den beschriebenen Versuchsablauf werden die Winkel bestimmt, unter denen die geometrische Fahrachse und die Sensorachse des Radarsensors auf dem stationär positionierten Targetaufbau eintreffen. Bei einer korrekten Ausrichtung des Kalibriernormals und einer Kalibrierung des Sensors sollten die beiden Winkel  $90^\circ$  betragen. Abbildung 6.9 zeigt die Winkel, die sich bei der Versuchsmessung ergeben. Dabei ist der Winkel  $\omega$  abhängig von der Ermittlung und Berechnung der geometrischen Fahrachse durch das Radadaptionssystem. Normalerweise flösse in diese Abhängigkeit noch die Positioniergenauigkeit des Targetmoduls ein. Da in dem Versuch das Kalibriernormal statisch mittels des Targetaufbaus positioniert wurde, ist die Reproduzierbarkeit des Winkels  $\omega$  lediglich vom Radadaptionssystem abhängig.

Der Winkel  $\psi$  bildet sich produktabhängig und wird durch den Radarsensor bestimmt. Dieser Winkel wird beim Versuch aus dem bestimmten Koordinatensystem des Radarsensors mit dem Lasertracker berechnet. Im folgenden Versuch ist dieser ermittelte Winkel abhängig von der Messgenauigkeit und dem Einmessen der Merkmale mittels Lasertracker. Das ist den Produkttoleranzen des Radarsensors gleichzusetzen. Da das Kalibriernormal in dem Versuch



nachgelagert ist. Zusätzlich zur nachstehenden Tabelle ist im Anhang eine grafische Gesamtauswertung beigelegt.

**Tabelle 6.1: Auswertung der Maschinenfähigkeitsbewertung zur Radarsensor-Inbetriebnahme**

Target Versuch $C_m / C_{mk}$	GFA zu Target	Sensor zu Target	Gesamt IBN
Mittelwert gesamt ( $x_g'$ )	-318,940317	-61,7111765	0,57117647
Sollwert ( $x_s'$ )	-318,937634	-61,14	0
Reproduzier- barkeit ( $r_p'$ )	0,00851639	5,316	5,316
Standardab- weichung ( $s_g'$ )	0,00286128	1,45279665	1,45279665
$C_m$	349,493722	2,75331031	3,44163789
$C_{mk}$	349,181117	2,62225814	3,31058572
$C_{mko}$	349,806327	2,88436248	3,31058572
$C_{mku}$	349,181117	2,62225814	3,57269006

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, besitzt der Gesamtprozess eine Fähigkeitskenngröße von über 3, was die Eignung der Maschinenfähigkeit nachweist. Auch die Eignung der Winkelmessung zwischen Radarsensorachse und Targetaufbau ist mit einem Kennwert von über 2 nachgewiesen. Dabei ist dieser Wert nicht vollkommen aussagefähig, da die produktseitige Ausrichtung nur mittels Lasertracker bestimmt werden konnte. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Ausrichtungsermittlung der geometrischen Fahrachse zum Targetaufbau trotz des kleinen Toleranzbereichs von  $\pm 3$  Winkelminuten eine sehr hohe Qualitätsfähigkeitskenngröße besitzt. Das zeigt, wie hochgenau der Richtungsvektor der Fahrachse durch das Radadaptionssystem im Targetkoordinatensystem bestimmt wird und bestätigt damit die Untersuchungen aus Kapitel 5.6.

Die Ergebnisse aus dem Versuch zeigen, dass eine Inbetriebnahme an einem Radarsensor erfolgreich durchgeführt werden konnte. Der Versuch wurde jedoch unter einigen Restriktionen durchgeführt, die sich geringfügig vom realen Systemaufbau unterscheiden. Durch die hohen Fähigkeitsindizes, die durch die Betriebsmittel erbracht wurden, lässt sich auch unter den Versuchsbedingungen eine sehr gute Eignung abbilden. Trotzdem muss bei späterer Umsetzung des Targetmoduls eine komplette Messsystemanalyse unter Produktionsbedingungen durchgeführt werden, um die aktuellen Versuchsergebnisse zu bestätigen.

## 7 Fähigkeiten des Gesamtsystems in der Produktion

In diesem Kapitel soll eine kurze Reflektion der vorgestellten prototypischen Systeme gegeben werden. Des Weiteren werden die aktuell verfügbaren Fähigkeiten zu denen, die für einen Serienproduktionsbetrieb benötigt werden, aufgezeigt. Es werden weitere Handlungsempfehlungen und weiterer Forschungsbedarf für die Teilsysteme dargestellt. Im abschließenden Unterkapitel wird ein Resümee mit Bezug zum Zielbild gezogen. Zusätzlich werden weitere Potenziale innerhalb der Fahrzeuginbetriebnahme aufgezeigt, für die die neuen Betriebsmittel genutzt werden können.

### 7.1 Gesamtaufbau des Prototyps in einer Modellfabrik

Das prototypische Radadaptionssystem für die Vermessung der Fahrwerkgeometrien an der Hinterachse wurde, nachdem es optimiert und zur Messfähigkeit gebracht wurde, in einer Modellfabrik validiert. Unter produktionsähnlichen Bedingungen konnte dessen Prozesseignung festgestellt werden. In einem weiteren Versuch wurde mit einem konzeptionellen Targetaufbau die Inbetriebnahme eines Radarsensors in Kombination mit dem Radadaptionssystem durchgeführt. Dabei wurden leichte Restriktionen zum realen Inbetriebnahmeprozess akzeptiert, da der Targetaufbau nur manuell bewegt werden kann und daher statische Einmessungen mittels Lasertracker benötigt werden. Daher soll in einem späteren Versuch unter realen Produktionsbedingungen eine Bestätigung der Versuchsvalidierung erbracht werden. Dabei müssen unter anderem auch weitere Targetmodulgruppen erprobt werden. Beispielsweise muss die Eignung des Konzepts zur Inbetriebnahme eines Kamerasystems des Fahrzeugs mittels eines Monitors nachgewiesen werden. Auch eventuelle Einstellmöglichkeiten für die Scheinwerfersysteme innerhalb der Montagelinie sind zu untersuchen.

Neben weiteren benötigten Untersuchungen und Erprobungen am Targetmodul ist es auch ratsam, für ein Serienproduktionssystem zusätzliche Modifikationsmaßnahmen am Radadaptionssystem vorzunehmen. Dabei steht die Kompensation der Fahrzeugaushebung im Vordergrund. Durch Einfedern des Fahrzeugs in die K0-Lage ist es möglich, dass die fahrzeugeigene Gewichtskraft nicht ausreicht, um durch Gegenhalten das Fahrzeug in der Fördertechnik zu halten. Das Ausheben des Fahrzeugs kann zwar durch die Adaptionseinheiten erkannt werden, jedoch kann durch die undefinierte Lage keine Vermessung stattfinden. Um dem entgegenzuwirken, wurden die Testfahrzeuge für die Validierungsversuche mit zusätzlichen Gewichten beladen. Da das in der Serienproduktion nicht umsetzbar ist, muss es in Form einer Niederhaltevorrichtung realisiert werden. Diese Vorrichtung kann in Kombination mit dem Radadaptionssystem in die Montagelinie implementiert werden. Dabei fahren vom Boden her Absteckstifte in dafür vorgesehene Zentrierbohrungen der Längsholmen der Karosserie, heben den Fahrzeugaufbau leicht an und verriegeln sich dort. Dadurch bleibt das Fahrzeug beim Einleiten der Hubkraft auf die Achsen durch die Adaptionseinheiten in der definierten Lage.

Um die maximale Serientauglichkeit des Radadaptionssystems zu gewährleisten, können zusätzliche weitere Optimierungen an der Messtechnik vorgenommen werden. Die Verfolgung des Mittelpunkts des Radadaptionkopfs kann anstelle von taktilen Sensoren an der Schwimmeinheit mit Hilfe der Messtechnik hinter dem Adaptionkopf erfolgen. Dazu müssen die drei Punktriangulationssensoren gegen Linientriangulationssensoren ausgetauscht werden. Dadurch können nicht nur die Distanzen und daraus die Ebene des Adaptionkopfs bestimmt werden, sondern auch die Außenkonturen des Kopfs. Mit den drei erfassten Außenkonturen der kreisförmigen Messfläche des Adaptionkopfs kann der Schwerpunkt, der zentrisch zum Mittelpunkt des Kopfs liegt, bestimmt werden. Dadurch kann ein noch effizienterer Messvorgang erzielt werden.

## 7.2 Resümee und Potenziale für zukünftige Inbetriebnahmen

Nachdem das Radadaptionssystem zur Prozessreife geführt wurde, konnte dessen Eignung unter produktionsähnlichen Bedingungen nachgewiesen werden. In einem weiteren Validierungsversuch wurde ein Radarsensor mit einem zusätzlichen Targetaufbau in Betrieb genommen. Auch bei diesem Versuch konnte die Systemeignung anhand der Fähigkeitsindizes festgestellt werden. Somit können die Betriebsmittel genutzt werden, um die notwendigen Inbetriebnahmeprozesse durchzuführen. Dadurch ist die Umsetzung des Zielbilds dieser Arbeit aus Abbildung 1.3 sichergestellt. Neben der Realisierbarkeit des Gesamtziels durch die Betriebsmittel wurden auch die Anforderungen, die in Tabelle 3.2 definiert wurden, erfüllt. Dabei wurden Anforderungen wie beispielsweise an die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erfüllt oder teilweise sogar noch übertroffen. Darüber hinaus wurde die Integrierbarkeit und Skalierbarkeit des Gesamtsystems für den Einsatz in der Montagelinie dargestellt. Des Weiteren konnten über die gesamte Arbeit alle wissenschaftlichen Fragestellungen aus Kapitel 3.2 beantwortet werden.

Neben den behandelten Fragestellungen zur Umsetzung der Ziele sind darüber hinaus weitere Inbetriebnahmeprozesse mit den entwickelten Betriebsmitteln denkbar. Daher sind nicht nur Messungen der Fahrwerkgeometrie mit dem Radadaptionssystem und eine Kalibrierung der Umfeldsensoren des Fahrzeugs möglich. Auch Prüfprozesse, die derzeit auf dem Rollenprüfstand ablaufen wie die Vertauschungs- und Funktionsprüfungen des Bremssystems sowie deren Sensorik, können mittels des Radadaptionssystems durchgeführt werden. Daneben können mit dem System auch Inbetriebnahmeprozesse seitens des Fahrzeugantriebsstrangs bei konventionellen und Elektrofahrzeugen realisiert werden. Zusätzlich sind Messungen des Höhenstands und der augenblicklich anliegenden Radlast bzw. Federkraft der Fahrzeugachse möglich. Daraus ergibt sich eine Vielfalt von Möglichkeiten, um auch in Zukunft neue Automobiltechnologien In-Line zu prüfen und einer Inbetriebnahme zu unterziehen, was zur Entlastung und Effizienzsteigerung des Bandendes maßgeblich beiträgt. Durch diese Möglichkeiten, die sich seitens des Betriebsmittels ergeben, lässt sich eine intelligente Inbetriebnahme der Fahrzeugsysteme darstellen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung und Fazit

Durch die ständige Weiterentwicklung neuer Fahrzeugtechnologien und –assistenzfunktionen steigt der Anteil der Sensorik und Aktorik in den Fahrzeugen. Damit rückt das autonome Fahren immer mehr in den Vordergrund. Einer der wichtigsten Punkte zur Realisierung der aktuellen und zukünftigen automatisierten Fahrfunktionen ist neben der Software die Umfelderkennung durch das Fahrzeug. Dazu sind Umfoldsensoren im Fahrzeug verbaut, die auf unterschiedlichen physikalischen Messgrößen basieren. Wichtig sind dabei Sensoren, die auf Kamera, Radar und Lidar Systemen basieren und nicht nur das direkte sondern auch das weit entfernte Umfeld des Fahrzeugs überwachen müssen. Dazu sind beispielsweise Radarsensoren verbaut, die aktuell bis zu einer Entfernung von 250 Metern Objekte detektieren können. Aufgrund der Verbautoleranzen dieser Sensoren ist zwingend eine Kalibrierung der Umfoldsensoren zu einem Referenzbezug des Fahrzeugs notwendig. Dieser Bezug bildet die geometrische Fahrachse, die sich durch die Winkelhalbierende der Gesamspur an der Hinterachse bildet.

