

Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen

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

von
Patrick Scheppe

Saarbrücken
2023

Tag des Kolloquiums: 20. November 2023

Dekan: Prof. Dr. Ludger Santen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Sophie Nalbach

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Georg Frey

Vorwort

Diese Dissertation ist während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Daimler AG, jetzt Mercedes-Benz AG im Bereich der Produktionsplanung am Forschungsstandort Ulm sowie anschließend im Integrationscenter Elektrik/Elektronik am Standort Böblingen in Kooperation mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH (ZeMA) in Saarbrücken entstanden.

Mein besonderer Dank geht dabei an Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller für die hervorragende Betreuung, Unterstützung und Förderung meiner Arbeit. Von den zahlreichen regelmäßigen als auch spontanen Diskussionen und vor allem den Fragestellungen konnte ich sowohl in den Bereichen des Forschungsthemas als auch darüber hinaus stets profitieren sowie daraus neue Ideen und Ansätze für diese Arbeit generieren. Außerdem möchte ich herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber für die Übernahme des Korreferats sowie dem fachlichen Austausch danken.

Ein besonderer Dank gilt ebenfalls meinen Führungskräften, wie Frau Annica Hämmerle und Herrn Dr.-Ing. Klaus Jostschulte in Ulm sowie Herrn Gerhard Bortolus, Herrn Erich Goller, Herrn Dr. Marco Zeuner und Herrn Matthias Gauß in Böblingen, die meine Arbeit stets gefördert und sowohl durch ihre fachliche und methodische Expertise als auch durch ihr Netzwerk einen wichtigen Teil beigetragen haben. Herrn Dr.-Ing. Martin Jonas gilt an dieser Stelle ein ganz besonderer Dank. Seit dem ersten Kontakt im Sommer 2018 wurde durch ihn mein Interesse und meine Motivation an der Thematik geweckt, welche seitdem anhält. In unzähligen Diskussionen und über die gesamte Doktorandenzeit hinweg, konnte ich jederzeit auf ihn zählen, von seinem Wissen in jeglicher Hinsicht profitieren und dazu lernen.

Großer Dank gebührt ebenfalls den studentischen Kollegen, wie den Doktoranden seitens Mercedes-Benz, der Universität des Saarlandes sowie den studentischen Mitarbeitern, die einen sehr wichtigen Beitrag zum Erfolg dieser Arbeit geleistet haben und durch deren Zusammenarbeit und Austausch ich sehr profitiert habe.

Ein weiterer Dank geht an die zahlreichen Kollegen aus dem eigenen Team sowie dem eigenen Center, der Technologiefabrik, der Produktionsplanung, dem Qualitätsmanagement, den Produktionswerken und aus zahlreichen Entwicklungsteams, die mich in meiner Arbeit unterstützt haben.

Abschließend möchte ich noch meinen Freunden und besonders meinen Eltern danken, die mich im privaten Umfeld unterstützt, einen Ausgleich geboten und mir somit indirekt diese Dissertation ermöglicht haben.

Das Thema, die (Zusammen-)Arbeit und das Umfeld haben mir sehr gut gefallen, so dass die Bearbeitung meiner Dissertation rückblickend den schönsten Teil meines Studiums darstellt. Vielen Dank an alle, die mir diesen Schritt ermöglicht haben.

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	IV
II.	Abbildungsverzeichnis	VI
III.	Tabellenverzeichnis	IX
IV.	Abkürzungsverzeichnis	X
V.	Zusammenfassung	XII
VI.	Abstract	XIII
1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung und Fokus der Arbeit	8
1.3	Aufbau der Arbeit	9
2	Grundlagen	11
2.1	Begriffe und Definitionen	11
2.2	Fahrzeugtechnische Grundlagen	13
2.3	Sensortechnische Grundlagen	16
2.3.1	Kamerasysteme	16
2.3.2	Radar	19
2.3.3	Lidar	20
3	Stand der Forschung und Technik	22
3.1	Inbetriebnahme und Kalibrierung im Produktionskontext	22
3.2	Inbetriebnahme und Kalibrierung heute	26
4	Inline Referenziervorgang	39
4.1	Planung des Gesamtverfahrens	39
4.2	Planung des Inline Referenziervorgangs	51
4.3	Entwurf des Referenziervorgangs	56
5	Inline Kamerakalibriervorgang	88
5.1	Planung des Inline Kamerakalibriervorgangs	88
5.2	Entwurf des Inline Kamerakalibriervorgangs	89
6	Inline Lidarkalibriervorgang	107
6.1	Planung des Inline Lidarkalibriervorgangs	107

6.2	Entwurf des Inline Lidarkalibrierverfahrens.....	108
7	Inline Radarkalibrierverfahren	118
7.1	Planung des Inline Radarkalibrierverfahrens.....	118
7.2	Entwurf des Inline Radarkalibrierverfahrens.....	119
8	Konzept des Gesamtverfahrens	129
9	Validierung und Ergebnisse.....	131
10	Zusammenfassung und Ausblick	146
10.1	Zusammenfassung.....	146
10.2	Ausblick.....	148
VII.	Literaturverzeichnis.....	153
VIII.	Im Rahmen dieser Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten	164

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der weltweiten Automobilproduktion	2
Abbildung 2: Zentrale Faktoren automobiler Wertschöpfung	2
Abbildung 3: Die sechs Automatisierungsstufen nach SAE	4
Abbildung 4: Tendenzielle Sensorausstattung nach Automatisierungslevel	4
Abbildung 5: Die Funktionsweise eines automatisierten Fahrzeuges	6
Abbildung 6: Auswirkung von Toleranzen im Sensorverbau	7
Abbildung 7: Begriffsabgrenzungen in der Inbetriebnahme	11
Abbildung 8: Darstellung der Fahrwerksymmetrieachse eines Fahrzeugs	13
Abbildung 9: Darstellung der geometrischen Fahrachse eines Fahrzeugs	14
Abbildung 10: Toleranzkette zwischen Fahrwerkreferenz und Radarsensor	15
Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines Kameramoduls	17
Abbildung 12: Radarsensor in Explosionsdarstellung	19
Abbildung 13: Lidar-Sensor	21
Abbildung 14: Hauptbereiche der Fahrzeugproduktion	22
Abbildung 15: Übersicht der Endmontage	23
Abbildung 16: Übersicht Fahrtechnik	24
Abbildung 17: Fahrwerkstand	26
Abbildung 18: Kalibriernormal des Fahrwerkstandes	28
Abbildung 19: Scheinwerferjustage	29
Abbildung 20: Kalibriernormale für Kamera und Radar	30
Abbildung 21: Lidarkalibriernormal	31
Abbildung 22: Dichtheitsprüfstand	32
Abbildung 23: Radarkalibrierung mit dem Lichtsammelkasten	34
Abbildung 24: Fahrerassistenzsystemstand Tesla Shanghai	35
Abbildung 25: Ansatz der Inbetriebnahme von VisiCon	37
Abbildung 26: Ansatz der Inbetriebnahme von Dürr	38
Abbildung 27: Datenauswertung der Expertenbefragungen	40
Abbildung 28: Übersicht der Anforderungen und Stationen im End-of-Line Bereich	48
Abbildung 29: Automatischer Teil des statischen E/E-Tests in Halle 36	49
Abbildung 30: Optische Messverfahren der Triangulation	52
Abbildung 31: Optische Messverfahren der Intensität und der Laufzeit	53
Abbildung 32: Messprinzip der Triangulation bei einer Stereokamera	54

Abbildung 33: Messprinzip Lichtschnittverfahren.....	55
Abbildung 34: Messprinzip Streifenprojektionsverfahren.....	55
Abbildung 35: Paralleles Stereokamerasystem	57
Abbildung 36: Entwicklungsumgebung HALCON	61
Abbildung 37: Ablauf der Kalibrierung in HALCON.....	62
Abbildung 38: HALCON Kalibriertafel.....	63
Abbildung 39: Rektifizierung der Bilder.....	64
Abbildung 40: 3D-Modell von Rad und Kotflügel mit Beamer Projektion	65
Abbildung 41: Master/Slave-Hardwaretrigger	67
Abbildung 42: Verfahren zur Detektion des Rades.....	68
Abbildung 43: Verfahren zur Bestimmung der Radkante.....	70
Abbildung 44: Radmittelpunktbestimmung	71
Abbildung 45: Übersicht der Koordinatensysteme im Referenziersystem	72
Abbildung 46: Verbinden der Radmittelpunkte je Fahrzeugseite	73
Abbildung 47: Bestimmung der näherungsweise Fahrwerksymmetrieachse.....	73
Abbildung 48: Untersuchung zur Geradlinigkeit der Bandbewegung.....	74
Abbildung 49: Berechnung eines Seitenwinkels	75
Abbildung 50: Winkelbestimmung zwischen Kamera und Fahrzeugbewegung.....	76
Abbildung 51: Skizze zum Winkelhalbierendensatz	79
Abbildung 52: Zusammenfassen von Toleranzen zu Toleranzquadraten.....	80
Abbildung 53: Einfluss der Achsmittelpunktverschiebung in Y-Richtung	81
Abbildung 54: Toleranzfall mit der größten Abweichung	81
Abbildung 55: Lenkwinkelversuch auf Schwimmplatten	83
Abbildung 56: Einfluss des Lenkwinkels auf die X-Position	83
Abbildung 57: Einfluss des Lenkwinkels auf die Y-Position	84
Abbildung 58: Occupant Restraint Controller (ORC)	85
Abbildung 59: Stereo Multi Purpose Camera (SMPC).....	88
Abbildung 60: Überlagerte Bildbereiche zeitlich versetzter Aufnahmen	90
Abbildung 61: Zusammenhang von Vektorfeld und Bewegungsrichtung.....	91
Abbildung 62: Der Mercedes-Stern als Kalibrierreferenz.....	92
Abbildung 63: Kalibrierkonzept Kantenerkennung in der Produktionsumgebung	93
Abbildung 64: Klassifizierung anhand der Eigenwerte des Strukturensors.....	98
Abbildung 65: Beschreibung eines Bildteils über den Disparitätsvektor	98
Abbildung 66: Bildausschnitt mit Flussvektoren aus fünf Folgebildern	100

Abbildung 67: Flussvektoren im Produktionsumfeld ohne Maskierung.....	101
Abbildung 68: Fehlerbetrachtung bei der Berechnung des Schnittpunkts	102
Abbildung 69: Ansatz des künstlichen Horizonts	104
Abbildung 70: Siemensstern.....	105
Abbildung 71: Lidar Sensor	107
Abbildung 72: Kalibrierkonzept Ebenenschätzer	109
Abbildung 73: Kalibrierkonzept Iterative Closest Point	109
Abbildung 74: Bewegungsvektor im Montageband.....	110
Abbildung 75: Unschärfeverfahren am Beispiel des Lidarsensors.....	111
Abbildung 76: Abstandsbestimmung des klassischen ICP-Verfahrens	116
Abbildung 77: Radar Sensoren.....	118
Abbildung 78: Öffnungswinkel des Radars im Produktionsumfeld.....	119
Abbildung 79: Kalibrierkonzept Punktverfolgung	120
Abbildung 80: Versuchsaufbau Fahrzeugheck	121
Abbildung 81: Messreihe zur initialen Ausrichtung des Sensors in Azimut.....	122
Abbildung 82: Punktprojektion und Berechnung des Azimutwinkels	124
Abbildung 83: Dynamische Schwellwertanpassung	125
Abbildung 84: Punktbewegung in der Theorie und in Radarauflösung	126
Abbildung 85: Detektion eines Tripelspiegels mit variierter Rampensteigung	127
Abbildung 86: Leistungsmessung zur Detektion von Tripelspiegeln.....	128
Abbildung 87: Verfahrensvalidierung für Kamerakalibrierverfahren.....	132
Abbildung 88: Validierung Lidar- und Radarverfahren	132
Abbildung 89: Validierung im Roboterlabor	133
Abbildung 90: Validierung Inline Referenziersystem	134
Abbildung 91: Vergleich der kamerabasierten Kalibrierverfahren.....	137
Abbildung 92: Darstellung beider Öffnungswinkelszenarien.....	140
Abbildung 93: Vergleich von Messungen mit und ohne Tripelspiegel.....	144

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die 11 Kameraparameter nach Tsai	18
Tabelle 2: Festanforderungen der Inline Inbetriebnahme	41
Tabelle 3: Wunschanforderungen der Dynamik und Kalibrierumgebung.....	43
Tabelle 4: Wunschanforderungen der Ergonomie und Instandhaltung.....	44
Tabelle 5: Wunschanforderungen der Funktionssicherheit und Skalierbarkeit	45
Tabelle 6: 5 Anforderungen mit der höchsten normierten technischen Bedeutung ..	47
Tabelle 7: Gierwinkelabweichung infolge Lenkwinkeleinfluss.....	84
Tabelle 8: Übersicht von Anforderungen und Kamerakalibrierkonzepten.....	96
Tabelle 9: Grundeinstellung des Entwicklungsradar in der Produktionslinie.....	127
Tabelle 10: Wiederholgenauigkeit des Inline Referenziersystems.....	134
Tabelle 11: Relative Abstandsgenauigkeit des Inline Referenziersystems.....	135
Tabelle 12: Relative Winkelgenauigkeit des Inline Referenziersystems	135
Tabelle 13: Winkelgenauigkeit unter Einbezug der vertikalen Abweichung.....	136
Tabelle 14: Abschätzung Gesamtgenauigkeit Inline Referenziersystem	136
Tabelle 15: Ergebnisse Ebenenschätzer und Kantendetektion	138
Tabelle 16: Bestimmung des optimalen Abstandes zweier Punktwolken	139
Tabelle 17: Ergebnisse Wiederholgenauigkeit Lidarkalibrierverfahren	140
Tabelle 18: Ergebnisse der Untersuchung zur Relativgenauigkeit	141
Tabelle 19: Ergebnisse ohne Veränderung des Laboraufbaus.....	142
Tabelle 20: Ergebnisse mit translatorischer Veränderung	142
Tabelle 21: Laborergebnisse Azimutwinkel	143
Tabelle 22: Laborergebnisse Elevationswinkel.....	143
Tabelle 23: Ergebnisse der Messungen in der Produktionslinie	145

IV. Abkürzungsverzeichnis

ARC	Augmented Reality Camera
CCD	Charge Coupled Device
CKD	Completely Knocked Down (Herstellungs- und Liefermethode)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CTQ	Critical to Quality
DfSS	Design for Six Sigma
E/E	Elektrik/Elektronik
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAP	Fahrerassistenzpaket
FPFH	Fast Point Feature Histogram
FPS	Frames per Second
FSA	Fahrwerksymmetrieachse
GICP	Generalized Iterative Closest Point
HA	Hinterachse
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
HL	Hinten links (in Bezug auf die Fahrtrichtung)
HR	Hinten rechts (in Bezug auf die Fahrtrichtung)
HUD	Head-Up-Display
HOQ	House of Quality
ICP	Iterative Closest Point
ITP	Isochronous Timestamp Packet
KOS	Koordinatensystem
LED	Light Emitting Diode
Lidar	Light Detection And Ranging
MPC	Multi Purpose Camera
MSA	Messsystemanalyse
MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
NCAP	New Car Assessment Programme
OEM	Original Equipment Manufacturer
ORC	Occupant Restraint Controller
PIV	Prüf- und Inbetriebnahme-Vorschrift
PV	Prüfvorschrift

Radar	Radio Detection And Ranging
RANSAC	Random Sample Consensus
RMS	Root Mean Square
SAC-IA	Sample Consensus Initial Alignment Algorithm
SAE	Society of Automotive Engineers
SMPC	Stereo Multi Purpose Camera
USB	Universal Serial Bus
VA	Vorderachse
VL	Vorne links (in Bezug auf die Fahrtrichtung)
VR	Vorne rechts (in Bezug auf die Fahrtrichtung)
VoC	Voice of Customer
ZeMA	Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik

V. Zusammenfassung

Mit dem Trend hin zu Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen steigt der Bedarf an Sensorik im Fahrzeug und damit die Anforderungen an die Prüf- und Inbetriebnahmeumfänge in der Produktion. Diese Entwicklung wird unter anderem durch erhöhte Prozesszeit und Prozesskosten sowie durch die Zunahme der benötigten Betriebsmittel ersichtlich, wodurch heutige Verfahren schon teilweise an ihre Grenzen stoßen.

Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, ist das Ziel dieser Dissertation die Umsetzung der Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen. Damit wird es ermöglicht, die Sensorik bereits in der Montagelinie in Betrieb zu nehmen. Dies führt zu weniger Parallelitäten und kürzeren Prozesszeiten in der Produktion. Zusätzlich sollen die Verfahren ohne zusätzliche Betriebsmittel auskommen, somit einfach in bestehende Produktionssysteme integrierbar sein sowie eine präzise Kalibrierung ermöglichen.

Die Grundlage der Kalibrierung stellt die Referenzierung der Fahrzeuge in der Montagelinie dar. Dabei wird das Fahrzeug mittels zweier berührungsloser Messsysteme seitenweise sowie mit fahrzeugeigener Sensorik vermessen. Die anschließende Kalibrierung der Sensorsysteme erfolgt durch die Bewegung des Fahrzeugs auf dem Montageband und nutzt die bereits vorhandene Produktionsumgebung als Referenz. Für die abschließende Verrechnung der Ergebnisse von Referenzierung und Kalibrierung zueinander wird die Bewegung des Fahrzeugs als Übertragungsmerkmal genutzt.

VI. Abstract

With the trend towards driver assistance systems and automated driving functions, the requirements for testing and commissioning scopes in manufacturing increase in the same way as the need for sensors in the vehicle that detect the environment. This development is evident in the field of driving technology by an increase in process time and process costs as well as the increase in the required equipment.

To counteract this development, this dissertation aims at implementing inline commissioning and calibration of driver assistance systems. This makes it possible to implement the sensor system already in the assembly line. In addition, the procedures should be possible without additional equipment, so that it can easily be integrated into existing production lines as well as enable precise calibration.

The basis for calibration is the referencing of the vehicles in the assembly line. The vehicle is measured by means of two non-contact measuring systems on a side-by-side basis and sensors in the vehicle. The subsequent calibration of the sensor systems is carried out by the movement of the vehicle on the assembly line and the existing production environment as references. For the final calculation of the results of referencing and calibration to each other, the movement of the vehicle is used as a transmission characteristic.

1 Einleitung

Eine automatisierte Fahrt kann nur so gut sein, wie die Umgebungsdaten, die als Entscheidungsgrundlage vorliegen. Aufgrund dessen steigt der Bedarf an umgebungserkennenden Sensoren im Fahrzeug mit der Entwicklung hin zum automatisierten Fahren [McK19]. Gleichzeitig nimmt die Anzahl an Fahrzeugen mit Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen stetig zu. Damit steigen wiederum die Anforderungen an die benötigten Inbetriebnahmeprozesse und Betriebsmittel, um diese Fahrzeuge produzieren zu können. Denn die Montage- und Bauteiltoleranzen müssen durch die Inbetriebnahme und Kalibrierung für eine fehlerfreie Umgebungserkennung ausgeglichen werden. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, soll bei der Entwicklung zum automatisierten Fahren nicht nur die Entwicklung des Produkts, sondern auch eine produktionsseitige Weiterentwicklung erfolgen. Dazu sind auf Basis einer Analyse der Ausgangssituation sowie den Grundlagen und Anforderungen neue Konzepte für die Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen ausgearbeitet und technisch umgesetzt worden.

1.1 Ausgangssituation

Bereits 1939 wurde bei der Weltausstellung in New York die Vision eines automatischen Highways der Welt vorgestellt. Diese gilt als die erste Darstellung des autonomen Fahrens [FKr15]. Bis zum ersten Serieneinsatz von Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen dauerte es jedoch noch einige Jahrzehnte. Heute, über 80 Jahre später, sind Fahrerassistenzsysteme ähnlich wie der Airbag oder das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) bereits zu einem Standard für Neufahrzeuge geworden. Zusätzlich wird die Entwicklung zu mehr Fahrerassistenzsystemen durch die Zunahme an produzierten Fahrzeugen verstärkt.

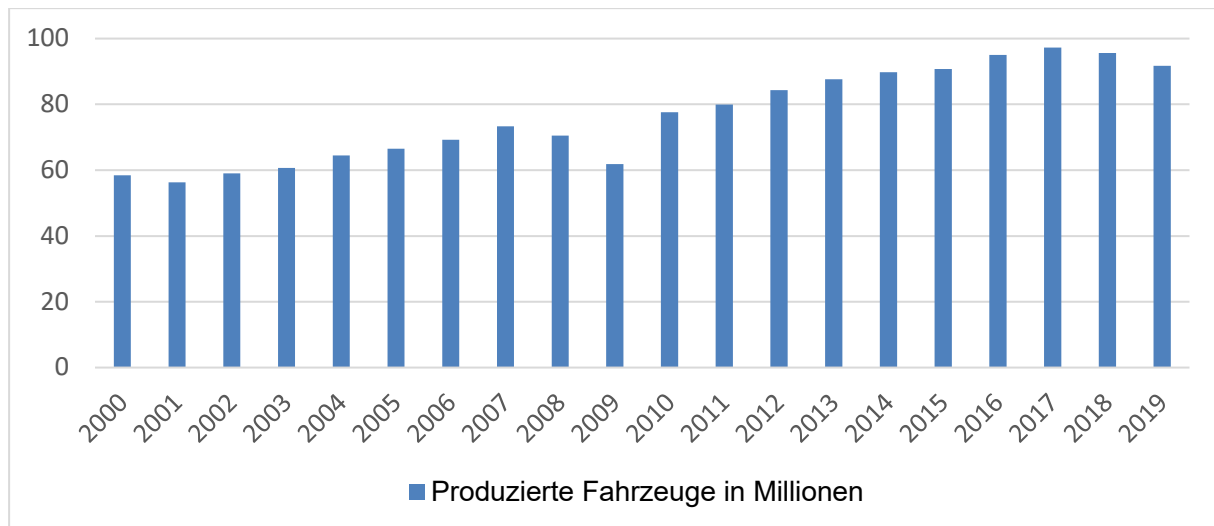


Abbildung 1: Entwicklung der weltweiten Automobilproduktion [OIC20]

Wie in Abbildung 1 gezeigt, ist eine Zunahme der weltweit produzierten Fahrzeuge innerhalb der letzten 20 Jahre erkennbar und dieser Aufwärtstrend wird auch für die Zukunft prognostiziert. Einige Gründe, die für und auch gegen diese Prognose sprechen, werden in folgender Abbildung 2 unter dem Strukturwandel durch die Technologiepfade Effizienzsteigerung und Emissionsvermeidung sowie Vernetzung und Automatisierung zusammengefasst [Bun19].