Die Inbetriebnahme dieser Sensoren und die damit verbundenen Fahrfunktionen finden im EOL der OEMs statt. Im EOL befinden sich parallele Linienstrukturen mit mehrfach vorhandener Prüftechnik, da in diesem Bereich der Linientakt nicht einzuhalten ist. Unter der Prüftechnik befinden sich der Fahrwerkgeometrie- und Fahrerassistenzsystemprüfstand, auf denen die Fahrwerkeinstellung und die Kalibrierung der Umfoldsensoren stattfinden. In diesem Bereich fahren dabei Werker die Fahrzeuge von Prüfstand zu Prüfstand. Daraus wird ersichtlich, dass aufgrund der Strukturen sowie dem Betriebsmittel und Werkerbedarf enorme Investitions- und Betriebskosten entstehen. Neben dieser Ineffizienz gibt es aktuell keine Möglichkeit der produktionsseitigen Absicherung für die Inbetriebnahmeprozesse sicherheitsrelevanter Sensoren. Das muss jedoch spätestens mit der Stufe des hochautomatisierten Fahrens realisiert werden.

Um diesen aufgezeigten Problematiken entgegenzuwirken, soll durch ein neues Betriebsmittel die Inbetriebnahme relevanter Umfoldsensoren sowie die Fahrwerkeinstellung bereits in der Montagelinie durchgeführt werden. Durch dieses Vorhaben kann eine Verschlinkung des EOLs in Richtung einer Einlinigkeit erfolgen. Weiterhin wird die Absicherung der Fahrfunktionen durch die Inbetriebnahme in der Linie und einer qualitativen Überprüfung innerhalb des bestehenden EOL gewährleistet. Ein zusätzlicher Gewinn besteht darin, dass durch die bereits erfolgte Inbetriebnahme in der Montagelinie selbstfahrende Fahrzeuge autonom durch das EOL bewegt werden können. Ermöglicht werden diese Teilziele des EOL durch das Primärziel der In-Line Inbetriebnahme mittels eines neuen Betriebsmittels. Die Herausforderung dabei ist, die gleichen Systemeigenschaften wie von aktuellen Prüfständen des EOLs zu erzielen.

Dabei wurde ein bestehendes Konzept eines Radadaptionssystems aufgegriffen, das sich In-Line mit der Fahrzeugradnabe über ein Dehnungsgreifer verbinden kann. Um dieses System in einem ersten Schritt für eine Fahrwerkvermessung nutzen zu können, musste die benötigte Messtechnik implementiert und Modifikationen vorgenommen werden. Dabei wurden in Dauerversuchsreihen die Einflüsse und Abnutzungen der Spannhülsen der Dehnungsgreifer untersucht. Aus den Erkenntnissen der Versuchsreihen wurden weitere notwendige Änderungen an dem kinematischen Aufbau vorgenommen sowie Kompensationen und Ausgleichsmechanismen geschaffen. Um das System zur Serienreife führen zu können, wurde zusätzlich eine Kalibriermöglichkeit entwickelt. Als abschließende Optimierungsmaßnahme wurde eine Betriebsmittel- und Prozessskalierung erzeugt, um den größtmöglichen und flexiblen Einsatz für einen späteren Serienbetrieb bei einem OEM zu ermöglichen.

Neben den ersten Untersuchungen und Modifikationen an dem Radadaptionssystem musste ein Messalgorithmus entwickelt werden, der unter den Gegebenheiten des Adaptionssystems die Fahrwerkgeometrien ermittelt. Dazu musste ein Modell entwickelt werden, das die einzelnen angelegten Koordinatensysteme sowie die Transformationsabfolgen und die entsprechenden Berechnungen dazu enthält. Parallel dazu wurden ein mathematisches Kalibrierverfahren entwickelt und Strategien für das Einmessen des Systems mittels Lasertracker bei einer Erstinbetriebnahme erstellt. Aus den berechneten Rad- und Symmetrieebenen des Fahrzeugfahrwerks wurde ein Ablauf zur Bestimmung der Spur und Sturzwerte sowie der relevanten geometrischen Fahrachse erstellt. Die entwickelten Modelle und Abläufe wurden mit der Software Matlab umgesetzt und zusammen mit der Prozesssteuerung des Radadaptionssystems implementiert. Im Anschluss daran wurde eine Messsystemanalyse mit dem prototypischen System in einer Modellfabrik durchgeführt und Einflussfaktoren auf die Systemparameter analysiert. Dadurch soll die Eignung des Adaptionssystems für den Prozess der Fahrwerkvermessung durch die Fähigkeitsindizes nachgewiesen werden. Diese Untersuchung hat den Nachweis der Fähigkeit des Systems erbracht und es konnten vergleichbare Messwerte zu einem Auditsystem des Status Quo ermittelt werden.

Nachdem die Eignung des Radadaptionssystems zur In-Line Fahrwerkgeometrievermessung nachgewiesen wurde, wurde ein Konzept für ein Targetmodul entwickelt. Das Modul soll zusammen mit dem Radadaptionssystem die Inbetriebnahme der relevanten Sensoren durchführen. Dabei wurden die unterschiedlichen Auslegungen der Modulgruppen je Umfeldsensor diskutiert und die mathematische Einbindung aufgezeigt. Damit die Modularität des Gesamtsystems gewährleistet wird, wurde weiterhin ein Konzept zur Fahrachsmithnahme erstellt, um Adaptionseinheit und Targetmodul örtlich voneinander zu trennen. Im Anschluss daran wurde ein Versuch zur Kalibrierung eines Radarsensors durch das Gesamtsystem mit einem Targetaufbau in einer Modellfabrik durchgeführt. Dabei konnte die Fähigkeit unter einigen Versuchsrestriktionen ebenfalls nachgewiesen werden. Das zeigt, dass das erforschte und entwickelte Gesamtsystem für die angestrebten Ziele dieser Arbeit eingesetzt werden kann. Dadurch wird es zukünftig möglich, nicht nur das EOL zu verschlanken, sondern auch eine

Effizienzsteigerung durch Kosteneinsparungen zu erzielen. Des Weiteren wird die produktionsseitige Absicherung zukünftiger autonomer Fahrfunktionen ermöglicht, was ein bedeutender Schritt für die aktuelle und zukünftige Fahrzeugproduktion ist.

## 8.2 Ausblick

Die Inbetriebnahme des Fahrwerks und der primären Umfeldsensoren des Fahrzeugs innerhalb der Montagelinie stellt einen ersten Schritt zur produktionsseitigen Absicherung und Effizienzsteigerung des EOLs zum Status Quo dar. Durch die in dieser Arbeit entstandenen Betriebsmittel können die Schritte umgesetzt werden und somit auf zukünftige Fahrzeugtechnologien wie das autonome Fahren reagieren. Neben den diskutierten Inbetriebnahmeprozessen kann das Radadaptionssystem darüber hinaus für weitere Prozesse genutzt werden. Dabei stehen die Inbetriebnahmeprozesse seitens des Bremssystems und Antriebsstrangs im Vordergrund, da Drehmomente zwischen Adaptionkopf und Radnabe bidirektional übertragen werden können.

Des Weiteren ist für die reale Umsetzung der unterschiedlichen Skalierungsstufen des vorgestellten Systems weitere Forschung notwendig, um auch diese Ausbaustufen zur produktionsreife zu führen. Das betrifft sowohl die Skalierungen für die Realisierung des Systems im Fließbetrieb als auch die unterschiedlichen Ausbaustufen des Targetmoduls. Dabei muss untersucht werden, welcher zukünftige Umfeldsensortyp sich mit welcher Ausbaustufe des Targetmoduls in Betrieb nehmen lässt. Dabei müssen die entsprechenden Skalierungsstufen, wie in dieser Arbeit bereits vorgestellt, einer Untersuchung auf ihre Prozesseignung unterzogen werden. Das gilt auch für das vorgestellte Szenario der Mitnahme der geometrischen Fahrachse innerhalb der Montagelinie in einen Folgetakt.

Um den Kern dieser Arbeit weiter zu verfolgen, bedarf es auch zusätzlicher Forschung im Produktbereich. So können beispielsweise nach der In-Line Kalibrierung der primären Umfeldsensoren für den Fernbereich die restlichen Sensoren mittels Sensorfusion durch das Fahrzeug selbst in Betrieb genommen werden. Das ist möglich, weil die Sensorsysteme im Nahbereich einen größeren Toleranzbereich erlauben. Dadurch können weitere Betriebsmittel aus dem EOL eingespart werden. Weiterhin ist es denkbar, relevante Daten des Fahrwerks innerhalb der Montagelinie global zur Verfügung zu stellen, die für die Inbetriebnahme mehrerer Sensoren durch die Datenfusion in allen Montagestationen genutzt werden können. Neben den weiteren Forschungen im Produktionsumfeld müssen zukünftig auch diejenigen im After-Sales-Bereich betrachtet werden, um dem autonomen Fahren gerecht zu werden. Dabei ist es möglich, globale Messdaten dem Fahrzeug zur Verfügung zu stellen, die in der Werkstatt für erneute Inbetriebnahmen nutzbar sind. Daher stellt diese Arbeit für alle weiteren und zukünftigen Forschungsansätze eine essenzielle Grundlage dar.

## V Literaturverzeichnis

- [ADA18] ADAC e.V.: Autonomes Fahren: Digital entspannt in die Zukunft. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autonomes-fahren/autonomes-fahren-aktuelle-technik/> [Stand: 05.02.2019]
- [AHR13] Schutzrecht Deutschland DE102013021475A1 (18.06.2015). Ahrens, K.; Herbort, S.; Jostschulte, K., et al.: Optische Lenkwinkelbestimmung. Offenlegungsschrift
- [AUE17] Auerbach, B.: Bundestag beschließt Gesetz zum autonomen Fahren. URL: <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/unternehmen---institutionen/bundestag-beschliesst-gesetz-zum-autonomen-fahren/12193302> [Stand: 02.02.2020]
- [AUT18] Auto Bild: Autonomes Fahren: tödlicher Unfall von Uber. Tödlicher Softwarefehler? URL: <https://www.autobild.de/artikel/autonomes-fahren-toedlicher-unfall-von-uber-13410181.html> [Stand: 26.02.2019]
- [BAN17] Bantleon, M.: Einführung in die Messsystemanalyse (MSA). Steinbeis-Transfer-Institut Six Sigma. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Martin-Bantleon-2/publication/314113402\\_Einfuehrung\\_in\\_die\\_Messsystemanalyse\\_Introduction\\_to\\_the\\_Measuegment\\_system\\_anal-ysis/links/58b5e10eaca27261e5165fe5/Einfuehrung-in-die-Messsystemanalyse-Introduction-to-the-Measuegment-system-analysis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Martin-Bantleon-2/publication/314113402_Einfuehrung_in_die_Messsystemanalyse_Introduction_to_the_Measuegment_system_anal-ysis/links/58b5e10eaca27261e5165fe5/Einfuehrung-in-die-Messsystemanalyse-Introduction-to-the-Measuegment-system-analysis.pdf) [Stand: 07.04.2021]
- [BAR16] Bardt, H.: Deutsche Autoindustrie und autonomes Fahren. In: Wirtschaftsdienst. 96. Jg., 2016, Nr. 10, S. 776–778
- [BOH13] Bohn, M.; Hetsch, K.: Toleranzmanagement im Automobilbau. München: Hanser, 2013
- [BOR14] Borgeest, K.: Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. 3.; aktualis. u. verb. Aufl. Wiesbaden: Springer/Vieweg, 2014
- [BRA02] Brannon, R.: ROTATION. A review of useful theorems involving proper orthogonal matrices referenced to threedimensional physical space. University of New Mexico, New Mexico, 09.05.2002