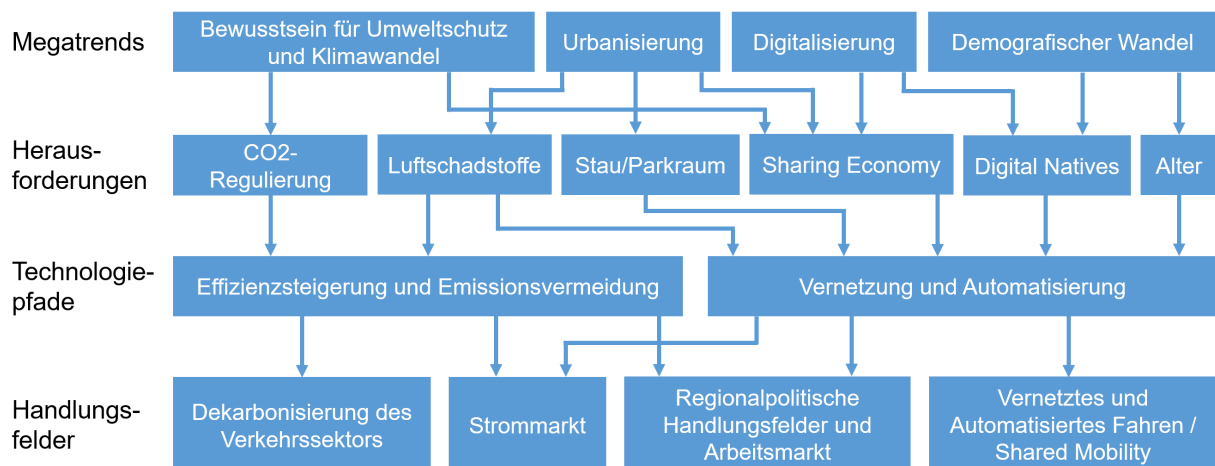


Abbildung 2: Zentrale Faktoren automobiler Wertschöpfung [vgl. Bun19]

Der Technologiepfad Vernetzung und Automatisierung, in dem Fahrerassistenzsysteme und das automatisierte Fahren einzuordnen sind, zielt neben dem direkt adressierten Fahr- und Mobilitätserlebnis zusätzlich auf die drei zukünftigen Handlungsfelder Effizienz- und Umwelteigenschaften sowie Sicherheit ab. Denn durch die Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge soll ein optimierter Verkehrsfluss

zu einer erhöhten Gesamteffizienz des Verkehrs führen sowie die Anzahl und Schwere von Unfällen reduzieren [Ver15] [TWi15]. Auch der Technologiepfad Effizienzsteigerung und Emissionsvermeidung trägt indirekt zu einer erhöhten Fahrzeugproduktion bei. Denn verkehrsbedingte Treibhausgasemissionen wie CO₂, Luftschadstoffe wie Stickoxide (NO_x) und Feinstaub führen in einigen Städten zu Fahrverboten bestimmter Fahrzeugklassen, um eine lokale Schadstoffreduktion zu erreichen. Dies führt durch das bestehende Mobilitätsbedürfnis vieler Menschen zu einem Umstieg auf effizienz- und emissionsoptimierte Fahrzeuge, die zunehmend mit Fahrerassistenzsystemen ausgerüstet sind. Aber auch Anreize, wie beispielsweise die CO₂-abhängige Besteuerung, die Freigabe von Busspuren für Elektrofahrzeuge, kostenfreies Parken sowie die Verwendung von Fahren und Mautstraßen für Elektrofahrzeuge in Norwegen sorgen indirekt für einen Antrieb der Verkaufs- und Produktionszahlen von Neufahrzeugen [ACE18] [JHe20]. Jedoch gibt es auch gegensätzliche Prognosen wie eine steigende Anzahl sogenannter Sharing Mobility Konzepte, bei denen Fahrzeuge nicht exklusiv besessen, sondern mit anderen Nutzern geteilt werden. Diese Entwicklung ist besonders bei jüngeren Fahrern sowie in Stadtgebieten zu beobachten und führt zu einer Reduktion der Fahrzeugproduktion, weil damit der Nutzungsanteil pro Fahrzeug erhöht und gleichzeitig die Anzahl an Personen, die ein Fahrzeug besitzen, reduziert wird [BNP18]. Ebenso mindert derzeit der Mangel an Halbleitern die Fahrzeugproduktion, da moderne Fahrzeuge aus einer Vielzahl elektronischer Komponenten mit Halbleitern bestehen [Süd21]. Zusätzlich erhöhen derzeit Risikofaktoren wie Inflation, Gaskrise, Zinserhöhungen, Corona-folgen, Lieferengpässe und der Krieg in der Ukraine die Gefahr einer Rezession, die ebenfalls eine Reduktion der weltweiten Automobilproduktion bedeuten würde [Tag22]. Abschließend sprechen mehr Gründe für eine Zunahme der weltweiten Fahrzeugproduktion in Zukunft als für eine Reduktion, weshalb die Prognose langfristig von einer Zunahme der Produktionszahlen ausgeht.

Neben der Zunahme an Fahrerassistenzsystemen durch die Anzahl produzierter Fahrzeuge, liegt auch eine Zunahme im steigenden Automatisierungsgrad begründet. In Bezug auf die Fahrzeugtechnik wird dies durch die sechsstufige Society of Automotive Engineers (SAE)-Skala der Automatisierungsstufen beschrieben.

Einleitung

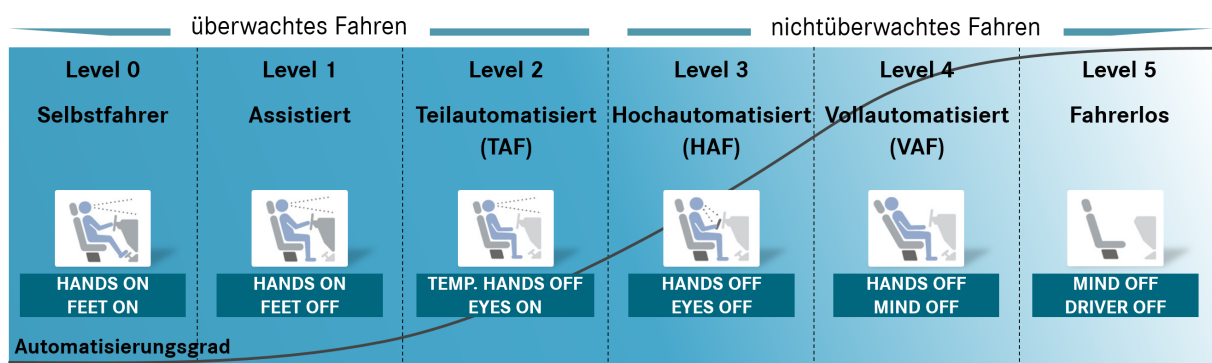


Abbildung 3: Die sechs Automatisierungsstufen nach SAE [vgl. Soc14]

Abbildung 3 zeigt die Skala der Automatisierungsstufen nach SAE und reicht von Stufe 0, welche dem Selbstfahrer entspricht, bis zu Stufe 5, welche das fahrerlose Fahren beschreibt. Aktuell sind mit dem Drive Pilot seit Dezember 2021 die rechtlichen Anforderungen für das hochautomatisierte Fahren in Deutschland erfüllt und das System nach Stufe 3 seit Mai 2022 im Verkauf erhältlich [Vog22]. Der nächste große Sprung ist mit dem vollautomatisierten Fahren, auch Stufe 4, zu erwarten. Denn ab dieser Stufe ist das Fahrzeug in der Lage, innerhalb einer definierten Umgebung jede Verkehrssituation ohne Eingriff des Fahrers zu beherrschen. Jedoch ist noch nicht bekannt, wann Stufe 4 anlaufen wird.

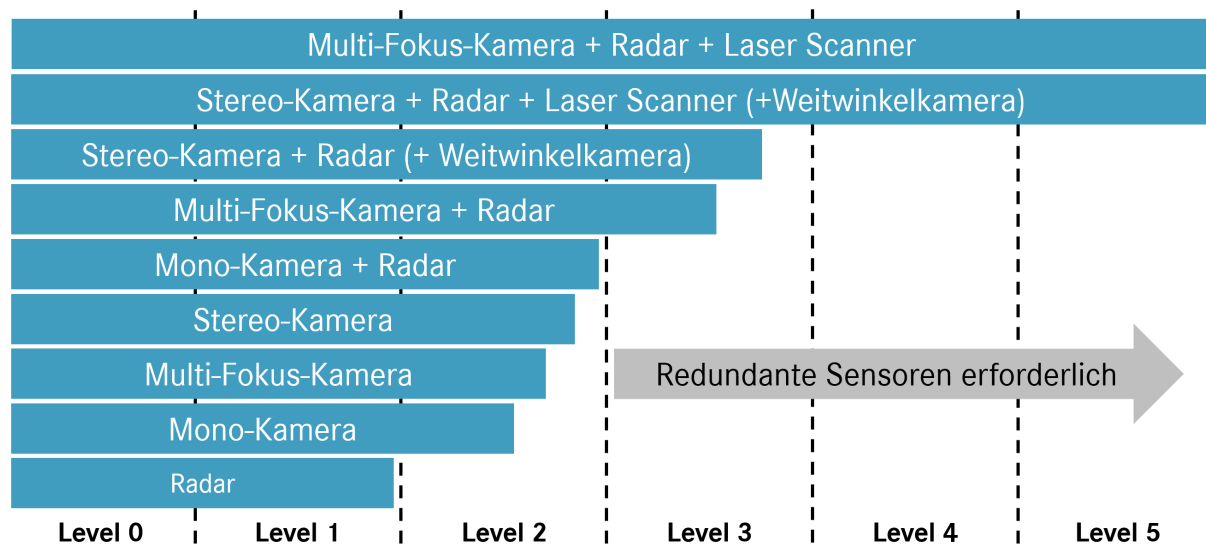


Abbildung 4: Tendenzielle Sensorausstattung nach Automatisierungslevel [vgl. fka19]

Wichtig im Zusammenhang dieser Arbeit ist, dass mit zunehmender Automatisierungsstufe auch die Funktionen des Systems und entsprechend Abbildung 4 gleichzeitig der Sensorbedarf pro Fahrzeug steigt. Besonders groß ist diese Entwicklung beim Umstieg auf Stufe 3, da ab dieser Stufe alle Tätigkeiten der Quer-

und Längsführung sowie der Umgebungsüberwachung der automatisierten Fahrt durch das System übernommen werden und wie in Abbildung 4 gezeigt, redundante Sensorik erforderlich wird [Soc14]. Diese Entwicklung stellt aus produktions-technischer Sicht aufgrund der zunehmenden Komplexität den Haupttreiber für den Bedarf an neuen Inbetriebnahme- und Kalibrierverfahren dar, welcher im folgenden Abschnitt nach einer allgemeinen Einleitung in die Problematik näher erläutert wird.

Neben den technisch bedingten Anforderungen bezüglich der Stufen des automatisierten Fahrens gibt es auch gesetzliche Anforderungen. So schreibt die Europäische Union ab Mai 2022 für neu konstruierte Fahrzeuge und ab Mai 2024 auch für bereits bestehende Modellreihen diverse Assistenzsysteme vor, um Unfälle zu vermeiden. Zu den vorgeschriebenen Assistenzsystemen gehören Fahrtrenschreiber, Spurhalte- und Notbremsassistenten sowie ein Warnsystem, das Müdigkeit oder Ablenkung des Fahrers erkennen kann. Hinzu kommt ein intelligenter Geschwindigkeitsassistent, der auf Grundlage von Karten und Verkehrszeichen auf die Überschreitung der zulässigen Geschwindigkeit aufmerksam macht, ein Rückfahrassistent, um die Sicht nach hinten zu verbessern, ein Notbremslicht für die Warnung des rückwärtigen Verkehrs bei starken Verzögerungen, eine ereignisbezogene Datenaufzeichnung zur Aufzeichnung unfallbezogener Parameter sowie eine Vorrichtung zum Einbau einer alkoholempfindlichen Wegfahrsperre [Eur19]. Doch nicht nur die Europäische Union, sondern auch andere Gesellschaften wie die Euro und Global NCAP, die Sicherheitssysteme von Fahrzeugen bewerten, fordern für eine bestmögliche Bewertung Fahrerassistenzsysteme. Diese werden in der Gesamtbewertung inzwischen mit 20% gewichtet und bewerten neben Notbremssystemen den Insassenzustand sowie intelligente Geschwindigkeits- und Spurhalteassistenzsysteme [Eur20]. Auch wenn nicht alle dieser Systeme auf umgebungserkennenden Sensoren beruhen, die in der Fahrzeugproduktion kalibriert werden müssen, so zeigt es dennoch den Trend, dass die Anzahl an verbauten Fahrerassistenzsystemen mit umgebungserkennender Sensorik in Zukunft weiter steigen wird. Weshalb die umgebungserkennende Sensorik für die korrekte Funktion eines automatisierten Fahrzeugs wichtig ist, soll folgende Abbildung näher erläutern.



Abbildung 5: Die Funktionsweise eines automatisierten Fahrzeuges [vgl. Rob21]

Abbildung 5 zeigt stark abstrahiert die Funktionsweise eines automatisierten Fahrzeuges bzw. eines Fahrerassistenzsystems, das situativ auf Basis umgebungserkennender Sensorik funktioniert. Beginnend oben rechts im Uhrzeigersinn steht „Sense“ für die Umgebungserkennung auf Basis von Sensoren, Navigationsdaten und digitalen Karten. Diese Umgebungsdaten dienen im folgenden Schritt „Think“ als Grundlage für die Interpretation und Planung der Fahrstrategie. Die im vorherigen Schritt ermittelte Fahrstrategie wird abschließend im Schritt „Act“ über die Aktorik im Fahrzeug umgesetzt [Rob211]. Folglich ist für eine fehlerfreie Gesamtfunktion eine korrekte Funktion jedes Teilschrittes unerlässlich. Abschließend stellt die sensorbasierte Umgebungserkennung die Grundlage für die automatisierte Fahrt dar. Warum eine fehlerfreie Umgebungserkennung als Grundlage so wichtig für die automatisierte Fahrt ist, wird im folgenden Abschnitt anhand unterschiedlicher Beispiele erläutert.

Bei der Produktion eines Fahrzeuges mit umgebungserkennender Sensorik unterliegen die Systeme Bauteil- und Montagetoleranzen. Obwohl so entstandene rotatorische und translatorische Abweichungen von der Sollausrichtung nur im Bereich weniger Grad und weniger Millimeter entstehen, sind besonders die rotatorischen Abweichungen kritisch für die korrekte Funktion der Systeme, wie folgende Beispiele verdeutlichen sollen. Dafür wird zunächst eine Fahrt auf der Autobahn betrachtet. Durch die hohe Geschwindigkeit ist ein erhöhter Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen gesetzlich vorgeschrieben. Die umgebungserkennende Sensorik wird in diesem Fall durch in Fahrtrichtung ausgerichtete Fernbereichssensoren wie Radar-, Lidar- und Kamerasysteme dargestellt. Die Sensoren unterliegen in diesem Beispiel

toleranzbedingt einer typischen Abweichung im Gierwinkel von mehreren Grad. Über das Umstellen der Tangens-Funktion lässt sich daraus die horizontale Abweichung des Sensors zur Sollausrichtung berechnen, die mit zunehmendem Abstand zunimmt. In folgendem Rechenbeispiel soll dies verdeutlicht werden. Ausgehend von einer Geschwindigkeit von 150 km/h auf einer Autobahn, ergibt sich ein geforderter Sicherheitsabstand von 75 m. Der Winkel zwischen den Mitten zweier Fahrspuren auf dieser Entfernung berechnet sich wie folgt.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{4 \text{ m}}{75 \text{ m}}\right) \approx 3^\circ \quad \text{Gl. 1}$$

Der Winkel von 3° entspricht circa der Verbautoleranz eines Sensors im Fahrzeug zum Fahrwerk. Dies lässt folglich einen Vergleich zwischen einem kalibrierten und einem unkalibrierten Sensor im Fahrzeug zu. In Abbildung 6 ist das Beispiel der Fahrt auf der Autobahn dargestellt.

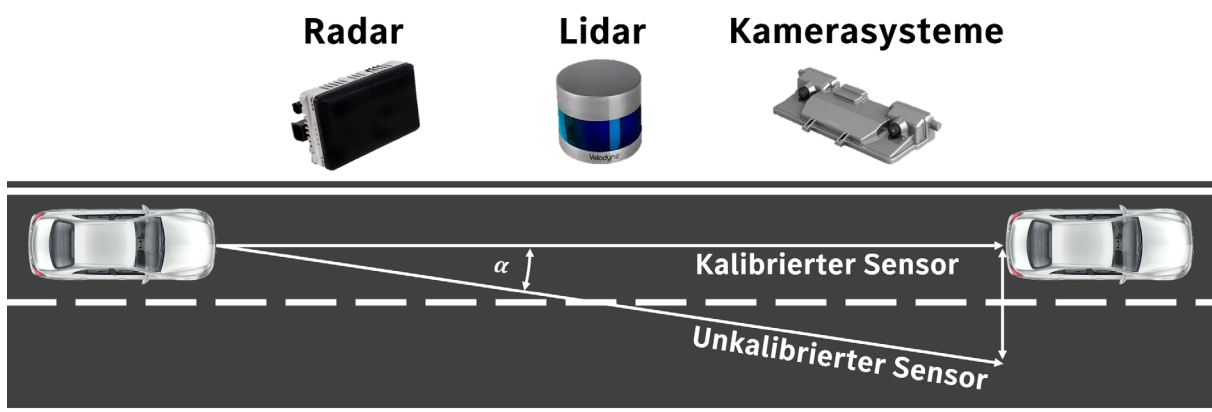


Abbildung 6: Auswirkung von Toleranzen im Sensorverbau [vgl. Dai18] [vgl. Con21] [vgl. Vel21] [vgl. Rob221]

Die Folgen dieser Abweichung können beispielsweise im Falle eines radar- oder lidar-basierten Abstandsregeltempomaten dafür sorgen, dass wie in Abbildung 6 gezeigt, nicht das vorausfahrende Fahrzeug, sondern fälschlicherweise die freie Fahrspur erkannt und somit die automatisierte Fahrt auf einer falschen Datengrundlage geplant wird. Als Folge würde nicht rechtzeitig eine Verzögerung eingeleitet werden, was im schlimmsten Fall zu einem Auffahrunfall führen kann. Jedoch auch der umgekehrte, sogenannte falsch positive Fall, bei dem fälschlicherweise eine Verzögerung

eingeleitet wird, obwohl die Fahrspur frei ist, kann zu einem Auffahrunfall des rückwärtigen Verkehrs führen und ist ebenfalls zu vermeiden. Neben den Radar- und Lidar-Systemen ist auch für Kamerasysteme die Sensorausrichtung für die korrekte Funktion wichtig, was auch am folgenden Szenario der Verkehrszeichenerkennung verbildlicht werden kann. Im Fall einer fehlerhaften Kalibrierung können die Verkehrszeichen der benachbarten Spur oder einer parallel verlaufenden Straße erkannt werden, was zu ähnlichen Folgen wie im vorigen Szenario führen kann. Jedoch sind dabei nicht nur Beispiele mit größeren Abständen und damit größeren relativen Fehlern betroffen. Auch bei langsamen Geschwindigkeiten im innerstädtischen Bereich besitzen bereits geringe rotatorische Abweichungen einen Einfluss auf die automatisierte Fahrt. So können bereits wenige Zentimeter bei der Position eines Fußgängers auf dem Gehweg oder auf der Fahrbahn zwischen einer Notbremsung und einer normalen Weiterfahrt entscheiden. Aus diesen und weiteren Gründen ist es wichtig, die Bauteil- und Montagetoleranzen durch eine fehlerfreie Inbetriebnahme und Kalibrierung der umgebungserkennenden Sensorik für die korrekte Funktion der Systeme ab dem ersten Kilometer auszugleichen.

1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Umsetzung der Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen. Verfolgt wird dieses Ziel anhand der methodischen Teilziele Planung und Konzeption sowie Entwurf jeweils für die Referenzierung des Fahrzeugs und die Kalibrierverfahren für Radar, Lidar und Kamerasysteme. Dabei gilt es zunächst die allgemeinen Anforderungen an die Inline Inbetriebnahme und die spezifischen Anforderungen für die Kalibrierung der unterschiedlichen Sensoren zu erarbeiten, bevor die Konzepte entwickelt und prototypisch umgesetzt sowie validiert werden. Die zu entwickelnden Konzepte sollen damit Lösungsansätze für die zukünftigen produktionstechnischen Herausforderungen bezüglich der Zunahme an umgebungserkennenden Sensoren des automatisierten Fahrens sowie der Zunahme an produzierten Fahrzeugen mit Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen darstellen. Außerdem sollen die Verfahren durch die Verlagerung der Inbetriebnahme und Kalibrierung in die Montagelinie einen Beitrag zur Vision der Einlinigkeit des End of Line Bereichs darstellen, was im folgenden Grundlagenkapitel näher erläutert wird.