- [BRU16] BRUNNER, F.; Wagner, K.: Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis. 6. Auflage. München: CARL HANSER Verlag GMBH, 2016
- [BUN15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile) [Stand: 02.02.2020]
- [BUR20] Burke E. Porter Machinery Company: End of Line Systems. Non-Contact Wheel Alignment. URL: <https://www.bepco.com/de/products/end-of-line-systems/non-contact-wheel-alignment/> [Stand: 17.07.2020]
- [CON14] Continental Advanced Driver Assistance System: Datenblatt ARS4-A. Short Range Radar. 2014
- [CRA05] Craig, J.: Introduction to robotics. Mechanics and control. 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2005
- [DAI15] Dai, J. S.: Euler–Rodrigues formula variations, quaternion conjugation and intrinsic connections. In: Mechanism and Machine Theory. 92. Jg., 2015, S. 144–152
- [DAI19] Daimler AG: Prüfvorschrift DISTRONIC Radar. Sindelfingen, 2019
- [DAI10] Daimler AG: Prüfvorschrift Fahrwerk. Sindelfingen, 2010
- [DAN17] Danner, F.: Befähigung zur effizienzsteigernden Produktion von Fahrzeugen mit konventionellen und elektrifizierten Antriebssystemen durch innovative Prüf- und Inbetriebnahmeverfahren. Dissertation. RWTH, Aachen, 2017
- [DIE11] Dietrich, E.: Vergleich von MSA und VDA Band 5. Wo liegen die Unterschiede? In: QZ. 56. Jg., 2011, Nr. 6, S. 30–34
- [DIE02] Dietrich, E.: Leitfaden zum "Fähigkeitsnachweis von Messsystemen". Birkenau, 17.09.2002 (Version 2.1)
- [DIE15a] Dietrich, E.; Conrad, S.: Eignungsnachweis von Messsystemen. 4., überarb. (aktualisierte) Aufl. München: Hanser, 2015

- [DIE15b] Dietrich, E.; Radeck, M.: Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7. 1. Aufl. München: Hanser, 2015
- [DIE17] Dietrich, E.; Schulze, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. 5., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2017
- [DIN15] Deutsche Norm DIN EN ISO 9000 (November 2015): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015. DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [DIN13] DIN ISO 8855 (November 2013): Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe (ISO 8855:2011). DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [DIN94] DIN 70 000 (Januar 1994): Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe (ISO 8855 Ausgabe 1991, modifiziert). DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [DIN92] DIN 70 027 (August 1992): Straßenfahrzeuge - Fahrwerksvermessung - Anzugebende Fahrwerksdaten, Meßbedingungen. DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [DOM19] Dominsky, S.: Hella Gutmann: CSC-Tool – jetzt auch für Lidar. Auch als mobile Version erhältlich. URL: <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/hella-gutmann-csc-tool-jetzt-auch-fuer-lidar-a-886839/> [Stand: 07.06.2020]
- [DRE17] Drees, C.: Die sechs Stufen des autonomen Fahrens. URL: <https://www.mobilegeeks.de/artikel/autonomes-fahren/> [Stand: 01.12.2019]
- [DÜR17a] Dürr Assembly Products GmbH: x-DASalign. Prüfstand für Fahrerassistenzsysteme. Püttlingen, 2017
- [DÜR17b] Dürr Assembly Products GmbH: x-wheel. Der innovative Fahrwerkgeometrieprüfstand. Püttlingen, 2017
- [DÜR15] Dürr Assembly Products GmbH: Voll-/Halbautomatische Fahrwerkeinstellung in der Montagelinie und am Bandstrassenende. Fahrwerkstand in der Montagelinie - PKW. Püttlingen, 2015

- [EBE15] Eberdt, C.: Driverless Vehicle Transport EOL End of Line (Montagesysteme End-of-Line intensiv). Köln, 29.09.2015
- [EBE18] Eberhardt, D.: Die Vorteile von Lidar-Sensoren im autonomen Fahrzeug. URL: <https://www.next-mobility.news/die-vorteile-von-lidar-sensoren-im-autonomen-fahrzeug-a-710222/> [Stand: 09.08.2019]
- [EBN13] Ebner, H.-T.: Motivation und Handlungsbedarf für Automatisiertes Fahren. Bonn, 11.12.2013
- [EIG09] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [EIL15] Eilers, J.: Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme. (Reihe: Fertigungsmesstechnik & Qualitätsmanagement, Band 9/2015). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl., 2015
- [EIL11] Eilers, J.; Herrmann, A.; Janssen, C., et al.: Optimierung der Prozesskette zur Hinterachseinstellung. In: ATZ produktion. 4. Jg., 2011, Nr. 03/2011, S. 56–61
- [FEL16] Feldmann, A.: Genaue und robuste Online-Kalibrierung für Stereo-Kamera-Systeme mit fester Basisbreite. Disseratation. Universität Bielefeld, Bielefeld, 12.04.2016
- [FLÖ20] Flörecke, K.-D.: Laser für die Straße. Lidar-Systeme sind ein potenzieller Milliardenmarkt - Technik noch zu teuer. In: Automobilwoche, 03.02.2020, Nr. 4, S. 17
- [GEH18] Gehrke, V.: Fahrwerkvermessung. Notwendige Voraussetzung. In: ASP Werkstatttechnik, 2018, Nr. 02/2018, S. 40–41
- [GEZ17] Gezer, M.: Ganzheitliche Betrachtung von produkt- und produktionsseitigen Toleranzbeziehungen für eine effiziente Inbetriebnahme hochautomatisierter Fahrzeuge. Masterarbeit. RWTH Aachen University, ZeMA gGmbH, Aachen, 07.12.2017
- [GRE01] Schutzrecht Europa EP1128157A1 (29.08.2001). Greff, U.; Altmayer, A.: Vorrichtung zur Vermessung der Geometrien der Radachsen einer Achse eines Fahrzeugs sowie Verwendung der Vorrichtung. Europäische Patentanmeldung

- [GRE18] Gresser, J.: Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme. Eine Methodik zur Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen am Beispiel des autonomen Fahrens. Disseratation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2018
- [GÜN07] Günthner, W.: Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität: Springer Berlin Heidelberg, 2007
- [HEB20] Hebermehl, G.: Wieder tödlicher Unfall mit Tesla-Autopilot. Zwei Personen im gerammtem Honda Civic sterben. URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/tesla-autopilot-unfall-honda-civic/> [Stand: 03.03.2020]
- [HEI17] Heineke, K.; Kampshoff, P.; Mkrtchyan, A., et al.: Self-driving car technology: When will the robots hit the road? URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/self-driving-car-technology-when-will-the-robots-hit-the-road> [Stand: 26.02.2019]
- [HEI13] Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S.: Fahrwerkhandbuch. Grundlagen · Fahrdynamik · Komponenten · Systeme · Mechatronik · Perspektiven. 4., überarb. u. erg. Aufl. 2013. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg, 2013
- [HEL19] HELLA GUTMANN SOLUTIONS GMBH: Produktkatalog. URL: [https://www.hella-gutmann.com/fileadmin/00\\_HGS\\_Bilder/X\\_Downloads/Broschuere\\_Produktkatalog/KAT\\_HGS\\_Produnkte\\_DE\\_09-2019\\_web.pdf](https://www.hella-gutmann.com/fileadmin/00_HGS_Bilder/X_Downloads/Broschuere_Produktkatalog/KAT_HGS_Produnkte_DE_09-2019_web.pdf) [Stand: 07.06.2019]
- [HOH03] Schutzrecht Deutschland DE10322644A1 (23.12.2004). Hohlieder, M.; Reichbott, H.: Vorrichtung und Verfahren zum Vermessen der Geometrien einer Radachse eines Kraftfahrzeugs. Offenlegungsschrift
- [ING18] ingenieur.de/lis: Immer wieder Unfälle mit autonomen Autos. URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/unfaelle-mit-autonomen-autos/> [Stand: 26.02.2019]
- [ISE06] Isermann, R.: Fahrdynamik-Regelung. Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik. 1. Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006
- [ISO18] International Standard ISO 26262-2 (2018): Road vehicles — Functional safety — : Part 2: Management of functional safety. ISO COPYRIGHT OFFICE. ISO copyright office: Vernier, Geneva.

- [JÄG11] Jäger, C.: Entwicklung einer Radadaptionseinheit für die PKW-Inbetriebnahme. Studienarbeit. RWTH Aachen University, WZL, Aachen, 21.05.2011
- [JAN15] Janßen, C.: Effiziente Inbetriebnahmeprozesse für die Automobilendmontage. Dissertation. RWTH, WZL, Aachen, 2015
- [JAN13] Janßen, C.; Presting, H.; Jostschulte, K., et al.: Optimierung der Fahrwerkeinstellung durch Nutzung der Fahrzeugsensorik. In: ATZ. 115. Jg., 2013, Nr. 04/2013, S. 317–321
- [JON19] Jonas, M.: Neue Ansätze zur Umsetzung und Durchführung von Kalibrierumfängen bei der Pkw-Inbetriebnahme. Disseratation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2019
- [KAM09] Schutzrecht Deutschland DE102009013157B4 (12.11.2009). Kamachi, H.; Hara, K.: Fahrzeug-Radeinstellungs-Messverfahren und Vorrichtung. Patentschrift
- [KAU15] Kaufmann, J.: Fahrwerkstand X-Wheel. Püttlingen, 2015
- [KIM14] Schutzrecht Deutschland DE102014133919A1 (21.05.2015). Kim, S.: Überprüfungsvorrichtung für Fahrerassistenzsysteme. Offenlegungsschrift
- [KLU18] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2018
- [KNA20] Knauer, M.: Prüfer in der Grauzone. Überwacher drängen auf einheitliche Normen beim autonomen Fahren. In: Automobilwoche, 12.10.2020, Nr. 22, S. 15
- [KÜH09] Schutzrecht Deutschland DE102009009227A1 (01.10.2009). Kühnke, L.; Wintermantel, M.: Verfahren zur automatischen Ausrichtung eines Strahlensensors in einem Fahrzeug. Offenlegungsschrift
- [KUN06] Kunz, J.; Studer, M.: Druck-Elastizitätsmodulüber Shore-A-Härte ermitteln. In: Kunststoffe, 2006, Nr. 6, S. 92–94
- [KUN19] Kunz, M.: Konzeption und Implementierung eines intelligenten Targets für die Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme in der Fließmontage. Masterarbeit. htw saar, ZeMA gGmbH, Saarbrücken, 2019

- [LIU10] Liu, F.: Objektverfolgung durch Fusion von Radar- und Monokameradaten auf Merkmalsebene für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010
- [MAN18] Mang, H.; Hofstetter, G.: Festigkeitslehre. 5., ergänzte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018
- [MEN20] Mende, L.: Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage. Disseratation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2020
- [MEN18] Meng, F.: What Will it Take for Fully Autonomous Vehicles to Become a Reality? URL: <https://blog.viviota.com/what-will-it-take-for-fully-autonomous-vehicles-to-become-a-reality> [Stand: 31.10.2019]
- [MÜL20a] Müller, R.: Montage und Inbetriebnahme von Kraftfahrzeugen. Saarbrücken, 2020
- [MÜL13] Müller, R.: Montagegerecht. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013, S. 702–725
- [MÜL11] Schutzrecht Deutschland DE102011011407A1 (16.08.2012). Müller, R.: Verfahren und Prüfmaschine für die Inbetriebnahme eines Kraftfahrzeugs. Offenlegungsschrift
- [MÜL12] Müller, R.; Esser, M.; Janßen, C., et al.: Tolerance Management for Assembly - Not a Matter of Product Size. In: Ratchev, S. (Hrsg.): Precision assembly technologies and systems. 6th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, IPAS 2012, Chamonix, France, February 12-15, 2012 ; proceedings. (Reihe: IFIP advances in information and communication technology, 371). Heidelberg: Springer, 2012, S. 97–104
- [MÜL09] Müller, R.; Esser, M.; Janssen, C.: Umfassendes Toleranzmanagement. Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse. In: wt Werkstattstechnik online. 99. Jg., 2009, Nr. 9, S. 632–636

- [MÜL20b] Müller, R.; Mende, L.; Litzemberger, P., et al.: Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage. In: Tagungsband zur 4. Summer School Toleranzmanagement 2020. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg: Vögel Verlag, 2020,
- [MÜL18] Müller, R.; Vette, M.; Kalso, A.: Comparison of practically applicable mathematical descriptions of orientation and rotation in the three-dimensional Euclidean space. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Franke, J. (Hrsg.): Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. [1. Auflage]. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2018, S. 123–130
- [MÜL16] Schutzrecht Deutschland DE102016118593A1 (05.04.2018). Müller, S.; Weisgerber, R.; Kurt, I., et al.: Vorrichtung zur Erfassung der Lenkradstellung, des Lenkradeinschlagwinkels und/oder der Neigung des Lenkrades eines Fahrzeugs. Offenlegungsschrift
- [OSR19] OSRAM: Osrams neue LiDAR-Laser lassen autonome Fahrzeuge noch besser sehen. Regensburg, 24.09.2019. URL: <https://www.osram.com/os/press/press-releases/osrams-new-lidar-lasers-allow-autonomous-vehicles-to-see-farther-and-more-effectively.jsp> [Stand: 07.10.2019]
- [OTT14] Otto, M.: Entwicklung und Implementierung einer vollautomatisierten Radadaptationseinheit zur Ermittlung der geometrischen Fahrachse an Kraftfahrzeugen in der Fließmontage. Masterarbeit. htw saar, ZeMA gGmbH, Saarbrücken, 15.12.2014
- [OTT20] Otto, M.; Müller, R.: Challenges for safeguarding the function of autonomous vehicles in the production (Montagesysteme). Bad Nauheim, 19.02.2020. URL: <http://www.automotive-circle.com/de> [Stand: 02.04.2020]
- [OTT18] Otto, M.; Müller, R.: Intelligent commissioning strategies by using In-Line wheel adaption to secure modern vehicles in production (Montagesysteme). Bad Nauheim, 20.02.2018. URL: <http://www.automotive-circle.com/de> [Stand: 20.03.2018]
- [OTT17] Otto, M.; Müller, R.: Geometriemessung im Linientakt. Fahrerassistenzsysteme in Betrieb nehmen. In: IT & Production. 18. Jg., 2017, Nr. 3/2017, S. 34–35

- [OTT16a] Schutzrecht Deutschland DE102016110830A1 (15.12.2016). Otto, M.; Müller, R.: Vorrichtung zur Befestigung einer Adaptionplatte an einer Fahrzeugradnabe eines Fahrzeugs und Verfahren zum Betrieb einer Adaptionplatte an einer Radnabe eines Fahrzeugs. Offenlegungsschrift
- [OTT16b] Otto, M.; Müller, R.: Automatisiertes Radadaptionssystem für effiziente Inbetriebnahme-Prozesse in der Fahrzeugfließmontage : Innovative Inbetriebnahme zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. In: Tagungsband zur Automation 2016. Baden-Baden, 07. Juni 2016. VDI Verlag GmbH, 2016, S. 197–209
- [PAL16] Pallenberg, S.: Tesla verbaut Hardware fuer vollautonome Autos – \$8000 Upgrade. URL: <https://www.mobilegeeks.de/artikel/tesla-autonom-autopilot/> [Stand: 01.12.2019]
- [PAP18] Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium. 15. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- [PAU14] Paul, B.: Fahrzeugumfeldsensorik: Überblick und Vergleich zwischen Lidar, Radar, Video. URL: <https://www.cbccity.de/fahrzeugumfeldsensorik-ueberblick-und-vergleich-zwischen-lidar-radar-video> [Stand: 04.11.2019]
- [PET17] Petzinger, C.: Modulbaukasten für FAS-Prüfstände "X-DASALIGN". Püttlingen, 2017
- [PET16] Schutzrecht Deutschland DE102016117444A1 (22.03.2018). Petzinger, C.; Pfeil, H.; Tentrup, T., et al.: Fahrzeugprüfstand zum Kalibrieren und/oder Testen von Systemen eines Fahrzeugs, die wenigstens eine Kamera umfassen sowie Verfahren zur Durchführung der Kalibrierung und / oder Tests von Systemen eines Fahrzeugs, die wenigstens eine Kamera umfassen. Offenlegungsschrift
- [PFE13] Pfeffer, P.; Harrer, M.: Lenkungshandbuch. Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Krafffahrzeugen. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [PFL12] Schutzrecht EP2618305B1 (30.04.2014). Pflug, C.; Platonov, J.; Kaczmarczyk, P., et al.: Verfahren und Vorrichtung zur Online-Kalibrierung von Fahrzeug-Kameras. Europäische Patentanmeldung

- [PIS16] Pischinger, S.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [POL86] polycontrol: Fahrwerkstand bei Dodge
- [PRE17] Schutzrecht Deutschland DE102017011551A1 (19.06.2019). Presting, H.; Kircher, N.; Jostschulte, K., et al.: Verfahren zur Messung einer Lenkwinkelposition in einem Fahrzeug. Offenlegungsschrift
- [REI16] Reif, K.: Sensoren im Kraftfahrzeug. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [REI15] Reif, K.: Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure. 5., überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015
- [REI10] Reif, K.: Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- [RIE19] Riering, B.: Halbleiterbedarf wächst enorm. Infineon profitiert von E-Mobilität und autonomem Fahren - Bedeutung von Autochips steigt rasant. In: Automobilwoche, 2019, Nr. 23, S. 18
- [ROB18] Robert Bosch GmbH: Ultraschallbasierte Fahrerassistenzsysteme. Ultraschallsensoren, Generation 6. Abstatt, 2018
- [ROB17a] Robert Bosch GmbH: Radar-based driver assistance systems. Mid-range radar sensor. Abstatt, 2017
- [ROB17b] Robert Bosch GmbH: Videobasierte Fahrerassistenzsysteme. Multifunktionskamera, 2. Generation. Abstatt, 2017
- [ROB14] Robert Bosch GmbH: Chassis Systems Control. Fourth generation long-range radar sensor (LRR4). Abstatt, 2014
- [ROB13] Robert Bosch GmbH: Chassis Systems Control. Stereo-Videokamera. Abstatt, 2013
- [RUB17] Rubel, B.: Autonome Autos: Deutsche Autohersteller und Zulieferer führend. URL: <https://www.mobilegeeks.de/artikel/autonome-autos-deutsche-hersteller-zulieferer/> [Stand: 01.12.2019]

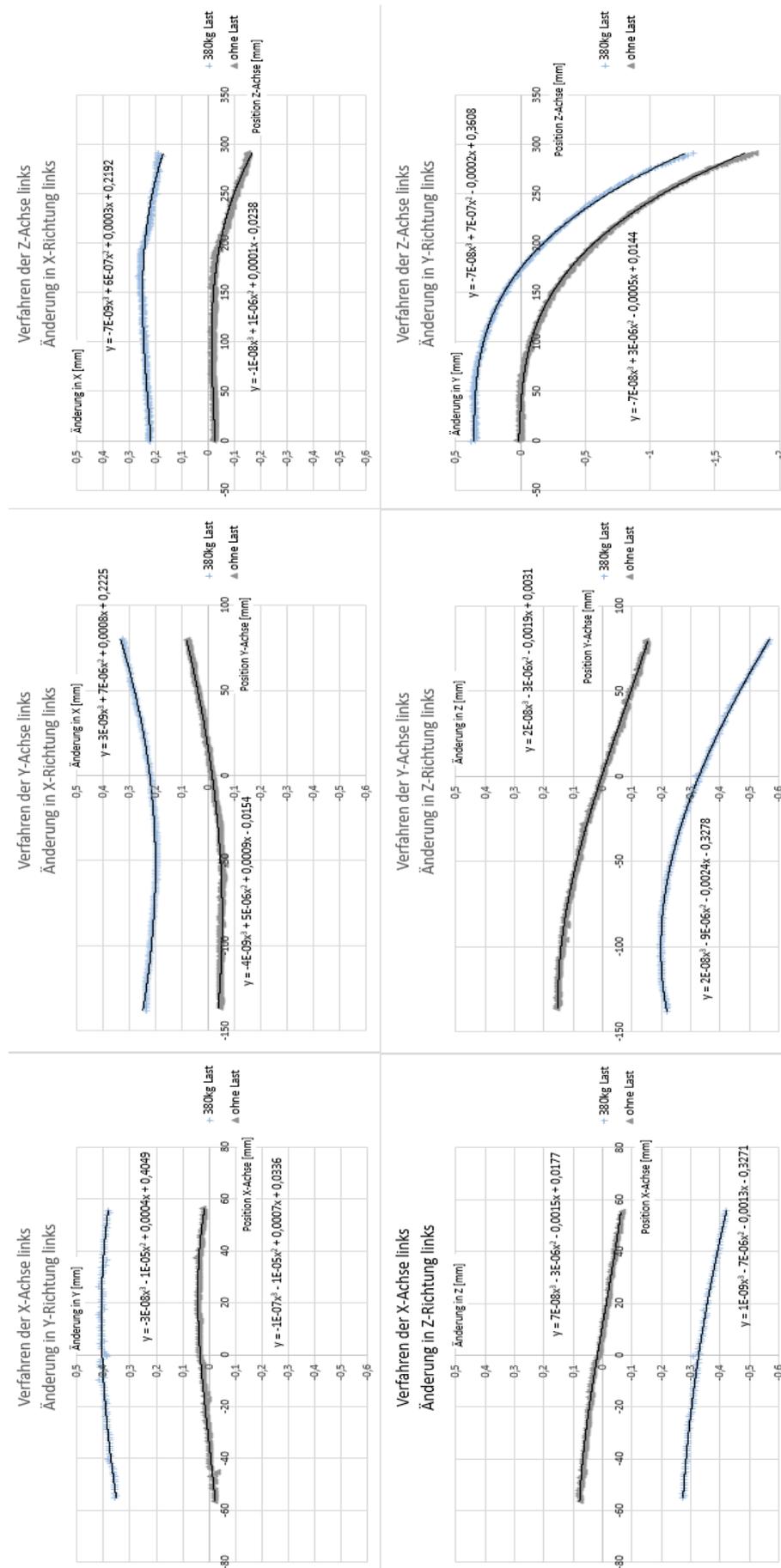
- [SCH07] Schenk, J.: Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion. Dissertation. RWTH, IGM, Aachen, 2007
- [SCH06] Schutzrecht Deutschland DE102006006023A1 (16.08.2007). Schenk, J.; Tentrup, T.: Vorrichtung für die Prüfung und Einstellung von Fahrerassistenzsystemen von Kraftfahrzeugen am Bandende. Offenlegungsschrift
- [SCH18] Schiefer, P.: Automotive Technologies Infineon. London, 12.06.2018
- [SCH19] Schirmer, L.; Otto, M.; Müller, R., et al.: Neue Ansätze für die Inbetriebnahme moderner Fahrzeuge. In: Tagungsband zur Fachtagung Mechatronik 2019. Universität Paderborn, 27.-28.03.2019, S. 109–114
- [SCH11] Schmitt, R.; Brecher, C.; Corves, B., et al.: Selbstoptimierende Produktionssysteme. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin: Springer, 2011, S. 747–1058
- [SCH15] Schmitt, R.; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. 5., überarbeitete Auflage. München, Wien: Hanser, 2015
- [SIE10] Siemens AG: SIDIS 3D-CAM. Fahrwerksstände mit innovativem Messsystem. Nürnberg, 2010 (Automotive solutions)
- [STR13] Strübing, T.; Neumann, I.: Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: zfv. 138. Jg., 3/2013, S. 210–221
- [TEC15] Technische Universität Berlin: Forschungsergebnisse visualisieren. Die Bibliothek Wirtschaft & Management | Leitfaden | Oktober 2015. Berlin, 2015
- [TEN20a] Tentrup, T.: Assembly & Testing Technologies. Advanced Driver assistance systems (ADAS) sensor setting. Luxembourg, 30.04.2020
- [TEN20b] Tentrup, T.: Inbetriebnahme und Prüfungen im Bandende-Bereich I. Saarbrücken, 2020 (Montage und Inbetriebnahme von Kraftfahrzeugen)
- [TEN95] Schutzrecht Deutschland DE19528798C2 (06.02.1997). Tentrup, T.: Vorrichtung zum berührungslosen Bestimmen des Höhenstandes an einem Kraftfahrzeug. Patentschrift