1.3 Aufbau der Arbeit

Für den methodischen Aufbau der Entwicklung neuer Konzepte zur Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen werden unterschiedliche Verfahren verwendet. Dabei orientiert sich diese Arbeit an der branchen- und produktunabhängigen Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte nach VDI Richtlinie 2221 als grundlegender Entwicklungsmethodik. Diese wird durch die vier Hauptphasen Planen und Klären, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten ausführlicher beschrieben [VDI19] [Pah05]. Zusätzlich werden in den Hauptphasen Verfahren des Design for Six Sigma (DFSS) wie beispielsweise die Ermittlung der Kundenstimmen (VoC) zur Anforderungsdefinition, die Lösungsneutralität und Ideallösung zur Konzeptfindung sowie der paarweise Vergleich zur Konzeptauswahl angewandt [DFS17]. Die Konzeptentwicklung mit der gewählten Methodik wird sowohl für das Gesamtkonzept als auch im Einzelnen für die Teilverfahren der Inline Referenzierung sowie für die sensorindividuellen Kalibrierverfahren von Radar-, Lidar- und Kamerasystemen verwendet.

Der inhaltliche Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in zehn Kapitel unterteilt. Davon behandelt Kapitel 1 die Einleitung. Beginnend mit der Ausgangssituation werden neben der Zielsetzung und dem Fokus auch der hier beschriebene Aufbau der Arbeit sowohl methodisch als auch inhaltlich beschrieben.

Kapitel 2 behandelt die Grundlagen dieser Arbeit. Ausgehend von der Erklärung von Begriffen und Definitionen im Umfeld der Inbetriebnahme folgen sämtliche fahrzeug- und sensortechnische Grundlagen des Produkts als auch Grundlagen im Bereich der Toleranzen für die spätere Entwicklung von Kalibrier- und Inbetriebnahmeverfahren.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik thematisiert. Aufbauend auf dem Grundlagenkapitel folgt ein Überblick über die Automobilproduktion und die Einordnung der Inbetriebnahme und Kalibrierung in den Produktionskontext. Anschließend folgt der Stand der Forschung und Technik der heutigen Inbetriebnahme und Kalibrierung für die jeweiligen Sensoren, deren Prozesse und Betriebsmittel.

Mit Kapitel 4 wird der Entwicklungsprozess chronologisch am Gesamtverfahren und damit beginnend mit dem Inline Referenziersystem beschrieben. Es werden dabei zunächst allgemeine Fragestellungen und Anforderungen an das Gesamtverfahren geklärt, bevor auf die Entwicklung des Inline Referenziersystems eingegangen wird. Dies wird in die beiden methodischen Prozessschritte der Planung und Konzeption sowie des Entwurfs und der Ausarbeitung unterteilt [Pah05].

Anschließend folgen in den Kapiteln 5 bis 7 die Entwicklung der Inline Kalibrierverfahren. Begonnen wird in Kapitel 5 mit den Kamerakalibrierverfahren, gefolgt von den Lidarkalibrierverfahren in Kapitel 6 und abschließend den Radarkalibrierverfahren in Kapitel 7. Auch in diesen Kapiteln wird die Untergliederung analog durch die Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte bestimmt.

Nachdem in den vorherigen Kapiteln jeweils die Konzeptentwicklung und technische Umsetzung der Einzelverfahren vorgestellt wurde, beschreibt Kapitel 8 chronologisch das Konzept des Gesamtverfahrens.

Im Kapitel 9 werden zunächst Grundlagen der Validierung beschrieben, Versuchspläne für die Validierung erarbeitet, die entwickelten Verfahren validiert und die Ergebnisse ausgewertet.

Abschließend wird im Kapitel 10 eine Zusammenfassung der entwickelten Verfahren vorgestellt und ein Ausblick formuliert. Dabei werden sowohl Ansätze für die weitere Forschung, als auch Folgeaktivitäten zur Industrialisierung der Konzepte thematisiert.

2 Grundlagen

Bevor mit dem Stand der Forschung und Technik in den Kern dieser Arbeit eingeführt wird, werden in diesem Kapitel die Grundlagen für das Verständnis der folgenden Fachthemen geschaffen. So wird zunächst ein Überblick der Fachterminologie mit Hilfe von Begriffsdefinitionen gegeben und anschließend die fahrzeugtechnischen sowie sensortechnischen Grundlagen beschrieben.

2.1 Begriffe und Definitionen

Grundlegend für das Verständnis dieser Arbeit sind die Teilschritte, die unter dem Begriff der Inbetriebnahme zusammengefasst werden. Folgende Abbildung 7 zeigt eine Übersicht der Begriffsabgrenzungen in der Inbetriebnahme.

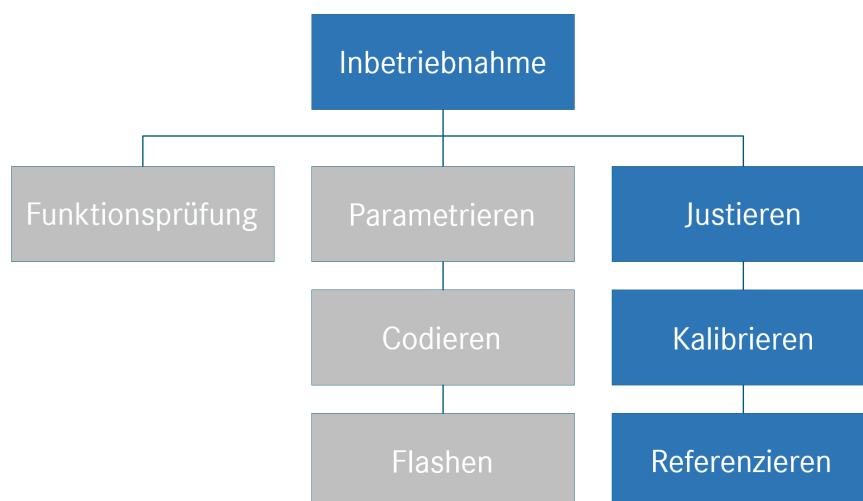


Abbildung 7: Begriffsabgrenzungen in der Inbetriebnahme

Der Begriff „Inbetriebnahme“ fasst viele Teilschritte in der Fahrzeugproduktion zusammen. Um die wichtigsten Begriffe und Definitionen im Zusammenhang dieser Arbeit zu kennen, werden im Rahmen dieses Unterkapitels die wichtigsten Begriffe erklärt bzw. definiert. Beginnend mit dem Überbegriff der Inbetriebnahme werden darunter alle Tätigkeiten verstanden, die nötig sind, um ein Teilsystem oder Produkt entsprechend der Vorgaben in einen betriebsfähigen Zustand zu versetzen [Mül18]. Wie in Abbildung 7 gezeigt, sind die darunter verstandenen Tätigkeiten der Inbetriebnahme wiederum in die drei Gruppen Funktionsprüfung, Parametrieren und Justieren unterteilt [Mül18]. Im Rahmen dieser Arbeit wird entsprechend des Titels der

Arbeit nahezu ausschließlich die Gruppe der Justierung betrachtet, weshalb diese Begriffe in Abbildung 7 hervorgehoben wurden.

Der Begriff „Referenzieren“ beschreibt das Definieren eines Bezugssystems, auf das sich Folgefunktionen beziehen [Mül18].

Im Zusammenhang mit umgebungserkennender Sensorik sind das in der Regel Bezugssysteme aus der Fahrwerktechnik wie die geometrische Fahrachse oder die Fahrwerksymmetrieachse. Diese Referenzen werden im nächsten Unterkapitel erklärt und stehen stark vereinfacht beschrieben für die Richtung, in die sich die Fahrzeuge im Fahrbetrieb bewegen.

Unter dem Begriff „Kalibrieren“ werden Tätigkeiten zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen einem Messwert und einem wahren Wert beschrieben [Mül18]. Die Differenz zwischen Messwert und wahren Wert oder auch Soll-Messwert entsteht dabei hauptsächlich durch Produktions- und Montagetoleranzen, welche ebenfalls in einem folgenden Unterkapitel näher beschrieben werden. Die Tätigkeit der Kalibrierung ist notwendig, denn bei der Inbetriebnahme eines Sensors entspricht der Messwert in der Regel nicht dem wahren Wert. Der Begriff „Justieren“ beschreibt dabei den Ausgleich von Abweichungen mit dem Ziel, geforderte Funktionsgenauigkeiten innerhalb vorgegebener Grenzen einzuhalten [Mül18]. In Bezug auf Fahrerassistenzsysteme werden folglich produktions- und montagebedingte Toleranzen ausgeglichen, indem durch die Referenzierung ein Bezugssystem ermittelt, durch die Kalibrierung die Abweichung zwischen Messwert und wahren Wert zum ermittelten Bezugssystem bestimmt und schließlich durch die Justierung die ermittelten Abweichungen ausgeglichen werden. Das Justieren kann mechanisch durchgeführt werden, indem die Pose eines Sensors durch Schrauben justiert wird. Der Teilschritt der Justierung wird jedoch meist elektronisch durchgeführt, indem die Abweichung im Sensorsteuergerät gespeichert und damit justiert wird. Durch diesen Gesamtprozess wird die Sensorik eines Fahrzeugs justiert und dadurch die Grundlage für eine korrekte Funktion eines Fahrerassistenzsystems oder einer automatisierten Fahrfunktion geschaffen.

2.2 Fahrzeugtechnische Grundlagen

Durch die Kalibrierung wird die geometrische Ausrichtung der Sensoren zur jeweiligen Fahrwerkreferenz und damit der Zusammenhang zwischen Sensorik und Aktorik im Fahrzeug bestimmt. Als Referenz beziehen sich die meisten Fahrerassistenzsysteme und automatisierten Fahrfunktionen auf die Fahrwerksymmetrieachse oder die geometrische Fahrachse [Mül18].

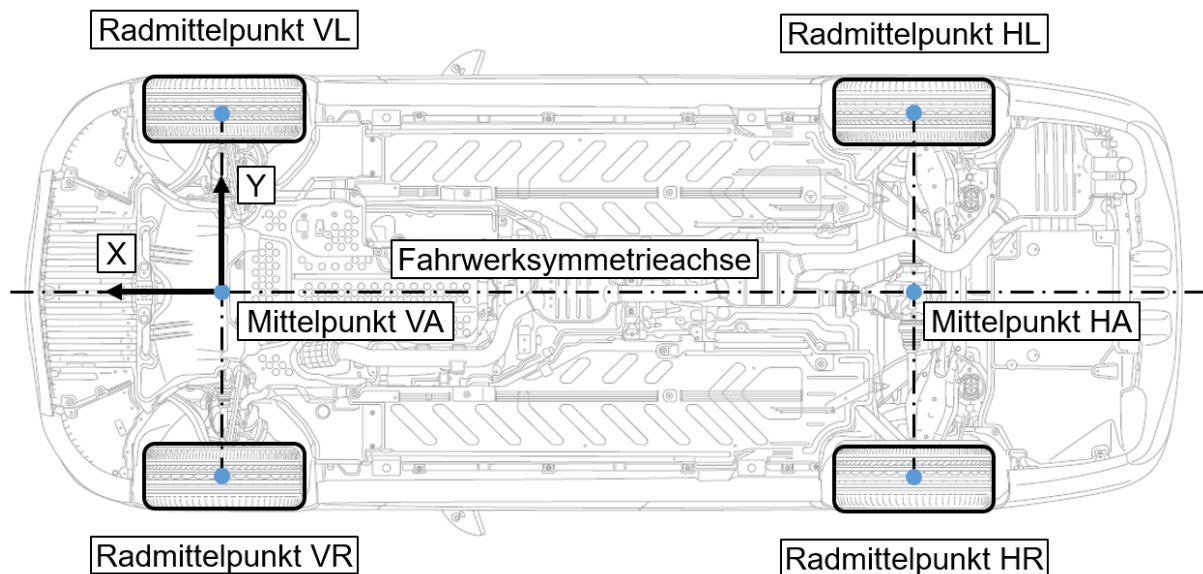


Abbildung 8: Darstellung der Fahrwerksymmetrieachse eines Fahrzeugs [vgl. Dai18]

Die Fahrwerksymmetrieachse ist wie in Abbildung 8 abgebildet definiert. Für die Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse wird zunächst der Radmittelpunkt jedes Rades bestimmt und daraus achsweise der Achsmittelpunkt aus dem Mittelpunkt beider Radmittelpunkte bestimmt. Anschließend werden die beiden Achsmittelpunkte verbunden und daraus die Fahrwerksymmetrieachse gebildet [Deu13].

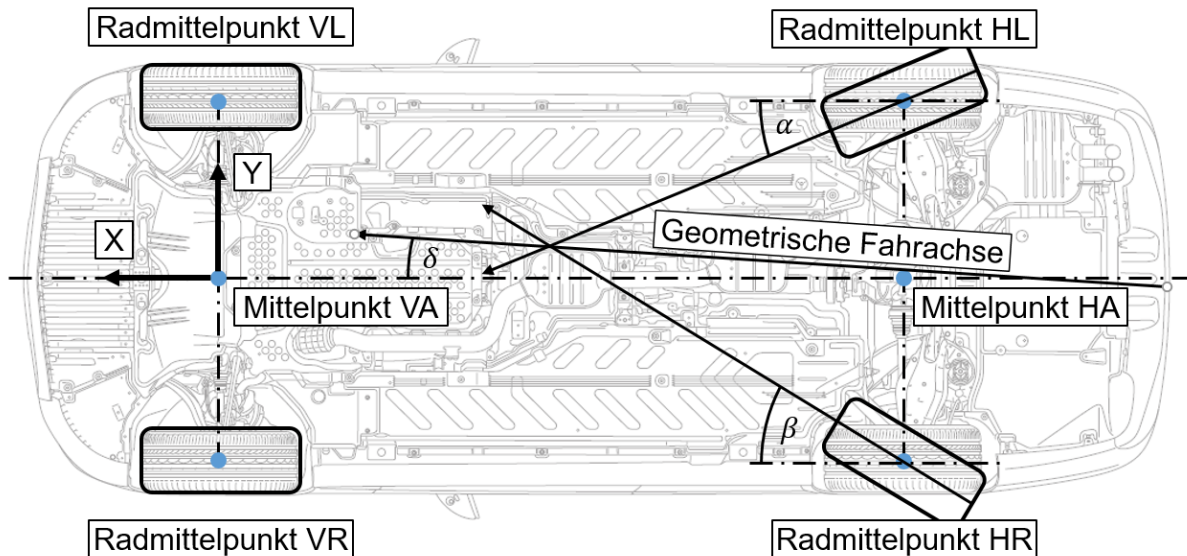


Abbildung 9: Darstellung der geometrischen Fahrachse eines Fahrzeugs [vgl. Dai18]

Als zweite Referenz entspricht die geometrische Fahrachse der Fahrtrichtung des Fahrzeugs bei Lenkradstellung geradeaus und berechnet sich aus den Einzelspuren der Hinterachse. Die Spur ist als Drehwinkel des Rades um die Z-Achse bezogen auf das Fahrzeugkoordinatensystem definiert. Dabei bezieht sich die Hinterachse auf die Fahrwerksymmetrieebene und die Vorderachse auf die Bezugsebene der geometrischen Fahrachse [Deu92]. Die geometrische Fahrachse ist wie in Abbildung 9 dargestellt als Winkelhalbierende der Einzelspuren der Hinterachse definiert [Mül18]. Der sogenannte Fahrachswinkel bzw. Dackellauf beschreibt den Winkel δ zwischen der geometrischen Fahrachse und der Fahrwerksymmetrieachse und berechnet sich entsprechend Abbildung 9 wie folgt.

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

Dieser Zusammenhang ist wichtig, weil die verschiedenen Fahrerassistenzsysteme unterschiedliche Fahrwerkreferenzen besitzen und sich auf die geometrische Fahrachse oder auf die Fahrwerksymmetrieachse beziehen können [Mer18] [Mer181]. Mit Hilfe des Fahrachswinkels ist es möglich, die beiden Referenzen in einander umzurechnen. Somit ist es für die Inline Referenzierung ausreichend, eine der beiden Referenzen zu bestimmen und die andere Referenz mit Hilfe des Fahrachswinkels umzurechnen, sofern dieser im Produktionsprozess bestimmt wird.

Um die Einflüsse auf die Ausrichtung zwischen der Fahrwerkreferenz und der Sensorik zu verstehen, wird im Folgenden die Toleranzkette im Fahrzeug betrachtet. Sie berücksichtigt sämtliche Bauteile, die einen Einfluss auf die Ausrichtung haben.

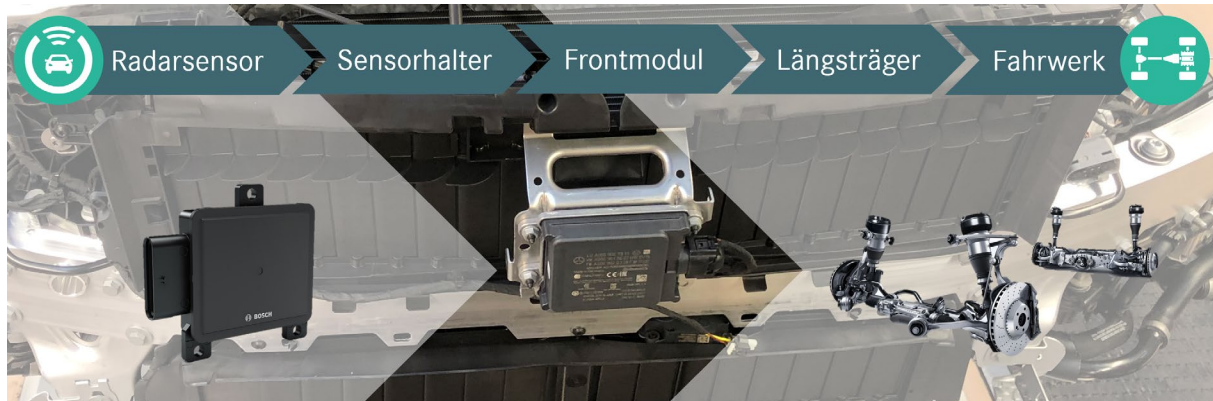


Abbildung 10: Toleranzkette zwischen Fahrwerkreferenz und Radarsensor
[vgl. Bos21] [vgl. Mar16]

Wie in Abbildung 10 am Beispiel eines Radarsensors dargestellt, zieht sich die Toleranzkette zwischen Fahrwerkreferenz und Sensor über mehrere Bauteile durch das Fahrzeug. Neben der Toleranz des Fahrwerks selbst zählen am Beispiel eines Frontradarsensors dazu auch die Toleranz des Fahrwerks zum Längsträger, die Toleranz des Längsträgers zum Frontmodul, die Toleranz des Frontmoduls zum Sensorhalter, die Toleranz vom Sensorhalter zum Sensor und schließlich auch die sensorinternen Toleranzen zur gesamten Toleranzkette. Die Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme oder automatisierten Fahrfunktionen liegen dagegen für den Frontradar im Bereich weniger Zehntel Grad [Egg19]. Unabhängig davon zeigt dies auch die Notwendigkeit einer Kalibrierung auf. Folgende Berechnungen zeigen die durchschnittlich maximal akzeptable Einzeltoleranz auf, um die Gesamtanforderung von beispielsweise $0,4^\circ$ zu erreichen. Dabei wird mit sechs Einzeltoleranzen, also obigem Szenario mit der Umrechnung des Fahrachswinkels gerechnet.

$$\text{Worst - Case: } \frac{0,4^\circ}{6} = 0,066^\circ \quad \text{Gl. 3}$$

$$\text{Root - Sum - Square: } \sqrt{\left[\frac{0,4}{6}\right]^2} = 0,163^\circ \quad \text{Gl. 4}$$

Somit dürfte auf jeden genannten Toleranzeinfluss im Schnitt nur eine Toleranz im Bereich zwischen $0,066^\circ$ und $0,163^\circ$ aufkommen [Mül12]. Dem steht jedoch eine Gesamtverbautoleranz von $\pm 3^\circ$ entgegen, die durch unterschiedliche Produktionsprozesse beeinflusst wird und damit die Justierung notwendig macht [Egg19].

2.3 Sensortechnische Grundlagen

Das Ziel der Sensorik von Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen ist es, eine vollständige Erkennung der Umgebung zu ermöglichen. Dies wird durch unterschiedliche Sensortypen und Verbaupositionen erreicht. In diesem Unterkapitel soll auf die sensorindividuellen technischen Grundlagen in Bezug auf deren Funktion, Eigenschaften und Verwendungszwecke eingegangen werden, die für den Themenbereich dieser Arbeit relevant sind.

2.3.1 Kamerasysteme

In Fahrzeugen mit Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen werden Kamerasysteme für viele unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Dies ist insofern sinnvoll, weil die Verkehrsumgebung beispielsweise in Form von Fahrbahnmarkierungen oder Verkehrsschildern bislang auf das menschliche Auge ausgelegt wurde und Kamerasysteme als eine Art maschinelle Wahrnehmung ähnlich dem menschlichen Auge verstanden werden können [Mar15]. Kamerasysteme wie die Rückfahrkamera für Parkfunktionen oder die Augmented Reality Camera (ARC) werden einerseits verwendet, um eine Orientierungshilfe oder die Überwachung automatisierter Parkfunktionen zu ermöglichen, indem das Kamerabild dem Fahrer angezeigt wird. Andererseits werden Kamerasysteme auch für Assistenzsysteme und automatisierte Fahrfunktionen herangezogen, bei denen der Fahrer das Kamerabild nicht direkt sieht, sondern eine Funktion erfährt. Bei einer dieser Anwendungen werden beispielsweise Fahrbahnmarkierungen automatisiert durch maschinelle Bildverarbeitung erkannt und der Fahrer vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrspur gewarnt. Andere Anwendungen, bei denen der Fahrer eine Funktion erfährt, können beispielsweise die Erkennung von Schildern und anderen Verkehrsteilnehmer sein, auf die das System anschließend situationsbedingt reagieren kann.

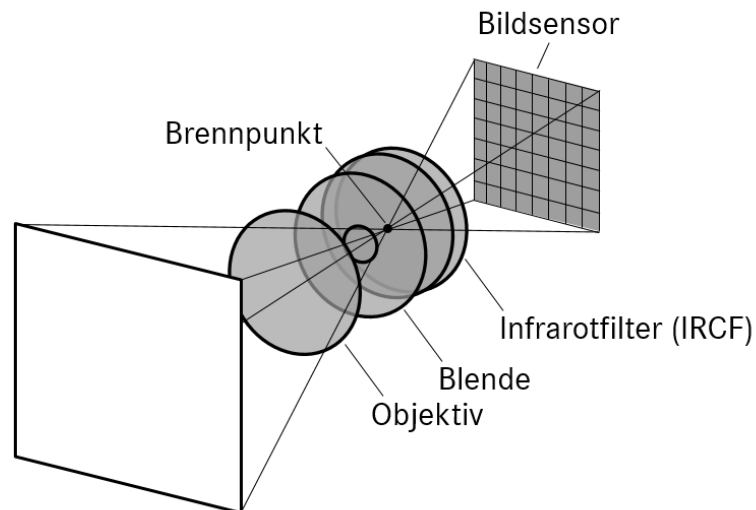


Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines Kameramoduls

Am schematischen Aufbau eines Kameramoduls, wie in Abbildung 11 gezeigt, lassen sich aufbauend auf den Komponenten die nötigen Eigenschaften erläutern, die später für die Entwicklung der Kalibrier- und Referenzierverfahren relevant sind. Die Hauptbestandteile eines Kameramoduls sind die Optik, bestehend aus Objektiven, Blende, Filtern sowie dem in Abbildung 11 nicht gezeigten Objektivgehäuse und der Bildsensor [Mar15]. Zusätzlich wird für die Auswertung der Aufnahmen und die Weitergabe der Bilddaten ein Bildverarbeitungsprozessor benötigt.

Für die Aufnahme eines Bildes wird Licht von Objekten in der Umgebung in das Objektiv der Kamera reflektiert. Dort wird das Licht durch die Linsen des Objektivs gebrochen, der Lichteinfall durch die Blende reguliert und schließlich durch Filter wie Infrarot- oder Ultraviolettfilter nur der gewünschte Wellenlängenbereich des Lichts für die Belichtung des Bildsensors verwendet. Der Bildsensor funktioniert auf dem Prinzip des Photoeffekts und wandelt das Licht in elektrische Signale, die anschließend durch den Bildverarbeitungsprozessor ausgewertet werden. Die wichtigsten Eigenschaften eines Kameramoduls in Bezug auf diese Arbeit sind der Öffnungswinkel, der den Winkel beschreibt, den die Kamera aus der Umgebung abbildet und die Auflösung der Kamera, welche einen Wert für die Abgrenzung von Bildmerkmalen darstellt. Beide Eigenschaften werden durch das Zusammenspiel zwischen Optik und Bildsensor beeinflusst und sind deshalb für die Auslegung eines Kameramoduls wichtig [Kei20]. Für die Kalibrierung einer Kamera nach Tsai werden folgende Parameter unterschieden [Rog86].

Grundlagen

	Parameterart	Einheit	Beschreibung
R_X	Extrinsisch	Grad	Rotation um die x-Achse mit Winkel α
R_Y	Extrinsisch	Grad	Rotation um die y-Achse mit Winkel β
R_Z	Extrinsisch	Grad	Rotation um die z-Achse mit Winkel γ
T_X	Extrinsisch	mm	Translation in x-Richtung
T_Y	Extrinsisch	mm	Translation in y-Richtung
T_Z	Extrinsisch	mm	Translation in z-Richtung
f	Intrinsisch	mm	Effektive Brennweite
C_X	Intrinsisch	Pixel	x-Wert des Bildhauptpunktes H
C_Y	Intrinsisch	Pixel	y-Wert des Bildhauptpunktes H
s_X	Intrinsisch	1	Skalierungsfaktor
κ	Intrinsisch	1/mm ²	Radialer Linsenfehlerkoeffizient

Tabelle 1: Die 11 Kameraparameter nach Tsai [Rog86]

Bezogen auf die Kalibrierparameter werden die Gruppen intrinsischer und extrinsischer Parameter unterschieden [Ric11]. Davon beschreiben die fünf intrinsischen Kalibrierparameter die kamerainternen Eigenschaften. Diese Parametergruppe wird bezogen auf die Fahrzeugkamarasysteme während des Produktionsprozesses beim Sensorlieferant ermittelt. Bei den verwendeten Kamerasystemen zur Referenzierung und Entwicklung von Kalibrierverfahren sind die intrinsischen Parameter nicht bekannt. Sie werden durch Aufnahmen von Kalibriertafeln mit bekanntem Aufdruck bestimmt und sind wichtig, weil die intrinsischen Parameter auch die Referenzierung und Kalibrierung der extrinsischen Parameter beeinflussen. Die Gruppe der extrinsischen Parameter beschreibt allgemein die sechs Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum relativ zu einem Koordinatensystem, also drei translatorische Parameter, jeweils eine in jede Raumachse und drei rotatorische Parameter in Form von Eulerwinkeln um die Achsen des Fahrzeugkoordinatensystems. Bei einem Fahrzeugkamarasystem wird damit die relative Lage zur Fahrwerkreferenz und bei Multikamarasystemen zusätzlich zu anderen Kamerasystemen beschrieben. Von den extrinsischen Parametern werden nur die drei rotatorischen Parameter im End of Line Bereich der Fahrzeugproduktion durch eine Kalibrierung bestimmt, die im folgenden Kapitel zum Stand der Technik näher erläutert wird. Die rotatorischen Parameter beeinflussen abstandsabhängig die

Genauigkeit des Kamerasystems, wohingegen die translatorischen Parameter mit gleichbleibendem Einfluss auf die Genauigkeit sowie ausreichend genauer Positionierung im Fahrzeug nicht durch eine Kalibrierung bestimmt werden [Rog86] [Mei20].

2.3.2 Radar

Die Abkürzung Radar steht für Radio Detection and Ranging und beschreibt die Entdeckung und Lokalisation von Objekten mittels elektromagnetischer Wellen [Lud02]. Anders als bei der passiven Kamera handelt es sich beim Radar um einen aktiven Sensor, der elektromagnetische Wellen im Gigahertzbereich aussendet und empfängt. Radarsensoren werden in Fahrzeugen für Fahrerassistenzsysteme und automatisierte Fahrfunktionen verbaut, um im Nah- und Fernbereich Objekte, deren Position sowie deren Relativgeschwindigkeit zu ermitteln [Win15]. So können beispielsweise vorausfahrende Verkehrsteilnehmer bis ca. 250 m im Fernbereich und auch Querverkehr oder Objekte im toten Winkel im Nahbereich erkannt werden.

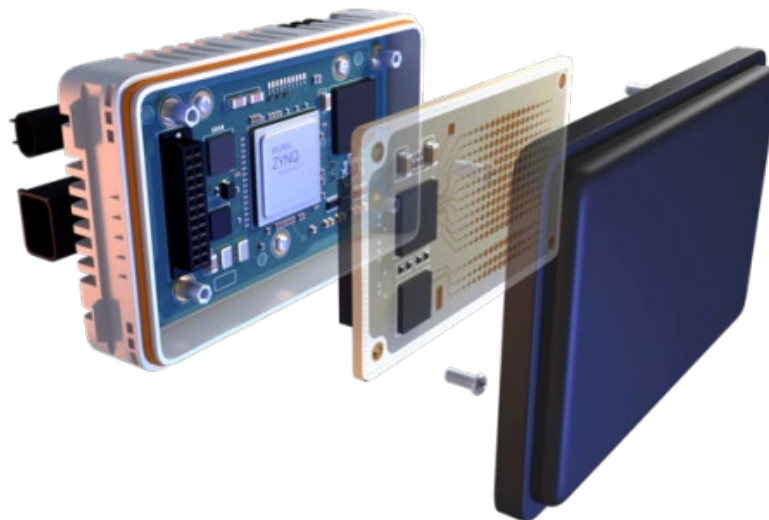


Abbildung 12: Radarsensor in Explosionsdarstellung [Con21]

Für die Detektion sendet der Radarsensor elektromagnetische Wellen durch die Sendeantennen gebündelt aus, die anschließend an den Objekten in der Umgebung reflektiert und durch die Empfangsantennen detektiert werden. Die Auswertung der gemessenen Signale erfolgt anschließend meist in einem sensorinternen Steuergerät. Dabei wird stark vereinfacht beschrieben die Entfernung r zum Objekt anhand der

Laufzeit t_{of} des ausgesendeten Signals und der Lichtgeschwindigkeit c wie folgt ermittelt [Lud02].

$$r = \frac{1}{2} * c * t_{of} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Differenzgeschwindigkeit \dot{r} kann dank des Doppler-Effekts mithilfe der Frequenzänderung $f_{Doppler}$, der Sendefrequenz f_0 und der Lichtgeschwindigkeit c wie folgt berechnet werden [Lud02].

$$\dot{r} = - \frac{f_{Doppler} * c}{2 * f_0} \quad \text{Gl. 6}$$

Der Azimutwinkel, der als Winkel um die Hochachse definiert ist, kann bei den nicht beweglichen Sensoren, die meist in Fahrzeugen eingesetzt werden, aus der gemessenen Phasendifferenz des Real- und Imaginärteils bzw. der Leistungsdifferenz mehrerer Empfangsantennen berechnet werden [Lud02].

Bezüglich der Justage wird beim Radarsensor nur der Azimut- und Elevationswinkel im Produktionswerk zur Fahrwerkreferenz justiert, weil sie die wichtigsten zu kalibrierenden Winkel des Sensors darstellen. Der Grund für die Priorisierung des Azimut- bzw. Gierwinkels vor den anderen Raumwinkeln ist die Fahraufgabe in der horizontalen Ebene. Denn der Azimutwinkel erstreckt sich über die Horizontale. In der Priorisierung folgen absteigend der Elevations- bzw. Nickwinkel und der Rollwinkel [Egg19].

2.3.3 Lidar

Lidar steht als Akronym für Light Detection and Ranging und beschreibt ein optisches Verfahren zur Detektion und Ortung von Objekten im Raum. Dabei werden im Gegensatz zum Radar Wellenlängen im infraroten, ultravioletten oder im für den Menschen sichtbaren Frequenzspektrum verwendet [Got15]. Bezüglich der Messverfahren wird im Fahrzeug meist das Laufzeitverfahren angewandt, bei dem die Zeit zwischen der aktiven Aussendung und dem Empfang des rückgestreuten Lichts gemessen wird. Anschließend wird analog zu Gleichung 5 durch Multiplikation mit der

Lichtgeschwindigkeit sowie dem Faktor 0,5, weil der Abstand durch das Licht zweimal durchlaufen wurde, der Abstand zum detektierten Objekt ermittelt.



Abbildung 13: Lidar-Sensor [Hes22]

Neben der beschriebenen Messfähigkeit kann es sein, dass der Sensor mehrere Ziele mit einem Strahl erfasst. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn durch Nebel, Niederschlag oder transparente Oberflächen Teile des Lichtimpulses vor dem eigentlichen Objekt reflektiert werden. Durch die Mehrzielfähigkeit ist es mit modernen Lidar-Sensoren möglich, mit diesen Effekten umzugehen. Zusätzlich kann durch die Detektion des reflektierten Lichtimpulses dessen Intensität gemessen und damit Rückschlüsse auf die optischen Eigenschaften des detektierten Objekts gezogen werden [Got15]. Lidar-Sensoren im Fahrzeug verfügen aktuell meist über Laser im nahen Infrarotbereich als Strahlenquelle und Empfangsdioden, um die reflektierten Lichtimpulse detektieren zu können. Obwohl es über den Doppler Effekt möglich wäre, Relativgeschwindigkeiten durch die Änderung der Wellenlängen detektieren zu können, wird aus Gründen der erhöhten Anforderungen zur Auswertung der Wellenlängen und den damit verbundenen Kosten meist die Relativgeschwindigkeit aus aufeinanderfolgenden Abstandsmessungen mit bekanntem Zeitintervall berechnet.

Ähnlich wie bei den anderen umgebungserkennenden Sensoren werden beim Lidar die drei rotatorischen Freiheitsgrade in der Fahrzeugproduktion justiert.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Inbetriebnahme und Kalibrierung im Produktionskontext

Um neue Prozesse der Inbetriebnahme und Kalibrierung für die Produktion entwickeln zu können, ist es wichtig, diese Prozesse in den gesamten Produktionskontext einzuordnen sowie den Stand der Forschung und Technik zu kennen.

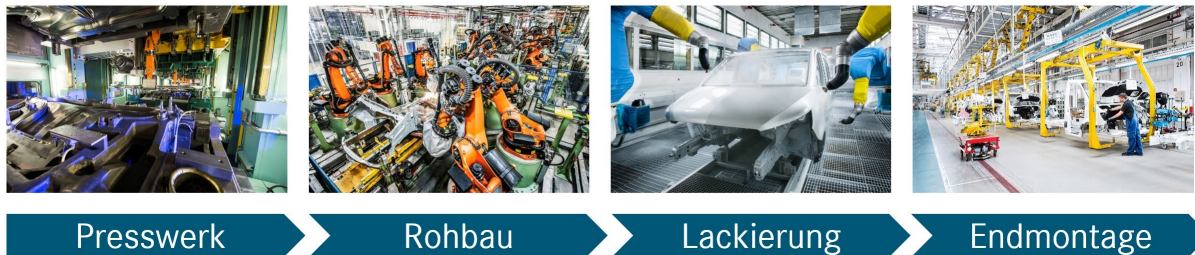


Abbildung 14: Hauptbereiche der Fahrzeugproduktion [Dai] [Dai21] [Dai211] [Dai212]

In der Produktion durchläuft ein Fahrzeug nacheinander die Hauptbereiche Presswerk, Rohbau und Lackierung, bevor am Ende des darauffolgenden Bereichs der Endmontage die Inbetriebnahme- und Kalibrierumfänge der Fahrerassistenzsysteme vorgenommen werden. Im ersten Bereich, dem Presswerk, werden zunächst aus Metallblechen in einem Umformprozess Karosserieteile hergestellt. Die Metallbleche werden dabei in meist hochautomatisierten Prozessen zunächst zugeschnitten und in Pressen umgeformt. Daraufgehend werden im Rohbau die Karosserieteile durch Fügeprozesse wie Kleben, Schweißen, Nieten und Schrauben zu einer Rohkarosse zusammengefügt. Anschließend folgt der Bereich der Lackierung, in dem die Rohkarossen zunächst gereinigt und vorbehandelt werden. Die Rohkarossen werden anschließend in einer kathodischen Tauchlackierung beschichtet und getrocknet, die Fügenähte werden abgedichtet und der Unterbodenschutz angebracht. Erst nach einer Füllerlackierung mit anschließender Bearbeitung zum Ausgleich möglicher Oberflächenfehler wird die Karosse in der gewünschten Farbe mit dem Basislack lackiert und abschließend zum Schutz mit einer Klarlackschicht versehen. Die Bereiche bis zu diesem Produktionstand sind weitestgehend automatisiert und im Vergleich zur folgenden Endmontage stehen nur wenige Werkertätigkeiten im direkten Kontakt zum Fahrzeug [Mül18].

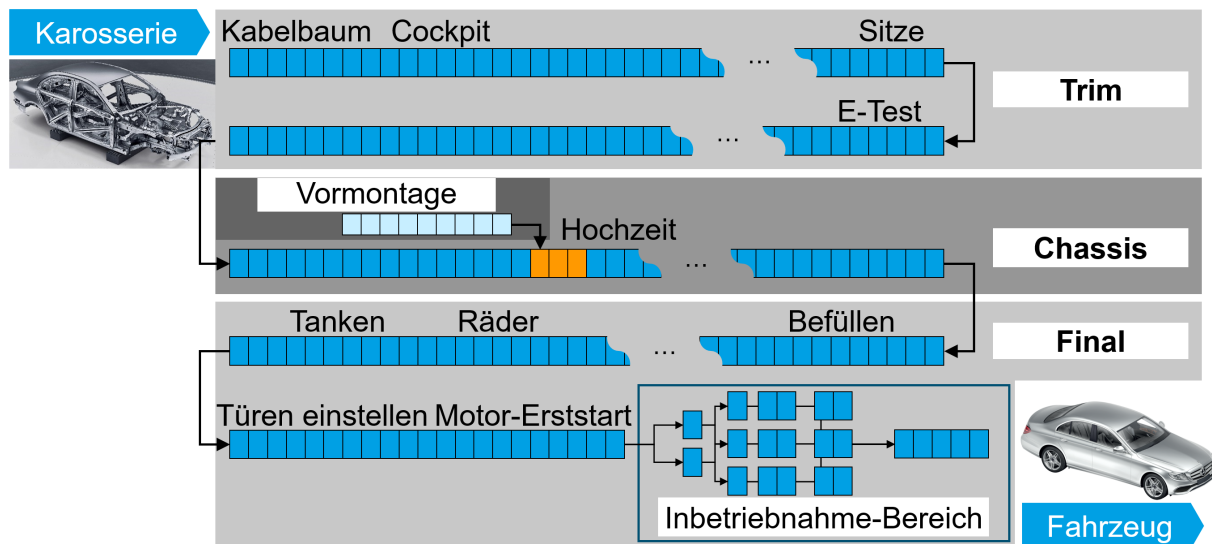


Abbildung 15: Übersicht der Endmontage [Mül18] [Dai18]

In der Endmontage werden alle Anbauteile an die lackierten Rohkarossen montiert und die Systeme in Betrieb genommen, um das Fahrzeug zu vervollständigen. Zusätzlich werden zur Reduktion der Umfänge in der Endmontage einzelne Teile oder Baugruppen wie das Cockpit, die Türen oder das Frontend vormontiert. Begonnen wird im Bereich des Inneneinbaus, auch Trim genannt, mit einer Demontage der Türen und Tankklappen aus produktionstechnischen und ergonomischen Gründen für den späteren Verbau. Anschließend werden neben dem Kabelbaum und dem Cockpit auch Tüllen, Stopfen, Kabeldurchführungen, erste Fahrwerkteile, die Sitze und weitere Kleinteile montiert. Außerdem werden im sogenannten E-Test die ersten Kontaktierungen der bereits verbauten elektrischen und elektronischen Bauteile geprüft. Im darauffolgenden Chassis Bereich wird unter anderem in der sogenannten Hochzeit der vormontierte Antriebsstrang mit der Karosserie verbunden. Im Final Bereich folgt dann die Befüllung mit allen Medien wie beispielsweise Kraftstoff, Öle und Kühlflüssigkeit. Es folgt die CW-Blech- und Innenkotflügel-Montage sowie die Montage der Räder und Türen. Zudem werden die Spaltmaße gemessen, die Türen eingestellt und letzte Kleinteile montiert. Es folgt vor dem Motorerstart ein weiterer E/E-Test, bei dem die geforderten Prüf- und Inbetriebnahmeumfänge an einigen Elektrik- und Elektronikkomponenten durchgeführt werden [Mül18].

Nach dem Motorerstart folgt der sogenannte End of Line, Fahrtechnik- oder Inbetriebnahmebereich. Dieser Bereich ist anders als die vorgelagerten Bereiche teilweise parallelisiert ausgeführt, weil die Umfänge in diesem Bereich länger dauern

als die Taktzeit. Der Großteil der Inbetriebnahme- und Kalibrierumfänge von Fahrerassistenzsystemen wird in diesem Bereich durchgeführt. Gründe dafür sind neben dem erhöhten Zeitbedarf, dass einige Umfänge einen fahrbereiten Aufbauzustand des Fahrzeugs erfordern. In folgender Abbildung 16 wird ein Überblick über die Fahrtechnik gegeben.