- [TEN06] Schutzrecht Deutschland DE102006036671A1 (07.02.2008). Tentrup, T.; Brunk, W.; Keller, W.: Verfahren zur Bestimmung der Achsgeometrie eines Fahrzeugs. Offenlegungsschrift
- [TEN08] Schutzrecht Deutschland DE102008045307A1 (04.03.2010). Tentrup, T.; Kolb, T.; Herbitzheim, A.: Vorrichtung und Verfahren zum Bestimmen und Einstellen der Fahrwerksgeometrie eines Fahrzeugs. Offenlegungsschrift
- [TEN04] Schutzrecht Europa EP1505363A1 (09.02.2005). Tentrup, T.; Müller, D.; Blaes, S.: Verfahren zur Messung der Radachsen einer Fahrzeugachse. Europäische Patentanmeldung
- [TEN05] Schutzrecht Deutschland DE102005042025A1 (08.03.2007). Tentrup, T.; Schenk, J.; Kurt, I., et al.: Fahrzeugsfunktionsprüfstand. Offenlegungsschrift
- [THO04] Thornton, A.: Variation risk management. Focusing quality improvements in product development and production. Hoboken, NJ: Wiley, 2004
- [TIL18] Tille, T.: Automobil-Sensorik 2. Systeme, Technologien und Applikationen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- [VAL20] Valeo: Valeo Scala. URL: <https://www.valeo.com/en/valeo-scala/> [Stand: 05.03.2020]
- [VBW18] vbw - Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V.: Zukunft automatisiertes Fahren – rechtliche Hürden beseitigen. URL: <https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Recht/2018/Downloads/vbw-Position-Automatisiertes-Fahren-M%C3%A4rz-2018.pdf> [Stand: 02.02.2020]
- [VDA15] VDA - Verband der Automobilindustrie e. V.: Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Berlin, September 2015
- [VDA10] VDA - Verband der Automobilindustrie e. V.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Band 5. Prüfprozesseignung. 2. vollständig überarbeitete Auflage 2010, aktualisiert Juli 2011. Frankfurt: Heinrich Druck + Medien GmbH, 2010
- [VDI18] VDI-Richtlinien VDI 2221 (März 2018): Entwicklung technischer Produkte und Systeme. VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Beuth Verlag GmbH: Berlin.

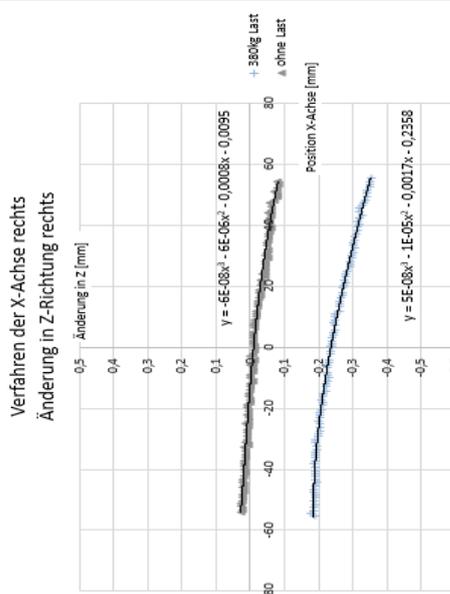
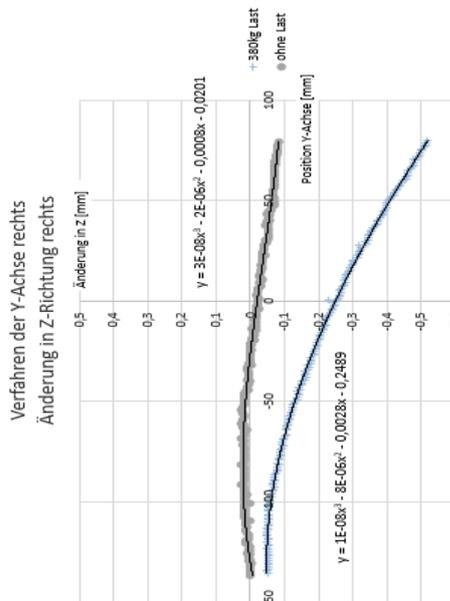
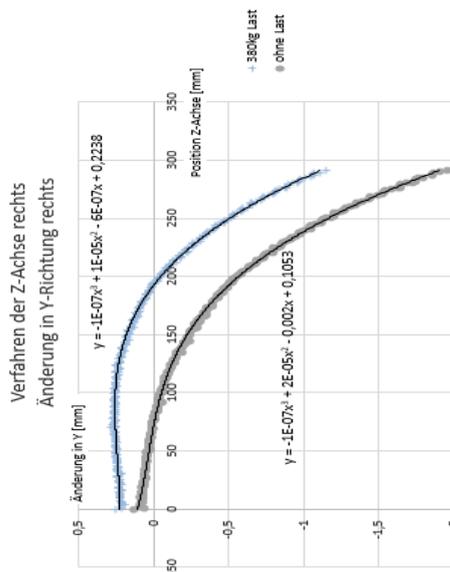
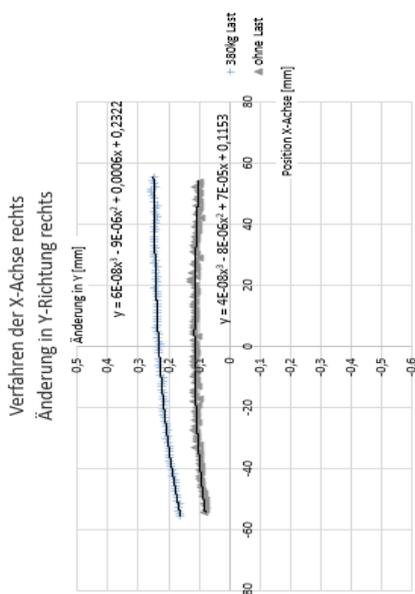
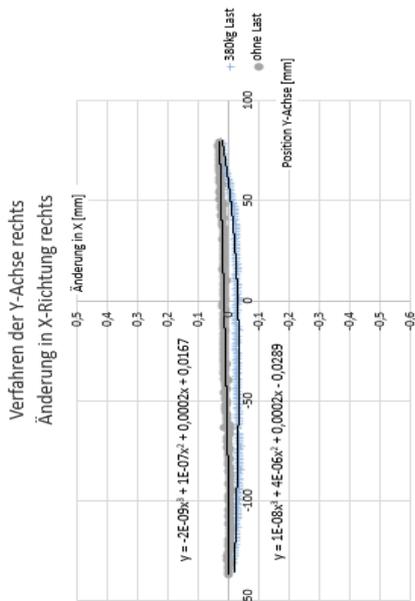
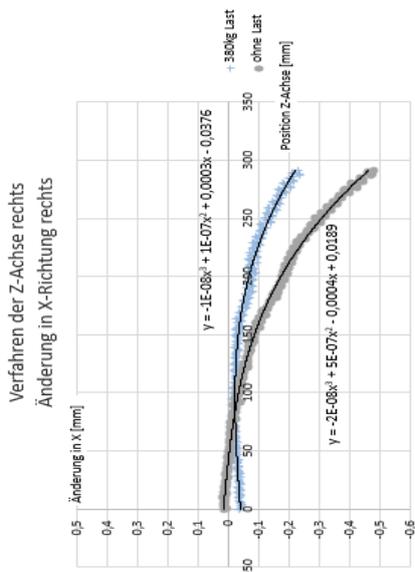
- [VDI04] VDI-Richtlinien VDI 2206 (Juni 2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [VIS20] VisiCon Automatisierungstechnik GmbH: VisiCon dPP 3D-Sonde. URL: <https://www.visicon.eu/de/produkte/lasersonden-kameras/visicon-dpp-3d-sonde/> [Stand: 17.07.2020]
- [VOG19] Vogt, A.: Autonom durch die City. In: Automobielwoche, 2019, Nr. 17/18, S. 14
- [WAL16] Waldron, K.; Schmiedeler, J.: Kinematics. In: Siciliano, B.; Khatib, O. (Hrsg.): Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 11–35
- [WEB19] Weber, K.: Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen. Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen. 5. Auflage 2019. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, 2019
- [WEN08] Wender, S.: Multisensorsystem zur erweiterten Fahrzeugumfelderfassung. Dissertation. Universität Ulm, Ulm, 24.10.2008
- [WEN11] Wenzlaff, A.: „MADE IN GERMANY“ – 125 Jahre Automobil. Eine nicht nur statistische Rückschau. In: Münchner Statistik. 2011. Jg., 2011, Nr. 4. Quartalsheft, S. 17–36
- [WES06] Westkämper, E.; Decker, M.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin: Springer, 2006
- [WIN15a] Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F., et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [WIN15b] Winterhoff, M.; Mishoulam, D.; Shirokinskiy, K., et al.: Automotive 4.0. Since Henry Ford introduced mass production, the automotive industry developed in an evolutionary way into how we know today — With new technology, new players and new consumer needs, we might be on the verge of a revolution! Michigan, 2015
- [ZEN15] Zenke, D.: Autonomes Fahren - Hype oder alltagstauglich. Funktionale Sicherheit beim autonomen Fahren. Hamburg, 10.11.2015