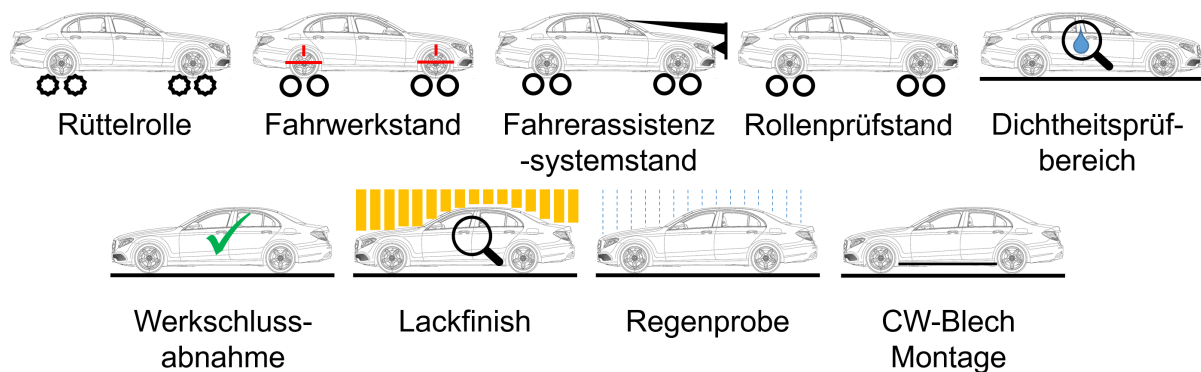


Abbildung 16: Übersicht Fahrtechnik [vgl. Dai18]

Die erste Station der Fahrtechnik ist die Rüttelrolle, die in anderer Ausführung auch Rüttelstrecke genannt wird. Durch das Abwälzen oder Überfahren von Unebenheiten einer Rolle oder dem Boden werden die Fahrzeuge dort in Schwingungen versetzt. Ziel ist es, damit Klappergeräusche zu identifizieren, die beispielsweise durch fehlende oder nicht korrekt verbaute Teile hervorgerufen werden können [Mül18]. Als nächste Station folgt der Fahrwerkstand, auf dem das Fahrwerk vermessen und anschließend eingestellt wird. Dies dient der Sicherstellung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit sowie der Reduktion des Reifenverschleißes, was sich wiederum positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die CO₂ Emissionen auswirkt. Durch die erfolgte Vermessung des Fahrwerks werden auf dem Fahrwerkstand meist auch die Scheinwerfer sowie die Umfeldsensorik für Fahrerassistenzsysteme und automatisierte Fahrfunktionen justiert. Wie dies heute abläuft, wird im folgenden Abschnitt näher thematisiert. Sofern die Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme nicht auf dem Fahrwerkstand erfolgt, ist dafür in der Regel ein Fahrerassistenzsystemstand vorgesehen, auf dem die Fahrzeuge zunächst vermessen und anschließend die Justierung durchgeführt wird. Im Anschluss folgt der Rollenprüfstand, auf dem das Fahrzeug diverse Tests und Adaptionsschritte durchläuft. Dabei durchfahren die Fahrzeuge auf dem Rollenprüfstand ein Prüfprogramm, um für die Testanforderungen wie Rotation der

Räder, Temperaturen der Aggregate sowie Lastzustände zu sorgen. So werden unter anderem Bremsen-, Radsensoren-, Ventil-, Hupen- und Instrumententests sowie Tätigkeiten zur Motor- und Automatikgetriebeadaptation entweder manuell durch einen Werker oder automatisiert durch ein Prüfprogramm durchgeführt. Im Dichtheitsprüfbereich werden Nebenaggregate des Fahrzeugs wie beispielsweise die Klimaanlage auf Dichtheit überprüft. Außerdem werden Adaptionstätigkeiten im Bereich der Gemischadaptation sowie auch Justagetätigkeiten für Parkkamerasysteme durchgeführt, wobei auf letztere im nächsten Abschnitt eingegangen wird. Zusätzlich wird in diesem Bereich die Unterbodenverkleidung montiert. Dieser Montageschritt wird aufgrund des zuvor benötigten Zugangs zu Fahrwerkteilen und für die Dichtigkeitsprüfung erst in dieser Station realisiert. Anschließend kann eine ausstattungsabhängige Station zur Inbetriebnahme des Head-Up-Displays (HUD) folgen, die aufgrund der Ausstattungsabhängigkeit nicht in Abbildung 16 abgebildet wurde. In dieser Station wird das HUD in Betrieb genommen, das es dem Fahrer ermöglicht, Informationen in dessen Sichtbereich auf die Windschutzscheibe zu projizieren. Hierbei wird ein Kamerasystem beispielsweise mithilfe eines manuellen kamerabasierten Betriebsmittels oder eines Robotersystems in das Fahrzeug entsprechend der Blickrichtung des Fahrers eingebracht. Anschließend kann durch die Auswertung des projizierten Inhalts eine Justage erfolgen, die aufgrund von Toleranzen im Produktionsprozess entstanden sind. Es folgt die Regenprobe zur Prüfung der Fahrzeugdichtheit, bei der die Fahrzeuge in einer Kabine durch mehrere Düsen beregnet werden. Anschließend wird das Fahrzeug durch Luftdüsen getrocknet und von Werkern visuell und haptisch bzw. mit Hilfe von Messtechnik auf undichte Stellen im Innenraum überprüft. Zusätzlich wird die Zeit in der Regenprobe auch für eine Ruhestromprüfung genutzt, um zu verhindern, dass sich die Fahrzeugbatterien später beim Kunden ungewollt durch fehlerhafte Verbraucher entladen. Abschließend folgt die Werkschlussabnahme oder auch Finish genannt. Dort werden im Rahmen der letzten Kontrollen die Fahrzeuge sowohl innen als auch außen auf Beschädigungen untersucht sowie ggf. Fehler beseitigt. Außerdem werden die Fehlerspeicher ausgelesen und gelöscht sowie der Produktionsmodus der Steuergeräte abgeschaltet, um die Fahrzeuge in den Kundenmodus zu versetzen. Zusätzlich werden teilweise Schutzfolien angebracht, um die Fahrzeuge auf dem Transportweg zu den Kunden vor Beschädigungen zu schützen. Wurden keine Fehler gefunden und die

Werkschlussabnahme erfolgreich durchlaufen, sind die Fahrzeuge fertig und werden an den Vertrieb übergeben [Mül18].

Abschließend ist es wichtig zu erwähnen, dass es für die Produktion und Inbetriebnahme keine einheitlichen Verfahren und Prozesse gibt. Obwohl sich der grundlegende Produktionsablauf wenig unterscheidet, gibt es im Detail einige Unterschiede, selbst bei unterschiedlichen Hallen eines Werks des gleichen Herstellers.

3.2 Inbetriebnahme und Kalibrierung heute

Die Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen findet bei der Mercedes-Benz AG heute hauptsächlich auf dem Fahrwerkstand und im Dichtheitsprüfbereich statt, weshalb auf diese Stationen detaillierter eingegangen wird. Folgende Abbildung 17 zeigt einen Fahrwerkstand in der Fahrtechnik im Überblick.

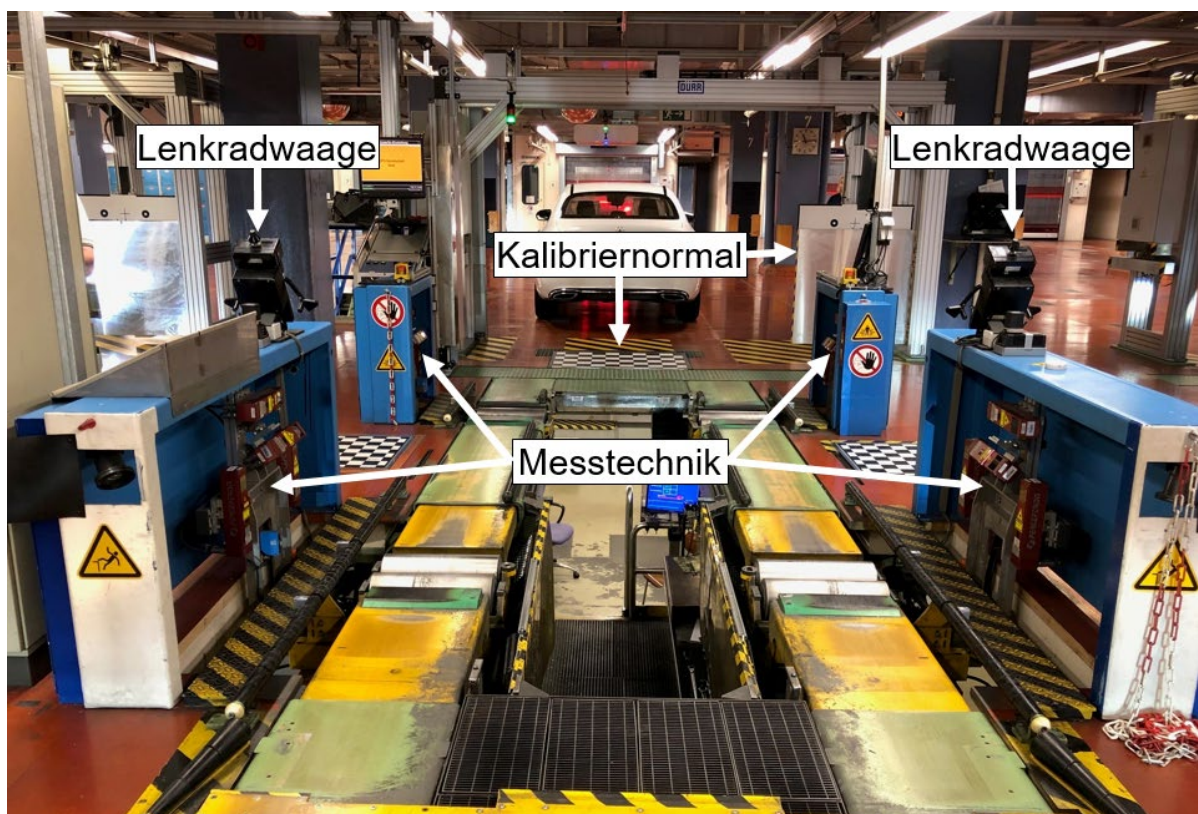


Abbildung 17: Fahrwerkstand

Auf dem Fahrwerkstand werden bei der Mercedes-Benz AG Tätigkeiten zur Fahrwerkeinstellung, Niveaukalibrierung, Scheinwerferjustage, Radarkalibrierung, Lidarkalibrierung, Kamerakalibrierung und Kommunikationsprüfung durchgeführt

[Jon19]. Wird ein Fahrzeug von einem Werker auf den Fahrwerkstand gefahren, so beginnt die Kommunikation des Fahrzeugs über das Diagnosesystem mit der Anlage. Durch die Initialisierung sind der Anlage sämtliche Informationen zum Fahrzeug bekannt, um die folgenden Prüfabläufe vorbereiten zu können. Dies ist wichtig, da einige Tätigkeiten ausstattungsbezogen sowie aus Gründen der Prozesszeit parallelisiert durchgeführt werden. Anschließend wird vom Werker eine Lenkradwaage zur Bestimmung der Schiefstellung des Lenkrads in das Fahrzeug eingelegt. Das Lenkrad wird im Rahmen der geforderten Toleranz geradegestellt sowie die Lenkradwaage gegen die Windschutzscheibe gespannt und dadurch arretiert, um ein nachträgliches Herausfallen der Lenkradwaage zu vermeiden [Jan13]. Die Lenkradwaage sendet anschließend den gemessenen Lenkradwinkel an die Anlage, um die einzustellenden Spurwerte entsprechend des Lenkradwinkels zu korrigieren. Es folgt anschließend der Radumschlag, bei dem das Fahrwerk entspannt sowie das Fahrzeug auf dem Fahrwerkstand zentriert wird. Dafür werden die Räder durch den Fahrwerkstand angetrieben. Nachdem diese Vorarbeit geleistet wurde, beginnt automatisiert die Vermessung des Fahrwerks. Dafür wird zunächst das Niveau zwischen Radmittelpunkt und der Kotflügeloberkante durch die in Abbildung 17 dargestellte Messtechnik bestimmt. Diese funktioniert nach dem Stand der Technik entweder wie dargestellt mit einem Laser oder einem Kamerasystem, jedoch in beiden Fällen nach dem Prinzip der Triangulation. Die gemessenen Niveauwerte werden einerseits für die Berechnung der Fahrwerkgeometrie benötigt, andererseits werden damit Aktivfahrwerke kalibriert. Anschließend wird die eigentliche Fahrwerkvermessung durchgeführt, die zur Kompensation eines möglichen Felgen- und Radschlags ebenfalls mit drehenden Rädern erfolgt. Damit die Fahrwerkvermessung korrekte Werte liefert, müssen die Messsysteme untereinander kalibriert bzw. vermessen sein. Diese Kalibrierung wird zunächst zur Inbetriebnahme des Fahrwerkstandes mit einem externen Messsystem durchgeführt sowie anschließend in regelmäßigen zeitlichen Abständen mit Hilfe eines Kalibriernormals. Parallel zu den beschriebenen Abläufen auf dem Fahrwerkstand werden zusätzlich Kommunikationsprüfungen wie beispielsweise der Empfang von Radiofrequenzbändern und Mobilfunknetzen sowie der Klimakompressoreinlauf durchgeführt. Obwohl in Abbildung 17 zusätzlich Kalibriernormale auf dem Boden in Form von Schachbrettmustern zu sehen sind, werden damit aktuell keine Parkkameras kalibriert. Die Kalibrierung der Parkkameras erfolgt aktuell auf dem Dichtheitsprüfstand und die

Schachbrettmuster stammen von einer älteren Generation von Parkkamerasystemen, die auf dem Fahrwerkstand kalibriert wurden.

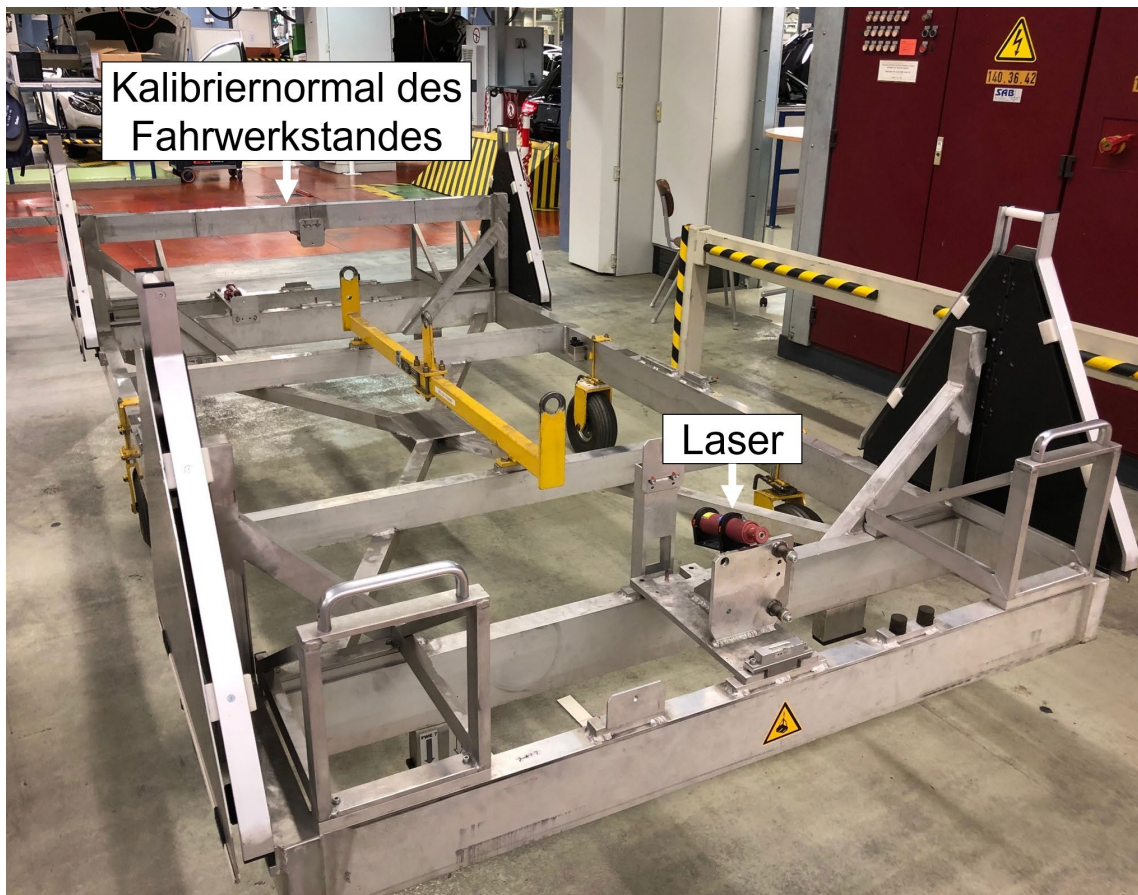


Abbildung 18: Kalibriernormal des Fahrwerkstandes

Das in Abbildung 18 dargestellte Kalibriernormal besitzt bekannte Maße, die wiederum regelmäßig durch einen Kalibrierdienst bestätigt werden. Für eine Kalibrierung der Messtechnik des Fahrwerkstandes wird das Kalibriernormal mithilfe eines Kranes auf den Fahrwerkstand gestellt und auf jeweils einer Aufnahme pro Schwimmplatte positioniert. Es folgt die Kalibrierung der Messtechnik durch die Messung der bekannten Maße des Kalibriernormals. Außerdem wird mit einem am Kalibriernormal angebrachten Laser zusätzlich der Lichtsammelkasten für die Scheinwerferjustage kalibriert. Nachdem die Fahrwerkreferenz mit dem kalibrierten Fahrwerkstand bestimmt wurde, kann mit der Fahrwerkeinstellung und der Scheinwerferjustage begonnen werden. Für beide Tätigkeiten befindet sich jeweils ein Werker in der Grube unter dem Fahrzeug sowie ein Werker an den Scheinwerfern. Der Werker in der Grube beginnt mit der Einstellung der Hinterachse, sofern diese nicht bereits durch die

Voreinstellung im Achswerk korrekt ausgeführt wurde. Danach wird die Spur der Vorderachse zur geometrischen Fahrachse durch manuelle Einstellung der Spurstangen eingestellt. Parallel dazu werden oben die Scheinwerfer justiert, sobald die geometrische Fahrachse korrekt eingestellt wurde. Dafür wird ein Lichtsammelkasten, der an einem Portal vor dem Fahrzeug befestigt ist, wie in folgender Abbildung 19 dargestellt, nacheinander vor den Scheinwerfern positioniert.



Abbildung 19: Scheinwerferjustage

Dieser Lichtsammelkasten verfügt über eine Kamera, welche die Hell-Dunkel-Grenze der Scheinwerfer auf der Projektionsfläche des Lichtsammelkastens erfasst. Die daraus berechneten manuellen Justageanweisungen für den Werker werden ähnlich wie für die Fahrwerkeinstellung über Monitore visualisiert und berücksichtigen die vertikale Einstellung von unten nach oben, um keine nachträglichen Änderungen durch Setzeffekte zu erhalten. Sobald die Scheinwerfereinstellung erfolgreich abgeschlossen wurde, wird die Haube auf das Haubenschloss gelegt und der Lichtsammelkasten zur Seite geschoben, um die Sicht auf das Target für die Kamerakalibrierung freizugeben. Die Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme darf erst nach abgeschlossener Fahrwerkeinstellung und Scheinwerferjustage erfolgen, da

es sonst zu Fehlern beispielsweise durch mögliche Fahrzeugbewegungen oder durch Werker vor den Kalibriernormalen oder auch Targets kommen kann.



Abbildung 20: Kalibriernormale für Kamera und Radar

Die Kalibriernormale in Form einer Metallplatte für die Radarkalibrierung sowie einer bedruckten Kalibriertafel für die Kamerakalibrierung werden vorab an einem Portal in die Sollposition gefahren. Die Position ergibt sich aus der Fahrzeugvermessung durch den Fahrwerkstand sowie einer Vermessung des Portals mit den Kalibrierreferenzen relativ zum Fahrwerkstand. Die Radarkalibrierung mithilfe der Metallplatte ermöglicht eine Kalibrierung in Azimut, also um die Hochachse sowie in Elevation, also um die Fahrzeugquerachse. Dazu wird die Metallplatte orthogonal zur geometrischen Fahrachse ausgerichtet. Dies ist möglich, weil die Metallplatte automatisiert um die Hochachse gedreht werden kann. Die Radarkalibrierung an sich wird durch die Anlage gestartet, sobald die Metallplatte korrekt ausgerichtet ist und alle Anforderungen für die Kalibrierung erfüllt sind. Sie funktioniert, indem ein Radarimpuls auf die Metallplatte ausgesendet wird. Die Radarstrahlung wird von der Metallplatte entsprechend ihrer

Ausrichtung reflektiert und der relative Winkel zwischen Metallplatte und Radarsensor durch die Phasendifferenzen der einzelnen örtlich versetzten Empfangsantennen des Radarsensors bestimmt. Die Kamerakalibrierung wird dahingegen zur Referenz der Fahrwerksymmetrieachse kalibriert. Kameraseitig werden die drei Raumwinkel (Gier-, Nick- und Rollwinkel) durch die Erfassung der zwei Kreisringe kalibriert. Dies funktioniert über eine Kantenerkennung sowie einen anschließenden Soll-Ist-Vergleich der Lage der Kreisringe im Kamerabild. Das Kalibriernormal für die Inbetriebnahme des Lidarsensors ist in den bisher gezeigten Abbildungen nicht zu sehen, da nicht in allen Baureihe ein Lidarsensor verbaut und somit nicht auf jedem Fahrwerkstand ein Kalibriernormal dafür vorgesehen ist.



Abbildung 21: Lidarkalibriernormal [Bey21]

Das Kalibriernormal für den Lidarsensor lässt sich in Form zweier ca. vier Meter langer und ca. ein Meter hoher Kalibriertafeln beschreiben, die sich vor dem Fahrwerkstand links und rechts des Fahrbereichs befinden. Die beiden Kalibriertafeln sind im Infrarotwellenlängenbereich des Lidarsensors hochreflektiv beschichtet. Das Kalibrierverfahren ähnelt dem der Kamera durch eine Erfassung der Kalibriertafeln anhand der Reflektivität des Kalibriernormals und einem Soll-Ist-Vergleich der Lage der Kalibriertafeln im Sensorbild.

Schlägt eine Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme fehl, so wird der fehlgeschlagene Ablauf in der Regel bis zu dreimal wiederholt, bevor die Kalibrierung als nicht erfolgreich klassifiziert wird und damit eine Nacharbeit des Fahrzeugs folgt. Sobald alle Tätigkeiten durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse der Prüfabläufe in unterschiedlichen Systemen für beispielsweise Analysen, Produkthaftung und Service gespeichert. Außerdem wird die Lenkradwaage durch den Werker entnommen und das Fahrzeug aus dem Fahrwerkstand gefahren.