## VI Anhang

A 5.1 Lastdiagramme Radadaptationseinheit links

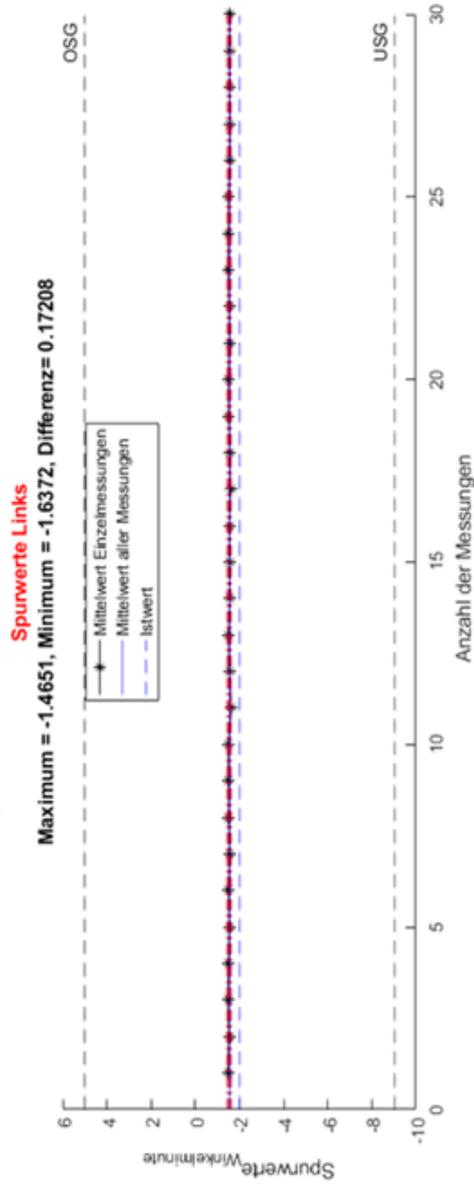


A 5.2 Lastdiagramme Radadaptationseinheit rechts



A 5.3 Prüfmittelfähigkeit links

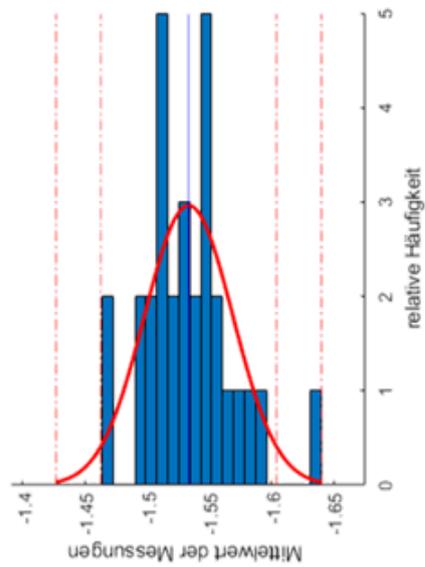
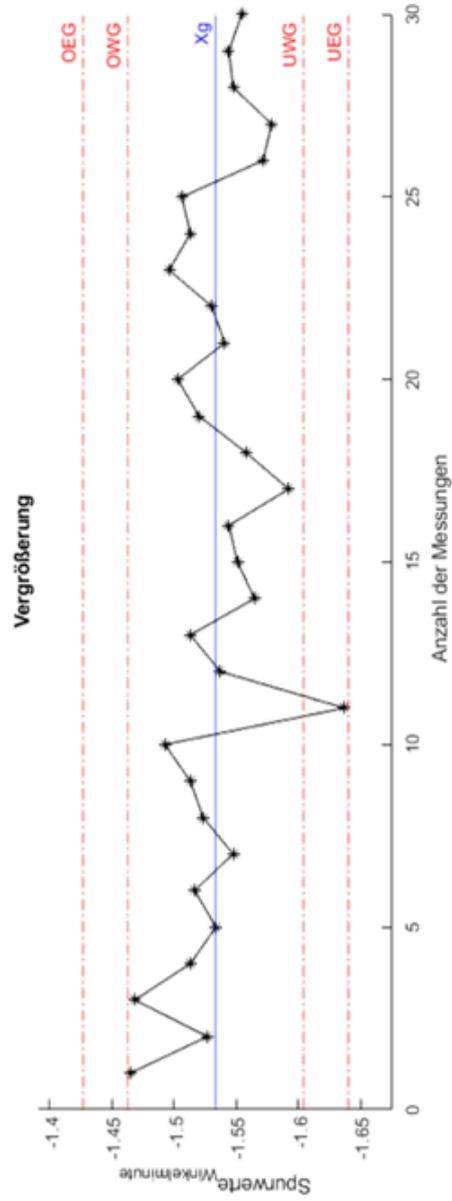
Prüfmittelfähigkeit



$USG = -7$   
 $OSG = 7$   
 $Toleranz(T) = 14$   
 $Istwert(X_m) = -2$   
 $Mittelwert(X_g) = -1.5336$   
 $Bias(B_i) = 0.46638$   
 $Standardabweichung(S_g) = 0.035541$

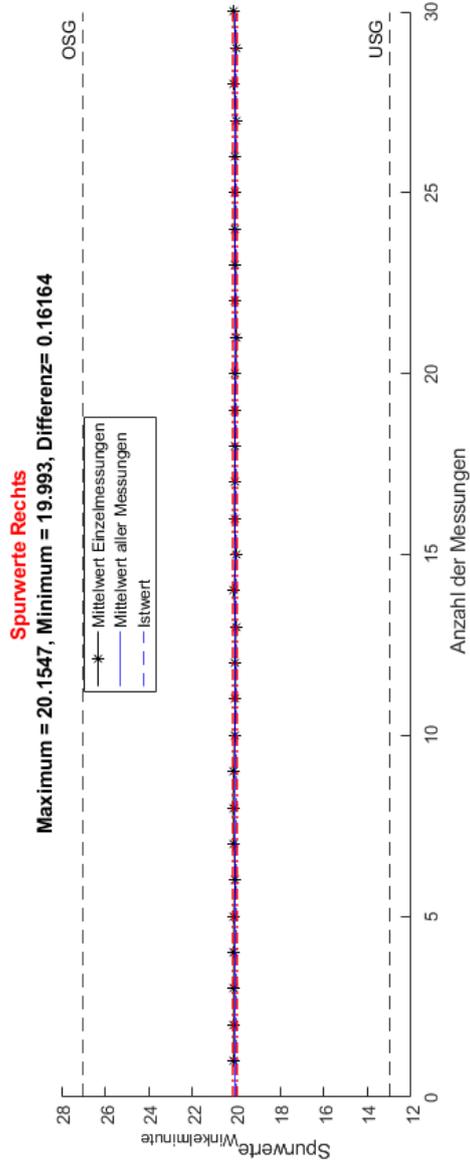
Fähigkeitsindizes :

$C_g = 19.6956$   
 $C_{gk} = 13.1344$



A 5.4 Prüfmittelfähigkeit rechts

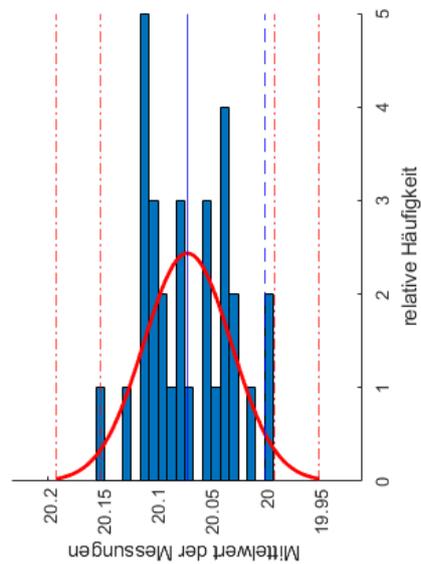
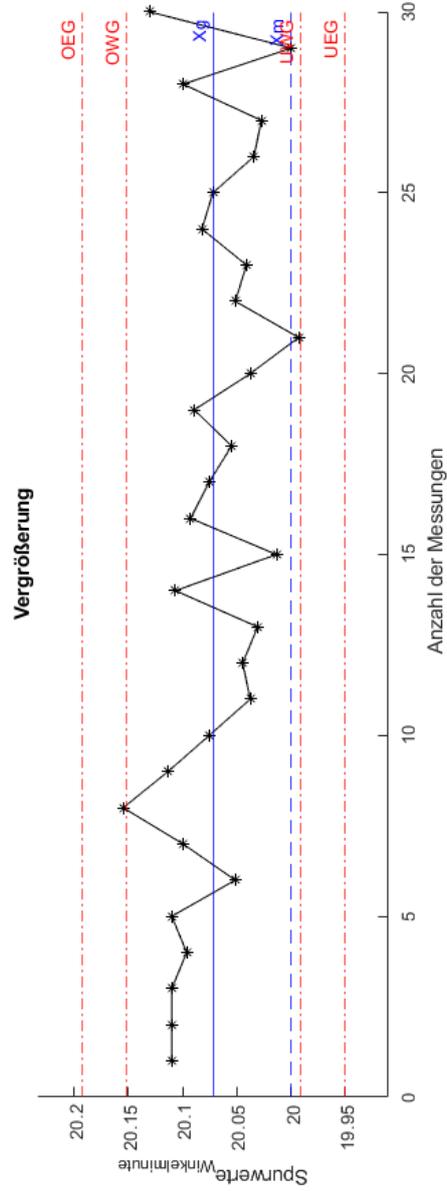
Prüfmittelfähigkeit



$USG = -7$   
 $OSG = 7$   
 $Toleranz(T) = 14$   
 $Istwert(X_m) = 20$   
 $Mittelwert(X_g) = 20.0715$   
 $Bias(B_i) = 0.071454$   
 $Standardabweichung(S_g) = 0.040285$

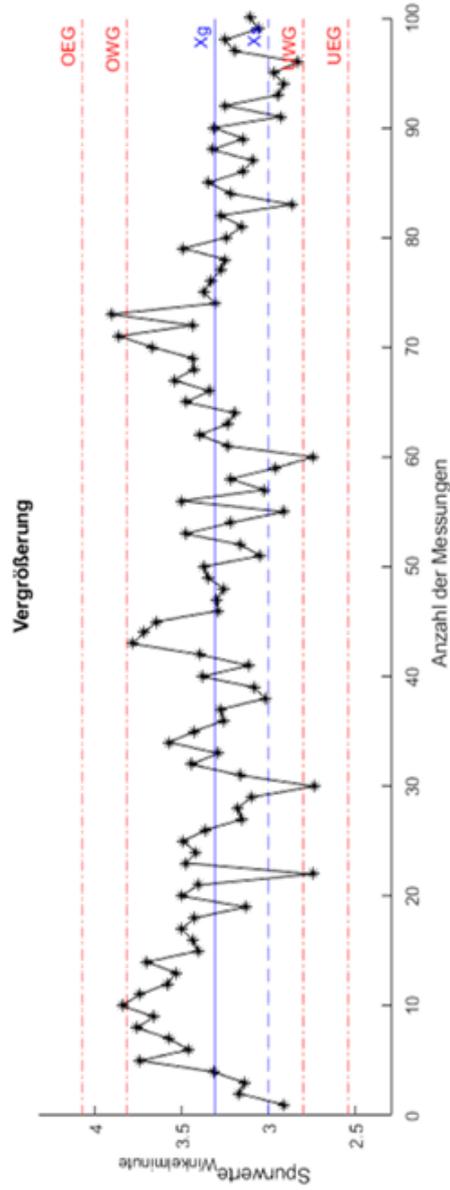
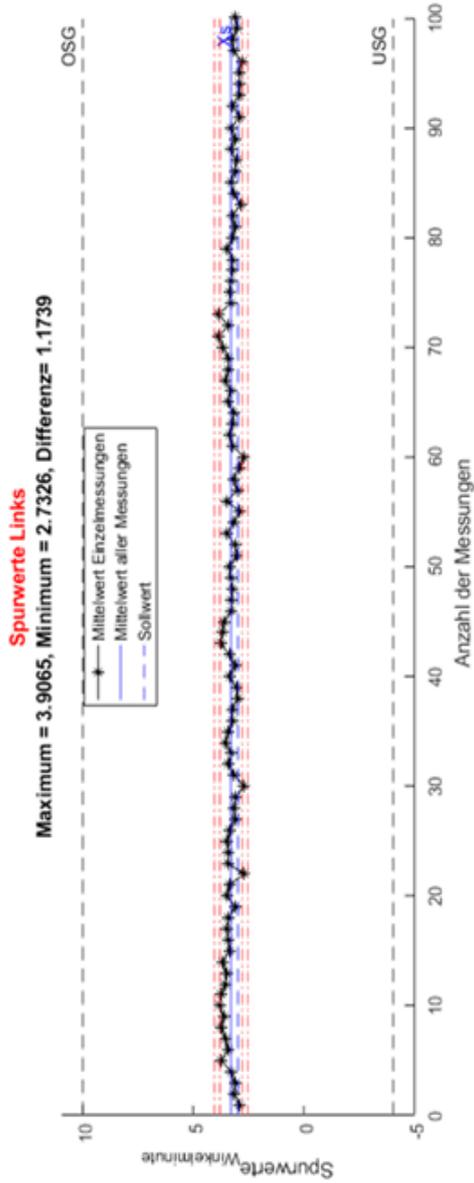
*Fähigkeitsindizes :*