Abbildung 22: Dichtheitsprüfstand

Auf dem Dichtheitsprüfstand folgen nach dem Rollenprüfstand unter anderem Tätigkeiten zur Motoradaption sowie die Kalibrierung des 360 Grad Parkkamerasystems. Bei diesem System handelt es sich um vier Weitwinkelkameras, die in der Fahrzeugfront, im Heck sowie jeweils an den Außenspiegeln montiert sind und später dem Kunden eine Fahrzeugansicht beispielsweise aus der Vogelperspektive ermöglichen. Wie in Abbildung 22 dargestellt, existiert auf dem Dichtheitsprüfstand keine Messtechnik, mit der eine Fahrwerkreferenz bestimmt werden kann. Die Referenzierung wird mit den zu kalibrierenden Parkkameras vorgenommen. Unter Annahme der Eigenposition der Kameras im Fahrzeug sowie durch die bekannten Maße der Kalibrierreferenz lässt sich die Fahrzeugposition relativ zur Kalibrierreferenz bestimmen. Gleichzeitig ist eine Kalibrierung des 360 Grad

Parkkamarasystems aufgrund der bekannten Maße der Kalibrierreferenz möglich. Dabei werden die vier Kameras nicht zu einer Fahrwerkreferenz, sondern zueinander sowie zum Fahrzeug kalibriert. Allerdings ist es mit diesem Verfahren nur möglich, 360° Parkkamarasysteme und keine einfache Rückfahrkamera zu kalibrieren [Gor22]. Zusammenfassend lassen sich die heutigen Kalibrier- und Inbetriebnahmeverfahren für Fahrerassistenzsysteme bei Mercedes-Benz durch die Referenzierung des Fahrwerkstandes bzw. im Sonderfall der Parkkamarasysteme durch die Parkkamaras selbst sowie die Kalibrierung durch jeweils ein bekanntes und zum Fahrzeug positioniertes Kalibriernormal für jeden Sensor beschreiben. Dies resultiert aus den Anforderungen der Sensorlieferanten, die für ihre Sensoren ein Kalibrierverfahren entwickelt haben und daraus Anforderungen für die Kalibrierung definieren. Das Entwickeln eines neuen Kalibrierverfahrens für bestehende Seriensensorik ist deshalb nur möglich, wenn die alte Kalibrierlogik verwendet werden kann.

Die bisher beschriebenen Inbetriebnahme- und Kalibrierverfahren stellen zum Zeitpunkt dieser Arbeit die allgemein verwendeten Verfahren dar. Seit der Einführung der ersten Fahrerassistenzsysteme wurden jedoch in der Vergangenheit auch andere Verfahren eingesetzt. So beispielsweise das Verfahren zur Kalibrierung der 360 Grad Parkkamarasysteme, das in Abbildung 17 anhand der in Summe vier Kalibrierreferenzen am Boden teilweise zu sehen ist. Für dieses Verfahren wurden früher die Fahrzeuge durch die Messtechnik des Fahrwerkstands referenziert und die vier Parkkamaras durch die bekannte Lage und Ausführung der Kalibrierreferenzen kalibriert. Nachteilig an diesem wie auch dem aktuellen Verfahren zur Kalibrierung der 360 Grad Parkkamarasysteme sind die Empfindlichkeiten des Verfahrens aufgrund von Verschmutzung bzw. Beschädigung sowie durch störende Gegenstände auf oder in der Nähe der Kalibriernormale [Gor22]. Auch für die Radarkalibrierung gab es in der Vergangenheit andere Verfahren. So wurde zunächst die Radarkalibrierung mithilfe des Lichtsammelkastens durchgeführt. Dafür wurde im ersten Schritt ein Laser auf dem Gehäuse des Radarsensors befestigt und dessen Lichtpunkt im Scheinwerferkasten erfasst. Aus der ermittelten Position des Lichtpunktes im Scheinwerferkasten konnte dann auf die Ausrichtung des Sensorgehäuses rückgeschlossen werden.

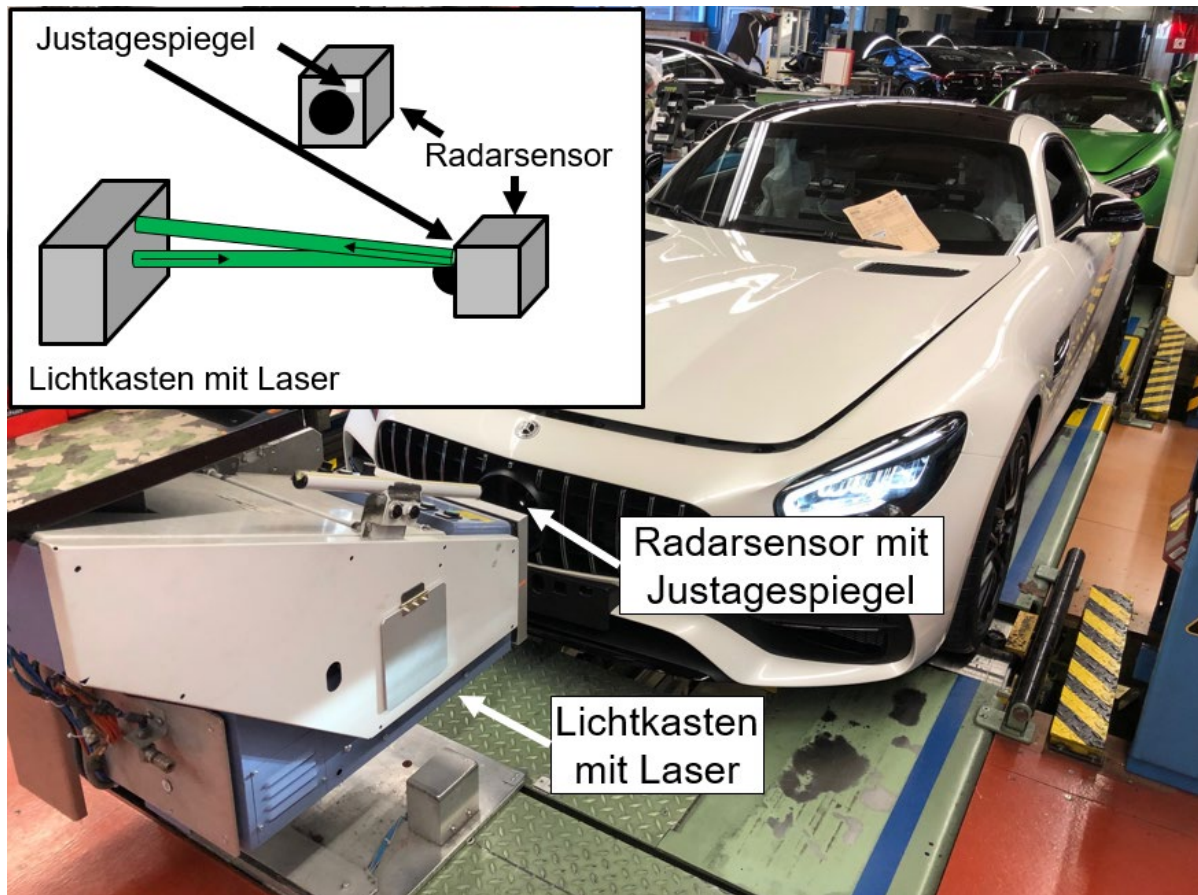


Abbildung 23: Radarkalibrierung mit dem Lichtsammelkasten

Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist in Abbildung 23 dargestellt und wurde durch einen Spiegel am Gehäuse des Radarsensors erreicht. Das Verfahren an sich hat sich jedoch nur kaum verändert. Es wurde der Laser im Scheinwerferkasten montiert und damit der Spiegel am Sensorgehäuse angepeilt sowie anschließend die ermittelte Position des reflektierten Lichtpunktes im Scheinwerferkasten ausgewertet. Nachteilig an diesem Verfahren war einerseits der vergleichsweise hohe zeitliche Aufwand, andererseits wurde mit diesem Verfahren die Ausrichtung des Sensorgehäuses bzw. des Spiegels am Sensorgehäuse und nicht die eigentlich relevante Ausrichtung der Radarantennen bestimmt. Abschließend musste für die Kalibrierverfahren das Radom nach erfolgter Kalibrierung montiert werden, was wiederum den Strahlengang des Radarsensors beeinflussen kann [Pfa14].

Auf den gesamten Produktlebenszyklus eines Fahrzeugs gesehen, stellt die werksseitige Initialkalibrierung des Fahrzeugs im Produktionswerk nur eine Kalibrierung von vielen dar. Durch beispielsweise thermische oder mechanische Einflüsse kann sich die Sensorausrichtung verändern. Aus diesem Grund werden die

Sensoren über eine sogenannte Onlinekalibrierung während der Fahrt fortlaufend nachkalibriert. Hierbei werden bei den meisten Verfahren stark vereinfacht Objekte in der Umgebung während der Fahrt erfasst und die Bewegung der erfassten Objekte relativ zur eigenen Bewegung ausgewertet. Daraus lassen sich durch unterschiedliche Verfahren Kalibrierparameter ermitteln. Andere Kalibrierverfahren nutzen Annahmen, wie beispielsweise, dass die Bodenebene oder Bodenstrukturen eben sind, um daraus die Kalibrierparameter zu bestimmen [Gor22]. Die genaue Funktion der Kalibrierverfahren ist weder für die Initialkalibrierung im Produktionswerk noch für die Onlinekalibrierung bekannt, weil sie das Wissen und die Entwicklung der Lieferanten beinhalten.

Bei anderen Fahrzeugherstellern und Lieferanten für Betriebsmittel in der Fahrtechnik werden auch andere als die bisher beschriebenen Verfahren verwendet, um die Fahrerassistenzsysteme in Betrieb zu nehmen. Ein Beispiel dafür stellt folgendes Verfahren dar.



Abbildung 24: Fahrerassistenzsystemstand Tesla Shanghai [Tes20]

Im Teslawerk in Shanghai werden Fahrerassistenzsysteme auf einem Fahrerassistenzsystemstand nach dem Fahrwerkstand kalibriert. Anders als bei den bisher beschriebenen Kalibrierverfahren werden für die vielen Kamerasysteme

Kalibriernormale auf aktiv beleuchteten Monitoren eingesetzt. Dies ermöglicht dynamische Anzeigemöglichkeiten, wodurch beispielsweise Ungenauigkeiten der Fahrzeugpositionierung ausgeglichen, einfach andere Kalibriernormale übernommen oder auch virtuell die Kalibrierreferenzen gedreht werden können. Zudem sind die Monitore aktiv beleuchtet und benötigen deshalb keine zusätzlichen Lichtquellen. Außerdem wird ein ähnliches Radarkalibrierverfahren mit einer Metallplatte gezeigt, allerdings mit einem deutlich kleineren Kalibriernormal und Radarabsorbermaterial an metallischen Strukturen in der Umgebung. Durch diese Veränderung sind die Metallplatten deutlich preisgünstiger in der Herstellung, jedoch besteht die Gefahr von störenden Reflexionen in der Umgebung. Zusätzlich sind in Abbildung 24 im Bereich der Räder Antennen zu sehen, die vermutlich zum Einlernen der Reifendrucksensoren angebracht sind [Tes20].

Eine andere Strategie ist es, die Sensoren nicht in Betrieb zu nehmen, sondern Fahrzeuge unkalibriert an die Kunden auszuliefern. In diesem Fall kann der Kunde seine Fahrerassistenzsysteme ggf. nicht sofort nutzen. Die Systeme kalibrieren sich online während den ersten Kilometern Fahrt auf der Straße anhand der Umgebung und sind dann verfügbar. Vorteilhaft daran sind beispielsweise die verringerte Komplexität und das Einsparpotential in der Produktion, nachteilig steht dem jedoch zum Beispiel die verringerte Nutzbarkeit des Systems sowie die Möglichkeit eines Fehlverbau gegenüber. Bei einem Fehlverbau eines Sensors ist es möglich, dass der Sensor lose und damit in einer veränderlichen oder in einer nicht gewünschten Pose im Fahrzeug verbaut ist. Dies hat in der Regel negative Auswirkungen auf die Funktion der Systeme und betroffene Fahrzeuge müssen im Rahmen eines ungeplanten Servicetermins nachgearbeitet werden.

Auch Lieferanten für Betriebsmittel in der Fahrtechnik zeigen einige Konzepte für die Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen.

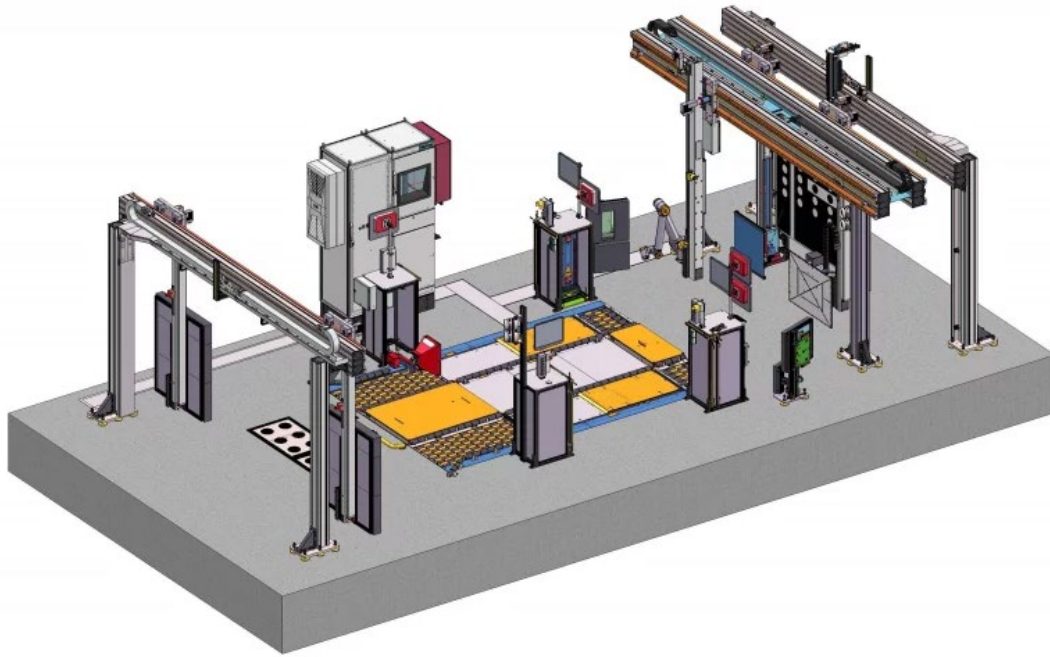


Abbildung 25: Ansatz der Inbetriebnahme von VisiCon [Vis21]

So zeigt die Firma VisiCon zusätzlich Dopplergeneratoren an den vier Ecken des Fahrwerkstandes, um damit die Eckradarsysteme zu kalibrieren. Hierbei werden hauptsächlich zwei Verfahren unterschieden. Einerseits ein aktives Verfahren, das die Radarimpulse des Fahrzeugs empfangen und beispielsweise eine frequenzverschobene Antwort senden kann. Andererseits gibt es passive Verfahren, die beispielsweise stark vereinfacht aus einem Metallventilator und einer Hornantenne bestehen. Der Radarimpuls wird von der Hornantenne dabei auf einen definierten Punkt des Metallventilators fokussiert und durch die Drehrichtung sowie die Drehzahl kann ebenfalls eine Frequenzverschiebung erreicht werden, die anschließend wieder mit Hilfe des Hornstrahlers fokussiert und zum Fahrzeug zurückreflektiert wird. Außerdem wird von VisiCon zusätzlich eine HUD Inbetriebnahme durch einen kollaborierenden Roboter angeboten [Vis21].

Ein Ansatz, der sich minimal von den anderen unterscheidet, zeigt Texa mit seinem Radarkalibriernormal für die Anwendung im Aftersales. Hier werden gewöhnliche Spiegel anstelle der Metallplatte verwendet. Diese zeichnen sich durch reduzierte Kosten und die Eigenschaft aus, dass verbogene Spiegel brechen, Metallplatten hingegen nicht. So kann eine unebene Metallplatte für unsaubere Kalibrierergebnisse sorgen und damit einen schwer zu findenden Fehler darstellen. Ein zerbrochener Spiegel hingegen ist leicht erkennbar [TEX21].

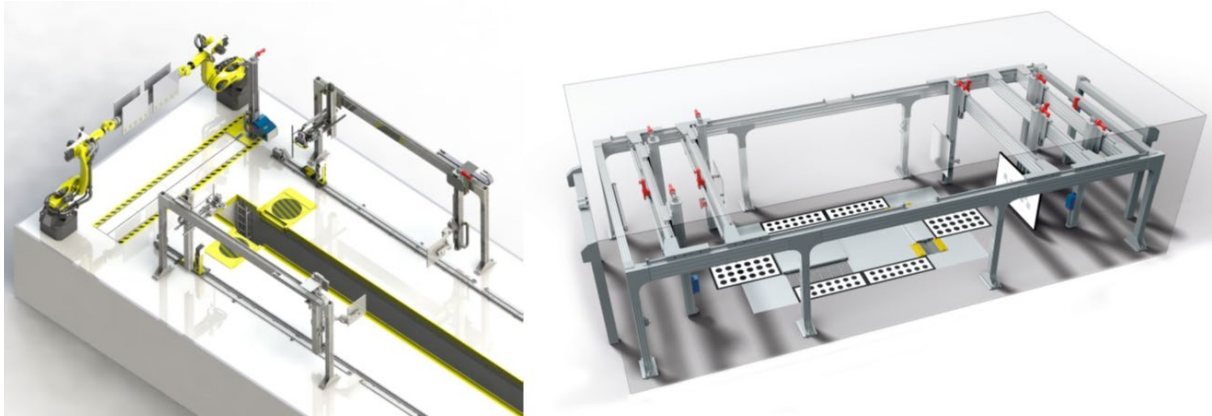


Abbildung 26: Ansatz der Inbetriebnahme von Dürr [Dür21] [Dür211]

Dürr hingegen geht in seinen neusten Präsentationen einen Weg, bei dem mehrere Targets zu einem Universaltarget zusammengefasst werden. So wird ein kombiniertes Radar- und Kameratarget an einem Roboter angeboten. Diese und auch eine konventionelle Lösung mit diversen einfachen Targets werden von Dürr in einem abgeschlossenen Raum ähnlich einer Dunkelkammer angeboten, um Einflüsse durch Fremdlichtquellen zu reduzieren [Dür21].

Doch der Ansatz, mehrere Targets für unterschiedliche Sensoren zusammenzufassen, ist nicht neu. So liegt seitens Mercedes-Benz ein Patent vor, das ein Universaltarget für Radar, Lidar und Kamera beschreibt, in dem unterschiedliche Funktionsschichten kombiniert werden. Die erste Schicht ist infrarotreflektiv ausgeführt, die zweite Schicht besteht aus einer elektrisch leitfähigen Schicht, die Radarstrahlen reflektiert und die dritte Schicht besteht aus einer Folierung, die von der Kamera im sichtbaren Wellenlängenbereich erkannt werden kann. Außerdem kombiniert dieser Ansatz die Vorteile des Glases, das kostengünstig ist und Fehlstellen durch Risse einfach zu erkennen sind, mit den Vorteilen eines Universaltargets [Jon20].

Abschließend kann aus den beschriebenen Verfahren und Entwicklungen der letzten Jahre zum Thema Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen der Trend hin zu einfachen und toleranzoptimierten Verfahren mit weniger Betriebsmitteln beobachtet werden. Dies spiegelt unter anderem die Defizite heutiger Verfahren im Betriebsmittelbedarf wie Targets aber auch beispielsweise das Kalibriernormal des Fahrwerkstandes und die dafür benötigten Kräne wieder. Auch werden im Vergleich zu einem Inlineverfahren weitere Defizite heutiger Verfahren im Bereich Platz-, Zeit- und Werkerbedarf ersichtlich, die sich hauptsächlich durch die heute statischen Verfahren am Ende eines dynamischen Produktionsprozesses ergeben.

4 Inline Referenzierverfahren

4.1 Planung des Gesamtverfahrens

Grundlage für die Konzeptentwicklung neuer Verfahren für die Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen sowie deren technische Umsetzung ist das Planen und Klären der Aufgabe. Damit werden Informationen zur Aufgabenstellung beschafft, um daraus eine informative Festlegung in Form einer Anforderungsliste zu erreichen. Auf Basis der Anforderungsliste werden nach dem Klären der Aufgabe durch die Kenntnis wesentlicher Probleme Funktionsstrukturen aufgestellt. Anschließend wird nach geeigneten Wirkprinzipien gesucht, die zur Lösung der Aufgabenstellung führen, um in Kombination mit einer Wirkstruktur nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien die prinzipielle Lösung in Form eines Konzepts festzulegen [Pah05].

Das Planen und Klären wird in diesem Kapitel aus Gründen der Übersichtlichkeit zunächst allgemein für das Gesamtkonzept der Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen durchgeführt. Allgemeingültige Anforderungen werden beispielsweise in diesem Kapitel thematisiert, sind jedoch genauso für die Inline Kalibrierverfahren der darauffolgenden Kapitel relevant. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Spezifika der vier Teilbereiche des Inline Referenziersystems, des Inline Kamerakalibrierverfahrens, des Inline Lidarkalibrierverfahrens sowie des Inline Radarkalibrierverfahrens auf die jeweiligen Kapitel aufgeteilt. Allerdings sind die Schnittstellen zueinander sehr wichtig, da abschließend aus den vier entwickelten Teilkonzepten ein Gesamtkonzept entstehen soll, welches in Kapitel 8 näher beschrieben wird.

Die Planung des Gesamtverfahrens wurde bereits grob einer Analyse der aktuellen Situation sowie der zu erwartenden zukünftigen Entwicklungen unterzogen und die daraus resultierenden Ergebnisse fließen mit in die Anforderungsliste ein. Um dem Entwicklungsauftrag gerecht zu werden, sind die Anforderungen und Wünsche vieler unterschiedlicher interner Interessensgruppen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden leitfadengestützte Expertenbefragungen durchgeführt [Now20]. Dazu wurden nach dem Mehr-Perspektiven-Ansatz aus dem End-of-Line Bereich ein Betriebsingenieur sowie Meister und Mitarbeiter, Entwicklungsingenieure aus den

Entwicklungsbereichen der einzelnen Fahrerassistenzsysteme wie Parkkamerasysteme, Multi Purpose Kamera, Lidar- und Radarsensorik, ein Mitarbeiter aus dem Bereich Montageeinführung E/E Prozessplanung, ein Mitarbeiter aus der Standortplanung Fahrwerkstand und End of Line, ein Mitarbeiter aus der Produktionsbetreuung von Completely Knocked Down (CKD) Werken, Mitarbeiter aus der Instandhaltung, ein Mitarbeiter aus dem Bereich Prävention und Data Analytics Montageprozesse, ein Doktorand, der auf dem Gebiet der Fahrtechnik promoviert sowie Mitarbeiter aus der Arbeitssicherheit befragt [VWL02]. Die gesammelten Ergebnisse wurden anschließend mit dem Voice of Customer (VOC) Prozess und der 5-Why-Methode ausgewertet.



Abbildung 27: Datenauswertung der Expertenbefragungen [vgl. Now20]

Die Auswertung der Expertenbefragungen erfolgt wie in Abbildung 27 dargestellt, in fünf Schritten [Now20]. Den Grund dafür stellt der erste Schritt, die Erhebung der Daten selbst dar. Die erhobenen Daten bzw. Kundenstimmen sind meist unspezifisch, mehrdeutig, nicht messbar sowie möglicherweise widersprüchlich formuliert und damit nicht geeignet, um sie in einer Anforderungsliste oder für das Bewertungsverfahren nutzen zu können. Aus diesem Grund wird im zweiten Schritt durch die 5-Why-Methode die tiefere Aussage der Kundenstimme durch iteratives Hinterfragen der Aussage herausgearbeitet, sofern die Kundenstimme noch nicht das Kundenbedürfnis beinhaltet. Es folgt das Überführen von Kundenbedürfnissen zu Kundenanforderungen. Dies ist notwendig, um gleiche oder sehr ähnliche Bedürfnisse mehrerer Experten zusammenzufassen. Im letzten Schritt werden die Kundenanforderungen durch Critical to Quality (CTQ) Bäume näher spezifiziert, um sie in der Anforderungsliste und dem Bewertungsverfahren zu nutzen. Hierbei wurden neben den Primärdaten aus der Expertenbefragung auch Sekundärdaten aus den Prüf- und Inbetriebnahmevorschriften der Fahrerassistenzsysteme, dem Lastenheft des Fahrwerkstandes sowie der Präventionsabsicherung einer möglichen Inline Inbetriebnahme erhoben [RSc15]. Neben den so ermittelten Anforderungen für die Anforderungsliste wurde eine Bewertungsmethode entwickelt, die es ermöglicht das

Potenzial von Konzepten abzuschätzen. Dabei war das Ziel neben der Bewertung und dem Vergleich von Konzepten, verfahrenskritische Eigenschaften frühzeitig durch ein einfacheres Vorbewertungsverfahren aufzuzeigen und abschließend technisch umgesetzte Konzepte mit dem heutigen Serienverfahren detaillierter durch ein umfassenderes Bewertungsverfahren vergleichen zu können [DFS17].

Hierbei erfolgt die Vorbewertung durch Festanforderungen mittels eines Checklistenformats, in welchem wiederum die vier Hauptgruppen Sicherheits-, Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelanforderungen gebildet wurden und in dieser Reihenfolge betrachtet werden [Mül18]. In folgender Tabelle wird ein Überblick über die Festanforderungen gegeben.

Hauptgruppe der Anforderungen	
Sicherheitsanforderungen	Die Arbeitssicherheit hinsichtlich des Prozesses und der Betriebsmittel ist gegeben
	Die Vereinbarkeit des Prozesses mit den Datenschutzrichtlinien
Produktanforderungen	Die Diagnosefähigkeit ist gegeben
	Die Steuergeräte sind codiert und geflasht
	Das Fahrzeug befindet sich im fahrbereiten Zustand (Spiegel ausgeklappt, Kofferraum, Haube und Türen geschlossen, Spalte eingestellt)
Prozessanforderungen	Die Inbetriebnahme aller zukünftig verbauten Fahrerassistenzsysteme im Fahrzeug ist entsprechend der Vorgaben möglich
	Kalibrierfähigkeit bei variablen Fahrzeugvarianten
Betriebsmittelanforderungen	Die Versorgung mit Fremdspannung ist gegeben

Tabelle 2: Festanforderungen der Inline Inbetriebnahme [vgl. Now20]

Die zu erfüllenden Festanforderungen beginnen mit den Sicherheitsanforderungen, denn die Sicherheit der Werker darf durch die neuen Konzepte nicht beeinträchtigt

werden. Weiter darf das zu entwickelnde Konzept nicht die Datenschutzrichtlinien verletzen. Dieses wäre beispielsweise bei der Aufzeichnung und Speicherung von Werkerarbeiten durch Kamerasysteme verletzt und wird in der Regel so gelöst, dass für die Kalibrierung benötigte Aufnahmen nur für die Kalibrierung verwertet und anschließend wieder gelöscht werden [Eur95]. Die Produktanforderungen zielen auf die notwendigen Eigenschaften des Fahrzeugs für eine Kalibrierung ab. So wird die Diagnosefähigkeit gefordert, um beispielsweise Kalibrier Routinen der Sensoren anzustoßen. Ebenso müssen die benötigten Steuergeräte für die Inbetriebnahme codiert und geflasht sein und das Fahrzeug muss sich im fahrbereiten Zustand befinden. Der fahrbereite Zustand, also beispielsweise ausgeklappte Spiegel, geschlossene Haube, Klappen und Türen sowie eingestellte Spalte ist wichtig, um die Pose der Sensoren im Fahrbetrieb und die freie Sicht anderer Sensoren sicherzustellen. Als Nächstes folgt die Überprüfung der Prozessanforderungen. Dabei wird gefordert, alle zukünftig verbauten Fahrerassistenzsysteme entsprechend der Vorgaben aus den Lastenheften sowie Prüf- und Inbetriebnahmevorschriften in Betrieb nehmen zu können und das auch bei variablen Fahrzeugvarianten, also wenn ein Fahrzeug beispielsweise nicht alle Sensoren besitzt. Jedoch muss bei den Vorgaben aus Prüf- und Inbetriebnahmevorschriften (PIVs) sowie Lastenheften darauf geachtet werden, dass diese zielorientiert und frei formuliert sind. Denn viele der heutigen PIVs beschreiben und fordern das heutige Verfahren und verhindern damit gleichzeitig alle anderen Konzepte, die davon abweichen. Aus diesem Grund sollten bei einer geplanten Realisierung eines neuen Inbetriebnahmekonzepts die PIVs und Lastenhefte frühzeitig angepasst und bei einschränkenden Vorgaben die Zielvorgaben so verallgemeinert werden, dass sie die notwendigen Eigenschaften einfordern, jedoch die Konzeptentwicklung nicht unnötig einschränken und kein Verfahren explizit vorschreiben. Abschließend wird noch die Versorgung mit Fremdspannung als Betriebsmittelanforderung genannt. Dies ist insofern notwendig, weil durch die notwendige Leistung des Fahrzeugs für die Inbetriebnahme die Batterie entladen wird und im schlimmsten Fall zum Abbruch der Inbetriebnahme sowie zur Schädigung der Batterie durch Tiefentladung führen kann, sofern diese nicht geladen wird. Des Weiteren werden durch das Bewertungskonzept nach dem erfolgreichen Durchlaufen dieser Checkliste der Festanforderungen noch eine Überprüfung von Patenten, der aktuellen und geplanten Gesetzeslage, des internen Integra Automatisierungsstandards sowie der zu erwartenden Entwicklungsdauer empfohlen.

Die folgenden Anforderungen dienen der Feinbewertung nach erfolgreichem Durchlaufen der Checkliste und dem Vergleich von Inbetriebnahmekonzepten. Auch hier wurden der Übersichtlichkeit halber thematisch zusammenhängende Anforderungen zusammengefasst. So wurden zur dynamischen Kalibrierfähigkeit sowie zur Kalibrierumgebung folgende Anforderungen gefunden [Now20].

Hauptgruppe der Anforderungen	
Dynamische Kalibrierfähigkeit	Kalibrierfähigkeit bei einer relativen Bewegung zwischen Fahrzeug und Produktionsumgebung
	Kalibrierfähigkeit bei variabler Geschwindigkeit sowie Stillstand des Fahrzeugs
	Kalibrierfähigkeit bei Schwingungen, Erschütterungen und Vibrationen
Kalibrierumgebung	Kalibrierfähigkeit bei variablen Lichtverhältnissen der Produktionsumgebung
	Kalibrierfähigkeit bei Objekten in der Kalibrierumgebung
	Kalibrierfähigkeit bei angrenzender Werkertätigkeit
	Kalibrierfähigkeit bei angrenzendem Werksverkehr

Tabelle 3: Wunschanforderungen der Dynamik und Kalibrierumgebung [vgl. Now20]

Die erste Hauptgruppe der Wunschanforderungen ergibt sich aus der relativen Bewegung zwischen Fahrzeug und Kalibrierumgebung. So soll eine Kalibrierung während einer Bewegung des Fahrzeugs auf dem Montageband möglich sein und das auch bei variabler Geschwindigkeit, einem Stillstand der Fördertechnik und bei Schwingungen, Erschütterungen sowie Vibrationen des Fahrzeugs. Weiter gibt es auch Wunschanforderungen zu den Einflüssen durch die Kalibrierumgebung. Darunter fallen Einflüsse durch variable Lichtverhältnisse, Objekte in der Umgebung, die durch ihre Eigenschaften in der Vergangenheit die Kalibrierung beeinflusst haben, angrenzende Werkertätigkeiten sowie angrenzenden Werksverkehr [Now20].

Weitere Anforderungen an das Inbetriebnahmekonzept ergeben sich aus den Bereichen der Ergonomie sowie der Instandhaltung und sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Hauptgruppe der Anforderungen	
Ergonomie	Körperliche Tätigkeiten der Werker im Zusammenhang mit dem Inbetriebnahmekonzept sind ergonomisch
Instandhaltung	Möglichst einfache und kurze Überprüfung der Betriebsmittel
	Einfache Wartung und Instandhaltung
	Ersatzteilbeschaffung ist gegeben

Tabelle 4: Wunschanforderungen der Ergonomie und Instandhaltung [vgl. Now20]

Zunächst werden dabei möglichst ergonomische Tätigkeiten der Werker im Zusammenhang mit dem Inbetriebnahmekonzept gefordert. Außerdem soll eine möglichst einfache und kurze Überprüfung der Betriebsmittel möglich sein, denn die Betriebsmittel werden aktuell wöchentlich überprüft und währenddessen kann die Anlage nicht produzieren. Außerdem sollte die Wartung und Instandhaltung einfach sowie die Ersatzteilbeschaffung gegeben sein. Dies erscheint selbstverständlich, jedoch werden die Anlagen teilweise mehrere Jahrzehnte lang verwendet, weshalb Instandhaltungsaufgaben oft durchgeführt werden und eine einfache Instandhaltung wichtig ist [Now20].

Es folgt die letzte Bewertungskategorie der allgemeinen Inbetriebnahmeanforderungen, welche wiederum in die Hauptgruppen Funktionssicherheit und Prozessfähigkeit sowie Flexibilität und Skalierbarkeit unterteilt sind.

Hauptgruppe der Anforderungen	
Funktionssicherheit und Prozessfähigkeit	Die Messmittelfähigkeit für die Inline Kalibrierung und Inbetriebnahme ist sichergestellt
	Verfügbarkeit des Inbetriebnahmeverfahrens von mindestens 99,8%
	Einhaltung möglichst geringer Inbetriebnahmetoleranzen
	Rückfallebene im Fehlerfall (Nacharbeit)
Flexibilität und Skalierbarkeit	Kalibrierfähigkeit bei variabler zu produzierender Stückzahl
	Möglichst einfache Integrationsmöglichkeit und technische Umsetzbarkeit in eine bestehende Montagelinie
	Anpassungsfähigkeit der Inbetriebnahme für verschiedene Derivate
	Möglichst hohe Prozesszeiteinsparung
	Das Inbetriebnahmeverfahren besitzt einen möglichst hohen Automatisierungsgrad

Tabelle 5: Wunschanforderungen der Funktionssicherheit und Skalierbarkeit [Now20]

Zunächst wird die Messmittelfähigkeit für das Inbetriebnahmekonzept vorausgesetzt. Dies wird durch eine Messsystemanalyse (MSA) nachgewiesen und gibt an, ob die geforderten Genauigkeitsanforderungen durch das entwickelte Verfahren eingehalten werden. Wird ein Verfahren später für die Produktion in Erwägung gezogen, müssen außerdem eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) sowie weitere Prüfungen bestanden werden. Als nächste Anforderung folgt die Verfügbarkeit des Systems, die mit mindestens 99,8% als Richtwert angegeben wird und möglichst hoch sein soll. Ebenso sollen die Inbetriebnahmetoleranzen möglichst niedrig ausfallen, um eine möglichst präzise Inbetriebnahme realisieren zu können. Da jedoch ein fehlerbehaftetes Fahrzeug leider nicht auszuschließen ist, muss eine Rückfallebene im Nacharbeitsfall vorhanden sein. Hierfür werden ebenfalls Lösungskonzepte aufgezeigt [Now20].

Zur Hauptgruppe der Flexibilität und Skalierbarkeit wird zunächst die Kalibrierfähigkeit bei variabler Stückzahl gefordert. Je nach Auftragslage variiert die Anzahl an produzierten Fahrzeugen und damit auch die Bandgeschwindigkeit, welche einen direkten Einfluss auf eine Inline Kalibrierung hat. Als nächste Anforderung folgt eine möglichst einfache Integrationsmöglichkeit und technische Umsetzbarkeit in eine bestehende Montagelinie. Heutzutage werden kaum mehr neue Produktionshallen gebaut. Folglich gilt es ein Konzept zu entwickeln, das einen Ort in einer bestehenden Produktionslinie findet, an dem es möglichst einfach eingesetzt werden kann und bestmögliche Ergebnisse erzielt. Weil der Ort der Inbetriebnahme wichtige Umgebungsbedingungen festlegt, wird dieser in diesem Kapitel noch näher thematisiert. Weiter wird die Anpassungsfähigkeit der Inbetriebnahme für unterschiedliche Derivate gefordert, dies ist für sogenannte Full-Flex Anlagen notwendig, da darauf Derivate unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Sensorsysteme produziert werden sollen. Abschließend werden noch eine möglichst hohe Prozesszeiteinsparung sowie ein möglichst hoher Automatisierungsgrad gefordert. Hintergrund ist dabei eine Produktionszeit- und Kostenreduktion, da speziell der End-of-Line Bereich heute als Flaschenhals der Produktion gilt.

Bisher sind die genannten Anforderungen gleichermaßen gewichtet. Die Umsetzung eines neuen Produktionsverfahrens wird im Allgemeinen in einem Gremium aus den Bereichen Forschung und Entwicklung, Produktionsplanung sowie Qualitätsmanagement beschlossen. Um ein Verfahren entwickeln zu können, ohne das Entscheidungsgremium in den Entwicklungsprozess mit einzubeziehen und dennoch eine spätere Entscheidung hin zur Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen zu begünstigen, werden die bisher ermittelten Anforderungen mithilfe eines paarweisen Vergleichs der Hauptgruppen durch Vertreter der jeweiligen Fachbereiche gewichtet. Um anschließend die Einflüsse der Anforderungen auf die Hauptgruppen zu ermitteln, wurde ein modifiziertes House of Quality (HOQ) durchgeführt. Die folgenden Bewertungskriterien sind nach der Analyse am höchsten gewichtet worden [Now20].

Bewertungskriterium	Normierte technische Bedeutung
Möglichst hoher Automatisierungsgrad des Inbetriebnahmeverfahrens	7,65 %
Kalibrierfähigkeit bei Objekten in der Kalibrierumgebung	6,91 %
Möglichst einfache Integrationsmöglichkeit und technische Umsetzbarkeit in eine bestehende Montagelinie	6,63 %
Kalibrierfähigkeit bei variablen Lichtverhältnissen der Produktionsumgebung	6,5 %
Kalibrierfähigkeit bei variabel zu produzierender Stückzahl	6,43 %

Tabelle 6: 5 Anforderungen mit der höchsten normierten technischen Bedeutung [vgl. Now20]

Nachdem das Planen und Klären der Aufgabenstellung abgeschlossen ist, kann nun mit dem Konzipieren begonnen werden [Pah05]. Allerdings ist eine Konzepterarbeitung notwendig, da noch keine bekannte Lösung als Grundlage für die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase vorliegt.

Zunächst wird mit dem Ansatz der Idealität nach der idealen Inbetriebnahme gesucht. Daraus ergibt sich im ersten Schritt, dass eine ideale Kalibrierung nicht notwendig ist, weil die Fahrzeuge und deren Teile im Rahmen der geforderten Toleranzen gefertigt und montiert werden. Danach bedarf es keiner Kalibrierung, da die Ausrichtung der Sensorik zur Fahrwerkreferenz im Rahmen der geforderten Toleranzen bekannt ist. Diese Lösung wird jedoch schnell verworfen, weil sie nicht wirtschaftlich realisierbar ist sowie ein technisches Risiko darstellt. Daraufhin wird entsprechend der definierten Anforderungen nach einem Konzept gesucht, das möglichst viele der Anforderungen erfüllt. Hierbei wird unter anderem der Trend der Hardwarereduktion weitergedacht, der sich auch in der bisherigen Entwicklung der Inbetriebnahme in den letzten Jahren beobachten lässt. Die Fortführung des Ansatzes der Idealität stellt in diesem Fall die targetlose Kalibrierung, also eine Kalibrierung ohne Kalibriernormal dar. Auch bezogen auf die gesamte Inbetriebnahme soll das Ziel sein, Hardware weitestgehend zu reduzieren. Diese Forschungslücke ergibt sich aus den Nachteilen aktueller

Inline Referenzierverfahren

Inbetriebnahmeverfahren und wirft folgende Forschungsfrage auf. Wie kann die Inline Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen ohne zusätzliche Betriebsmittel und die Inline Inbetriebnahme mit weitestgehend reduziertem Betriebsmitteleinsatz erfolgen? Um ein Konzept als Antwort auf die Forschungsfrage für die Inline Inbetriebnahme entwickeln zu können, ist es zunächst wichtig, einen Ort dafür in der bestehenden Produktionslinie zu finden, der möglichst gute Rahmenbedingungen bereitstellt. Diese sind wichtig, um das Gesamtkonzept bestmöglich für den geplanten Einsatzort entwickeln zu können. Denn die technische Umsetzung des Konzepts soll anschließend in der Produktion getestet werden. Für die geplanten Tests wird im Produktionswerk Sindelfingen Halle 36 ausgewählt. Der gewählte Ort für die Inbetriebnahme hat mehrere Vorteile hinsichtlich dieser Arbeit, denn er stellt zum Zeitpunkt dieser Arbeit zunächst die älteste Produktionshalle von Mercedes-Benz weltweit dar und ist damit gut geeignet, um ein Verfahren zu entwickeln, das in eine bestehende Produktionshalle integriert werden soll. Außerdem werden am gewählten Ort der Inbetriebnahme vier unterschiedliche Modelle produziert, was verglichen mit anderen Produktionshallen am Standort Sindelfingen eine Mischproduktion mit mehr Variantenvielfalt sowie eine höhere produzierte Stückzahl darstellt. Die genannten Eigenschaften stellen gleichzeitig schwierigere Anforderungen an die Inbetriebnahme, so dass davon auszugehen ist, dass eine technische Umsetzung in anderen Produktionshallen einfacher sein dürfte.


















Inbetriebnahmeanforderungen	Spalt-einstellstation	Statischer IS-Test automatischer Teil	Statischer IS-Test manueller Teil
Sindelfingen Halle 36			
 Diagnose vorhanden			
 Spannungsversorgung			
 Spalte eingestellt			
 Wenig störende Werkerarbeiten			
 Geeignet für die Inline Inbetriebnahme			

Abbildung 28: Übersicht der Anforderungen und Stationen im End-of-Line Bereich [vgl. Dre19]

In Abbildung 28 ist eine Übersicht der Stationen im End of Line Bereich zwischen der Spaltmessstation und dem Motorerststart dargestellt, die gleichzeitig die Erfüllung von Anforderungen an eine Inline Inbetriebnahme beschreiben. So wird für die Inline Inbetriebnahme eine Diagnosemöglichkeit sowie Spannungsversorgung gefordert, außerdem müssen die Spalte bereits eingestellt sein und wenn möglich sollten keine oder wenig störende Werkerarbeiten in diesem Bereich durchgeführt werden. Diese Anforderungen sind im automatischen Teil des statischen Elektrik-/Elektronik-Tests (E/E-Test) gegeben. Lediglich ein Ablauf müsste sich an dieser Station ändern. Denn aktuell wird in dieser Station zunächst das Fahrzeug mit der Fremdspannungsversorgung kontaktiert, dafür die Haube geöffnet und offenstehen gelassen. Dies blockiert jedoch die Sicht der im Bereich des Rückspiegels angebrachten (Stereo)-Multi-Purpose Camera ((S)MPC) und ist in der folgenden Abbildung 29 dargestellt.