$C_g = 17.3761$   
 $C_{gk} = 16.4892$

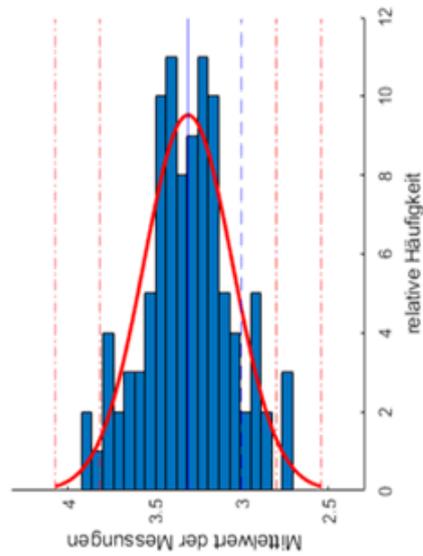


A 5.5 Maschinenfähigkeit Versuch BMW links

Maschinenfähigkeit

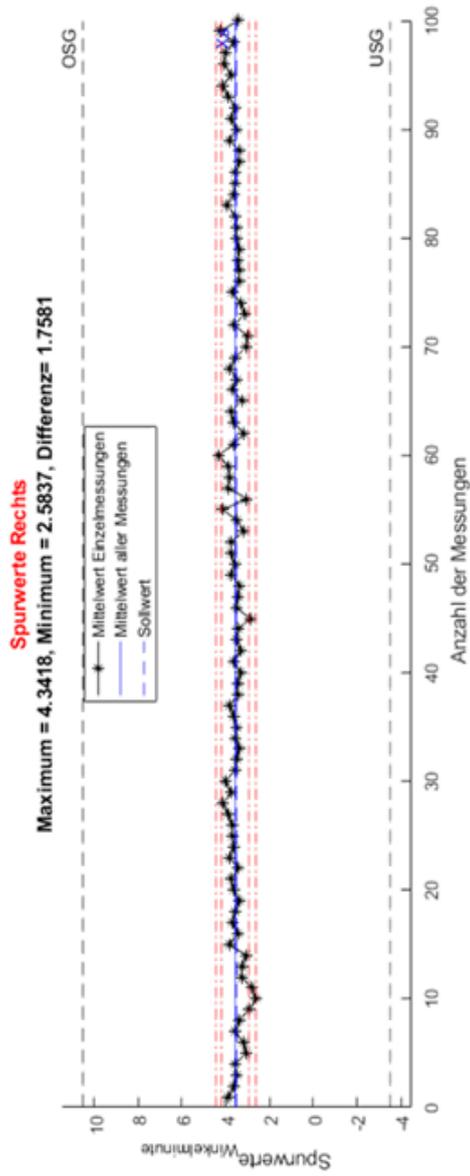


$USG = -7$   
 $OSG = 7$   
 $Toleranz(T) = 14$   
 $Sollwert(X_s) = 3$   
 $Mittelwert(X_g) = 3.3051$   
 $Standardabweichung(S_g) = 0.25545$   
**Fähigkeitsindizes :**  
 $C_m = 9.1341$   
 $C_{mo} = 8.7361$   
 $C_{mu} = 9.5322$   
 $C_{mk} = 8.7361$

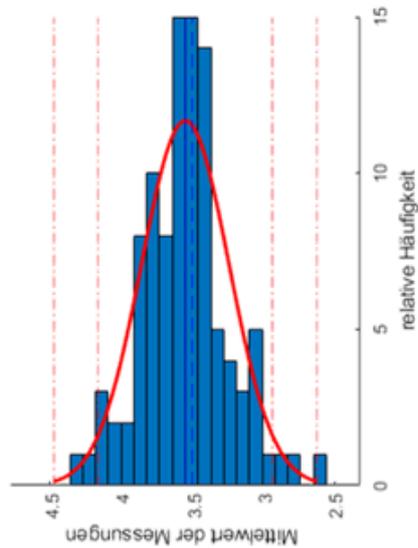
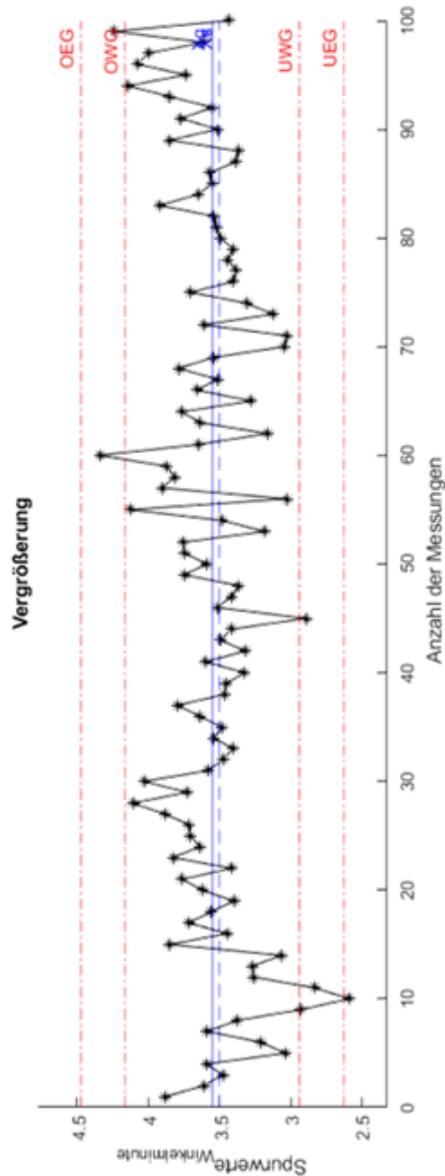


A 5.6 Maschinenfähigkeit Versuch BMW rechts

Maschinenfähigkeit

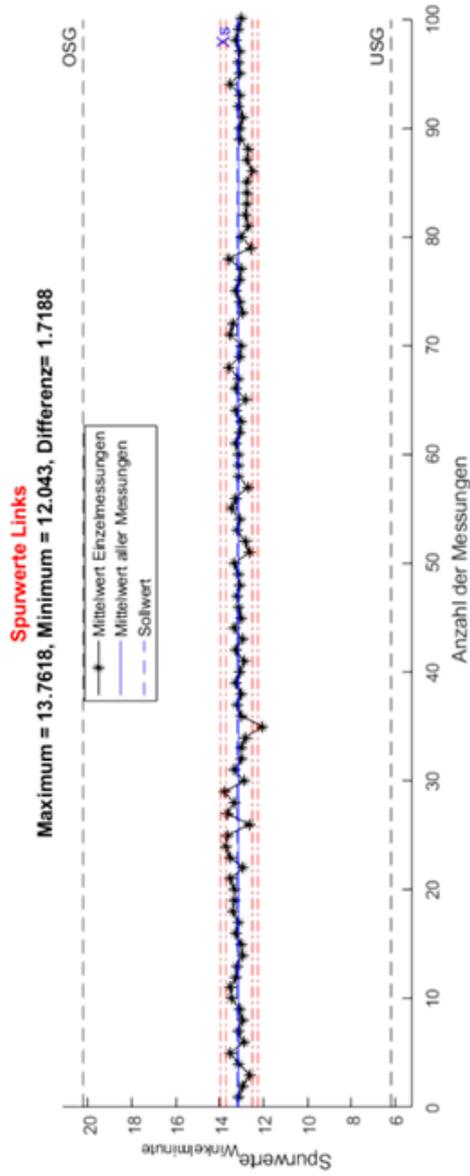


$USG = -7$   
 $OSG = 7$   
 $Toleranz(T) = 14$   
 $Sollwert(Xs) = 3.5$   
 $Mittelwert(Xg) = 3.5499$   
 $Standardabweichung(Sg) = 0.30748$   
**Fähigkeitsindizes :**  
 $C_m = 7.5885$   
 $C_{mo} = 7.5344$   
 $C_{mu} = 7.6427$   
 $C_{mk} = 7.5344$

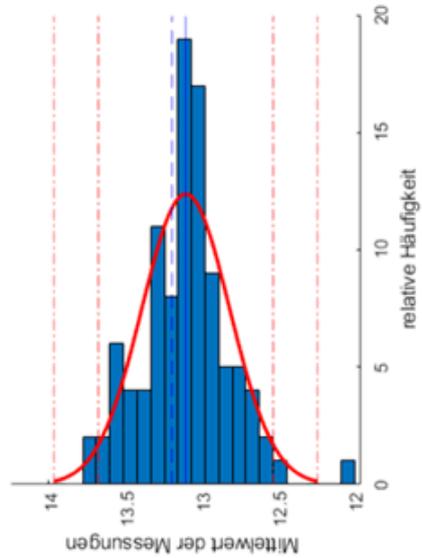
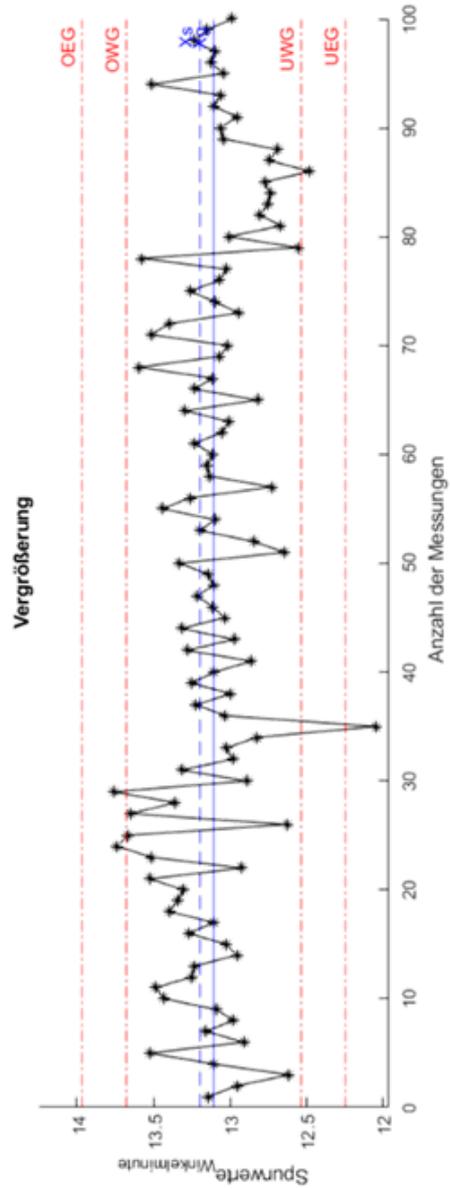


A 5.7 Maschinenfähigkeit Versuch Daimler links

Maschinenfähigkeit

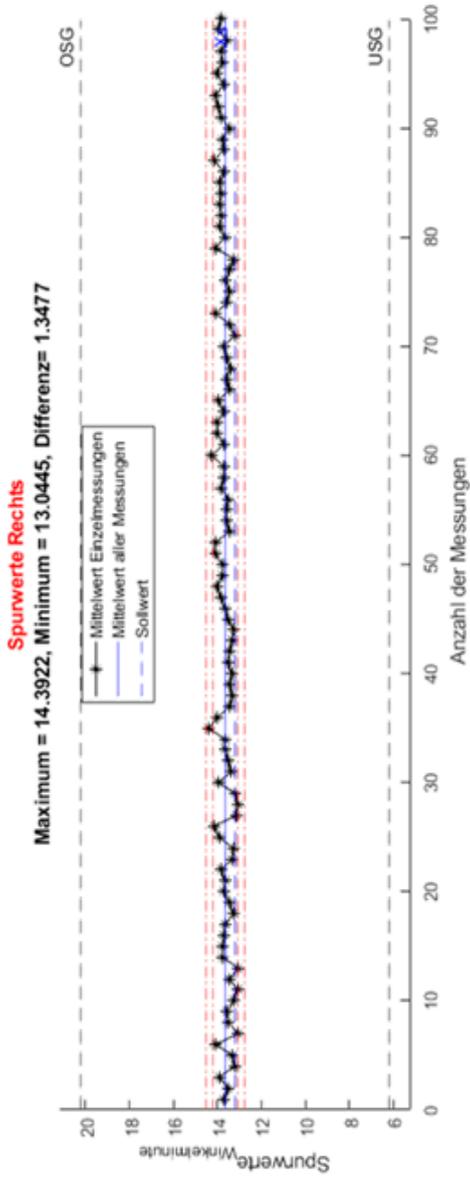


$USG = -7$   
 $OSG = 7$   
 $Toleranz(T) = 14$   
 $Sollwert(Xs) = 13.2$   
 $Mittelwert(Xg) = 13.1056$   
 $Standardabweichung(Sg) = 0.28688$   
**Fähigkeitsindizes :**  
 $Cm = 8.1334$   
 $Cmo = 8.2432$   
 $Cmu = 8.0237$   
 $Cmk = 8.0237$

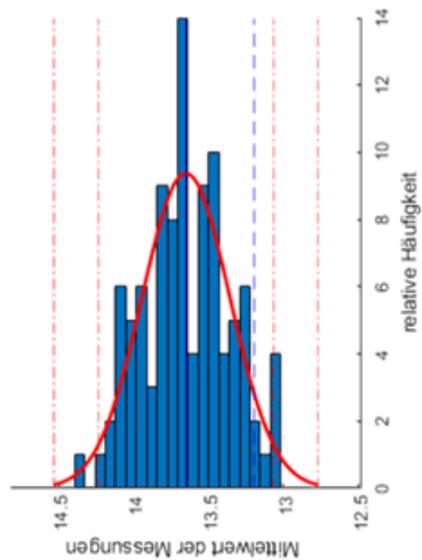
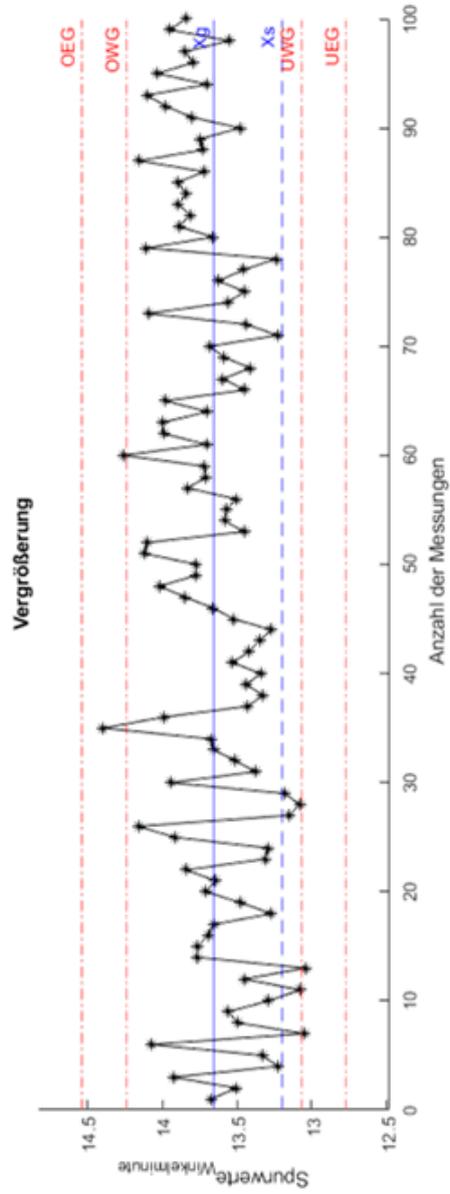


A 5.8 Maschinenfähigkeit Versuch Daimler rechts

Maschinenfaehigkeit

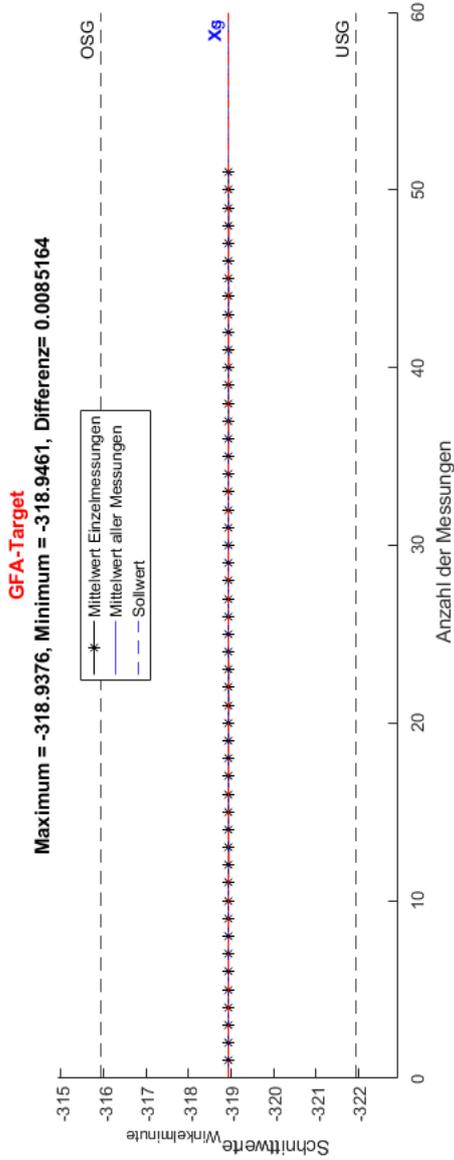


$USG = -7$   
 $OSG = 7$   
 $Toleranz(T) = 14$   
 $Sollwert(X_s) = 13.2$   
 $Mittelwert(X_g) = 13.654$   
 $Standardabweichung(S_g) = 0.29361$   
**Faehigkeitsindizes :**  
 $C_m = 7.9471$   
 $C_{mo} = 7.4317$   
 $C_{mu} = 8.4626$   
 $C_{mk} = 7.4317$

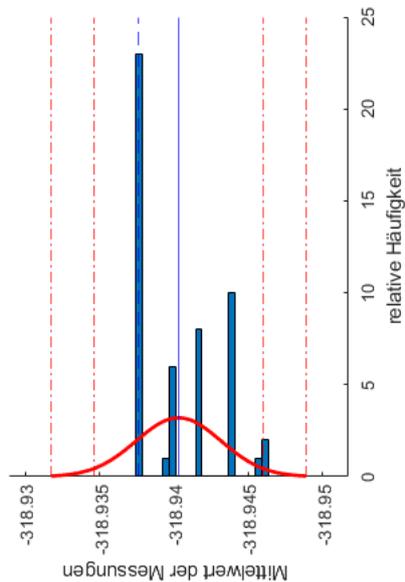
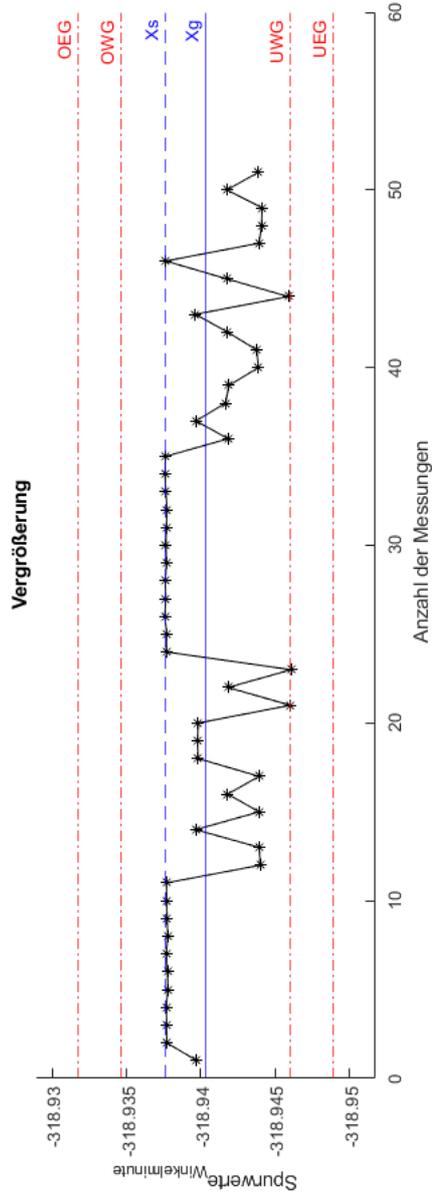


A 6.1 Maschinenfähigkeit Versuch geometrische Fahrachse zum Kalibriernormal

Maschinenfähigkeit

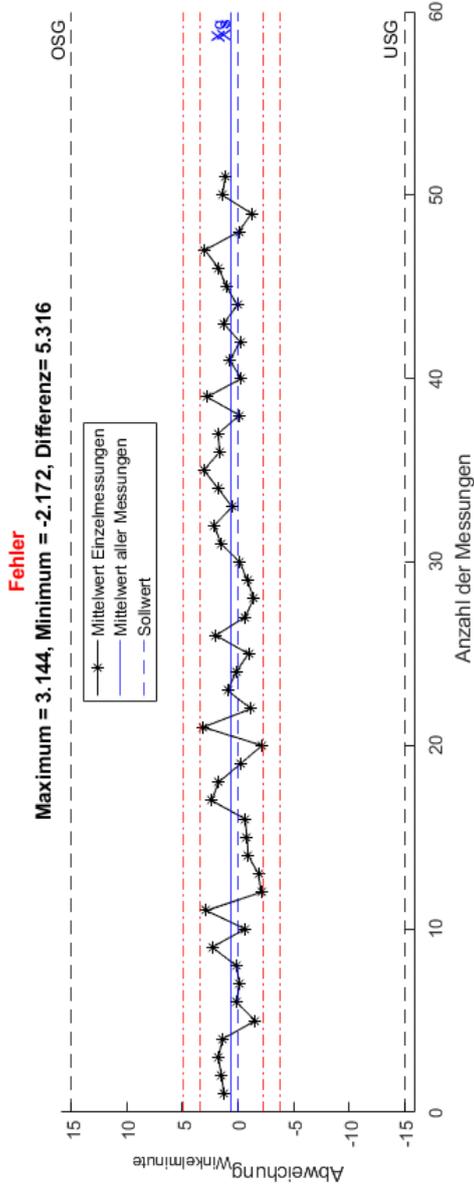


$USG = -3$   
 $OSG = 3$   
 $Toleranz(T) = 6$   
 $Sollwert(X_s) = -318.9376$   
 $Mittelwert(X_g) = -318.9403$   
 $Standardabweichung(S_g) = 0.0028613$   
**Fähigkeitsindizes:**  
 $C_m = 349.4937$   
 $C_{mo} = 349.8103$   
 $C_{mu} = 349.1772$   
 $C_{mk} = 349.1772$



A 6.2 Maschinenfähigkeit Versuch Kalibrierung Radarsensor

Maschinenfähigkeit



- $USG = -15$
- $OSG = 15$
- $Toleranz(T) = 30$
- $Sollwert(X_s) = 0$
- $Mittelwert(X_g) = 0.57118$
- $Standardabweichung(S_g) = 1.4528$
- Fähigkeitsindizes :**
- $C_m = 3.4416$
- $C_{mo} = 3.3106$
- $C_{mu} = 3.5727$
- $C_{mk} = 3.3106$