Abbildung 29: Automatischer Teil des statischen E/E-Tests in Halle 36

Somit müsste bei einer Inline Inbetriebnahme der SMPC an dieser Stelle der Ablauf geändert und die Leitung der Spannungsversorgung so verlegt werden, dass beim Auflegen der Haube auf das Haubenschloss sowie auf die Leitung der Spannungsversorgung nichts beschädigt wird. Zusätzlich ist auch das anschließende Trennen der Spannungsversorgung vom Fahrzeug vor dem Motorerststart

aufwändiger als bisher. Beide Änderungen sind jedoch mit einem geringen zeitlichen Mehraufwand möglich und wurden im Rahmen der technischen Umsetzung durchgeführt. Wichtig für die Entwicklung der Kalibrierverfahren ist ebenfalls die für die Sensoren sichtbare Umgebung, die sich aus dem Abstand der Fahrzeuge auf dem Band und der Lage zur Produktionsumgebung ergibt. Speziell für die Sensoren im Front- und Heckbereich der Fahrzeuge ist der Fahrzeugabstand von ca. 1 m je nach kombinierten Fahrzeugmodellen kritisch, da teilweise das gesamte Sichtfeld durch das benachbarte Fahrzeug verdeckt wird. Aus diesem Grund beginnt die Entwicklung der Kalibrierverfahren mit einer Analyse des Sichtfelds der jeweiligen Sensoren. Zusätzlich sollen bei der Konzipierung der Kalibrierverfahren die Stärken der Sensoren genutzt und die Schwächen vermieden werden. Dabei ist es sinnvoll, die Sensorkonfiguration aktiver Sensoren für die Kalibrierung zu optimieren. Denn die Sensoren sind im Straßenbetrieb meist auf hohe Wiederholraten bei verringerter Genauigkeit und weniger auf langsame Bandgeschwindigkeiten sowie hohe Genauigkeiten konfiguriert. Letztere Eigenschaften sind jedoch für die Inline Kalibrierung zu bevorzugen, weshalb die Optimierung der Sensorkonfiguration zu Beginn der Entwicklung berücksichtigt wird. Aufgrund der Geschwindigkeit der Produktionsbänder im E/E-Test wird die technische Umsetzung später nicht in diesem Bereich getestet. Weil der Bereich des E/E-Tests am gewählten Ort der Inbetriebnahme als einzige Halle weltweit mehrlinig parallelisiert ausgeführt ist und damit die Bandgeschwindigkeit im Vergleich zur Zielgeschwindigkeit von ca. 6 cm/s entsprechend halbiert ist, werden die Umfänge zur technischen Umsetzung im benachbarten Transportband durchgeführt. Das Transportband ist einlinig ausgeführt und bietet sonst sehr ähnliche Eigenschaften zum automatischen E/E-Test. Zusätzlich ergibt sich dadurch der Vorteil, dass es vergleichsweise einfach ist, Erprobungsträger auf dem Transportband einzuschleusen und dabei den Produktionsablauf nur minimal zu beeinflussen. Die Notwendigkeit des Einschleusens eines Erprobungsträger ergibt sich aus den Eigenschaften der Fahrzeugsensoren. Diese besitzen die Kalibrierlogik des Sensorlieferanten und können nicht mit einer selbst entwickelten Kalibrierlogik betrieben werden. Außerdem besteht keine Möglichkeit, die Rohdaten der Seriensensoren aufzuzeichnen, um damit im Nachgang die Kalibrierwerte bestimmen zu können. Aus diesem Grund werden für die folgende Entwicklung entweder Entwicklungsfahrzeuge mit speziellen Sensorschnittstellen oder zusätzliche Sensorik an Entwicklungsfahrzeugen angebracht, die einen Zugang zu den Rohdaten ermöglichen.

4.2 Planung des Inline Referenzverfahrens

Das Inline Referenziersystem stellt die Grundlage für die Inline Kalibrierverfahren dar und wird deshalb in dieser Reihenfolge vor den Kalibrierverfahren betrachtet. Es dient zur Bestimmung der Referenz für die Kalibrierung, die je nach dem zu kalibrierenden System die geometrische Fahrachse oder die Fahrwerksymmetrieachse darstellt. Somit gilt es, ein Verfahren zu finden, das am Ende eine Kalibrierung aller verbauten Systeme ermöglicht. Gleichzeitig werden für die Fahrwerkeinstellung ebenfalls alle Referenzen bestimmt. Da die Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse einfacher umsetzbar ist als die geometrische Fahrachse, wird die Fahrwerksymmetrieachse als Inline Referenz gewählt. Da zum Zeitpunkt der Inline Kalibrierung die Niveaualibrierung noch nicht durchgeführt wurde, wurde zu Beginn der Arbeit noch die Karosseriesymmetrieachse der Kotflügeloberkanten als Inline Referenz angenommen. Aus diesem Grund sind in manchen Abbildungen Teile der Räder und der Kotflügelkante dargestellt. Erst während der Entwicklungen wurde eine Möglichkeit gefunden, um die Einflüsse durch die fehlende Niveaualibrierung mit einem Beschleunigungssensor für das Inline Verfahren auszugleichen, die im Folgenden noch näher beschrieben wird. Die Messung der Fahrwerksymmetrieachse bedeutet Vorteile bezüglich der besseren Eignung als Messreferenz und toleranzbedingt durch den Herstellungs- und Montageprozess. Folglich geht es darum, ein Verfahren zu entwickeln, das jeweils die vier Radmittelpunkte aller produzierter Fahrzeuge in Bewegung auf dem Montageband automatisiert vermessen kann. Die geometrische Fahrachse kann anschließend mithilfe des Fahrachswinkels, der bei der Fahrwerkeinstellung bestimmt wird, aus der Fahrwerksymmetrieachse berechnet werden. Dabei ist es möglich, entsprechend des heutigen End-of-Line Bereichs den Fahrachswinkel nach der Inline Referenzierung und ebenfalls nach erfolgter Fahrwerkeinstellung zu bestimmen. Denn der bestimmte Fahrachswinkel wird mit dem Ergebnis der Inline Inbetriebnahme zur geometrischen Fahrachse verrechnet. Die mögliche nachträgliche Änderung der Radmittelpunktkoordinaten durch die Fahrwerkeinstellung wird als vernachlässigbar gering angenommen. Gründe dafür sind, dass die Einflüsse der Fahrwerkeinstellung aufgrund der geringen Winkeländerungen und dem kleinen Hebelarm des Radmittelpunkts zur Rotationsachse der Fahrwerkeinstellung als vernachlässigbar klein angenommen werden.

Messverfahren

Nachdem die Inline Referenz festgelegt wurde, wird als nächster Schritt das Messverfahren für das Inline Referenziersystem ausgewählt. Hierfür wird zunächst allgemein im Rahmen einer Technologierecherche nach möglichen optischen Messverfahren gesucht, um anschließend im Detail ein für den Anwendungszweck möglichst optimal geeignetes Messverfahren für die Anwendung der Inline Referenzierung auszuwählen.

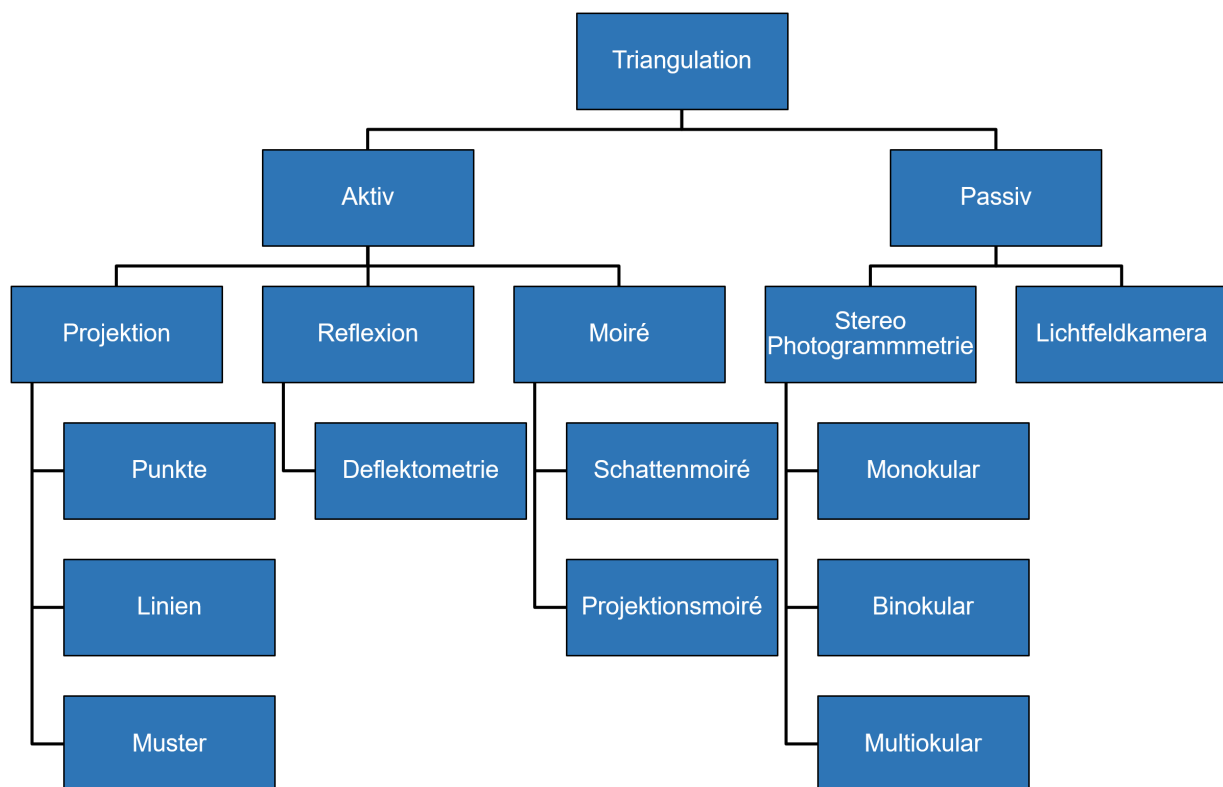


Abbildung 30: Optische Messverfahren der Triangulation [vgl. Bey12]

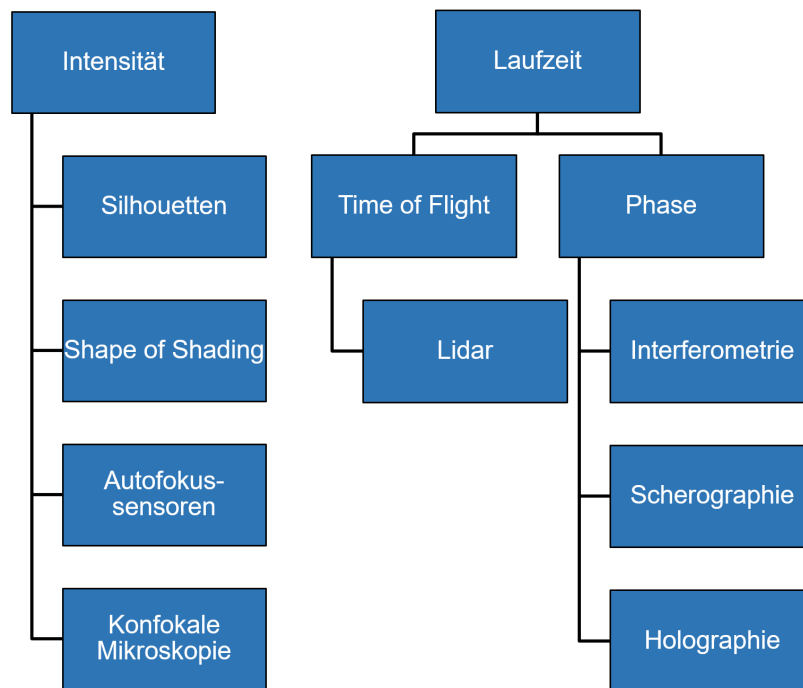


Abbildung 31: Optische Messverfahren der Intensität und der Laufzeit [vgl. Bey12]

In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind optische dreidimensionale Messverfahren dargestellt. Sie funktionieren entweder nach dem Prinzip der Triangulation, durch die Veränderung der Intensität oder über die Laufzeit, die wiederum entweder direkt aus der Laufzeit oder aus der Phasenverschiebung bestimmt werden kann [Bey12]. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird eine Vorauswahl der zu untersuchenden Verfahren anhand der Eigenschaften aus den definierten Anforderungen an das Gesamtsystem getroffen. Benötigte Eigenschaften sind die Fähigkeit zur Vermessung bewegter Objekte, eine Vermessung ohne Referenzmarken am Fahrzeug, eine Messgenauigkeit im Submillimeterbereich, möglichst niedrige Kosten und Komplexität, die Fähigkeit zur Vermessung unterschiedlicher Radgrößen und Abstände am Montageband sowie die Messfähigkeit bei den Umwelteinflüssen in der Montagelinie. Die Vorauswahl ergibt vier näher zu untersuchende Technologien. Diese sind das passive Stereokamera-, das Lichtschnitt- und Streifenprojektionsverfahren sowie das direkte Laufzeitverfahren.

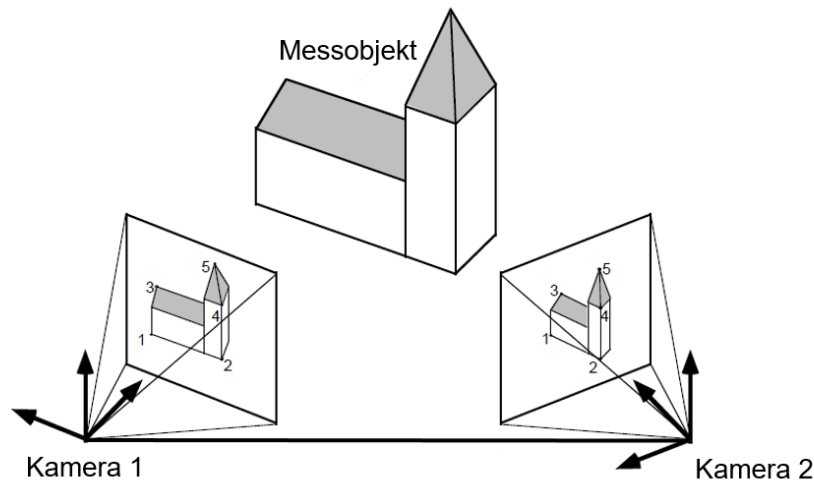


Abbildung 32: Messprinzip der Triangulation bei einer Stereokamera [vgl. Ham01]

Das Messprinzip der Triangulation nutzt die Bestimmung zweier Dreieckswinkel und die Kenntnis der eingeschlossenen Dreiecksseite zur eindeutigen Bestimmung eines Dreiecks zum Messobjekt. Dieses Prinzip nutzt die passive Stereokamera, bestehend aus zwei Kameras, die das Messobjekt aus zwei verschiedenen Perspektiven betrachtet und einzelne Messpunkte aus beiden Perspektiven erfasst. Dank kurzer Belichtungszeiten im Bereich von Millisekunden ist eine quasistatische Vermessung langsam bewegter Objekte wie Fahrzeuge auf dem Montageband mit diesem Verfahren möglich. Für dieses Verfahren werden im Anwendungsfall der Inline Referenzierung keine Referenzmarken benötigt, da das Fahrzeug ausreichend Struktur für eine Vermessung besitzt. Der heutige Stand der Technik im Bereich derameratechnologie ermöglicht zudem Messgenauigkeiten im Submillimeterbereich bei gleichzeitig im Vergleich zu anderen Messverfahren niedrigen Kosten. Die Komplexität eines passiven Stereokameraverfahrens ist jedoch hoch, da es zum Zeitpunkt dieser Arbeit kein entsprechendes Verfahren auf dem Markt gibt und damit das Messverfahren und die Software für diese Anwendung entwickelt werden muss. Dafür ist jedoch die Flexibilität des Systems hoch. So kann ein Stereokameraverfahren auf unterschiedliche Arbeitsabstände und Umwelteinflüsse optimiert werden, denn ein Stereokamerasystem ist wie andere Kamerasysteme empfindlich auf Umwelteinflüsse wie sich ändernde Lichtverhältnisse [Sch17].

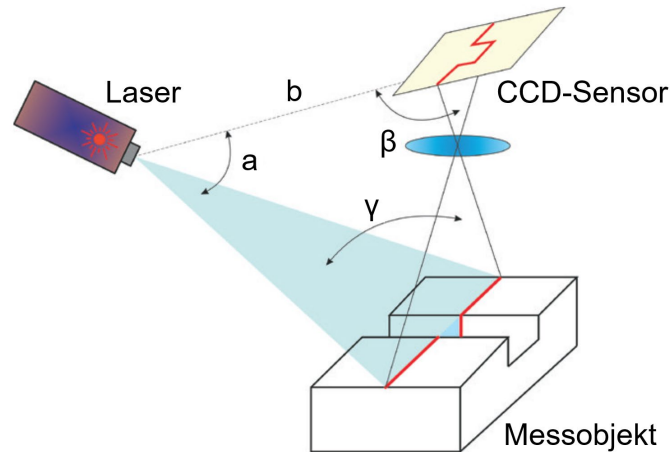


Abbildung 33: Messprinzip Lichtschnittverfahren [vgl. Sch17]

Das Lichtschnittverfahren nutzt ebenfalls das Prinzip der Triangulation, allerdings handelt es sich dabei um ein aktives Verfahren. Als aktive Komponente projiziert ein Laser eine Laserlichtlinie auf das Messobjekt. Diese Lichtlinie wird von einem Bildsensor mit bekannter Ausrichtung und Abstand zum Laser erfasst und aus dem Profil der erfassten Linie kann die Höhe der Projektionslinie auf dem Messobjekt rückgeschlossen werden. Dieses Verfahren wird bereits heute für die Fahrwerkvermessung eingesetzt, jedoch werden dort mehrere Laser eingesetzt, um eine dreidimensionale Messung zu ermöglichen. Alternativ gibt es bereits fertige 3D Messlösungen, die jedoch deutlich teurer und komplexer sind als das Stereokameraverfahren und Referenzmarken benötigen [Sch17].

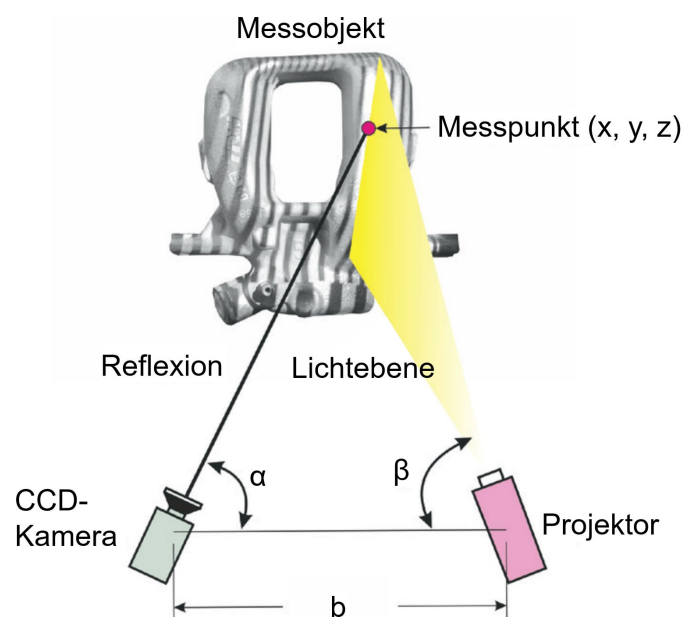


Abbildung 34: Messprinzip Streifenprojektionsverfahren [vgl. Sch17]

Die Funktionsweise des Streifenprojektionsverfahrens ist dem Lichtschnittverfahren sehr ähnlich und unterscheidet sich hauptsächlich in der Projektion auf das Messobjekt. Anders als die Laserlinie beim Lichtschnittverfahren wird durch eine Vielzahl von kodierten Streifenmustern eine schnellere und genauere Oberflächenvermessung erreicht. Nachteilig ist jedoch, dass das Verfahren nur bedingt für bewegte Messobjekte geeignet ist [Sch17].

Das direkte Laufzeitverfahren oder auch Lichtlaufzeitverfahren funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie der im Grundlagenkapitel vorgestellte Lidarsensor und nutzt die Laufzeit eines reflektierten Lichtimpulses oder die Reflexion eines phasenmodulierten Signals, um den Abstand eines Messpunktes zu bestimmen. Dies wird in der Regel mit vielen Messpunkten durchgeführt, jedoch ist es aktuell nur in seltenen Fällen möglich Objekte mit einer Tiefenauflösung im Submillimeterbereich zu detektieren. Dies hängt an der benötigten hohen Präzision der Laufzeitmessung, weil der Laufzeitunterschied eines Millimeters nur 6,7 Pikosekunden beträgt [Fra14].

Abschließend ist die Technologie des passiven Stereokameraverfahrens am besten für die Vermessung der Fahrwerksymmetrieachse in der Montagelinie geeignet. Denn diese Technologie ermöglicht hohe Messgenauigkeiten ohne Referenzmarken, eine Vermessung bewegter Objekte bei vergleichsweise niedrigen Kosten sowie einen geeigneten Arbeitsbereich für unterschiedliche Messobjekte. Lediglich die Empfindlichkeit auf Umwelteinflüsse, wie sich ändernde Lichtverhältnisse und die erhöhte Komplexität bei der Auswertung sind bei dieser Technologie nachteilig.

4.3 Entwurf des Referenzierverfahrens

Im Folgenden wird die Systemauslegung des Stereokamerasystems beschrieben. Um für den Zweck der Inline Referenzierung ein System auszulegen, ist zunächst die Hardware sowie insbesondere die Messgenauigkeit des Systems relevant, bevor auf die Software und deren Umsetzung näher eingegangen wird. Diese wird, wie in folgender Abbildung 35 für ein eindimensionales Fehlermodell gezeigt, zunächst mit einem eindimensionalen Fehlermodell für ein paralleles Stereokamerasystem und anschließend mit einem komplexeren Modell auf Basis der Fehlerfortpflanzung betrachtet. Ziel ist es, auf Basis der so gewonnenen Vorkenntnisse ein möglichst genaues System für die Inline Referenzierung auszulegen [Bey12].

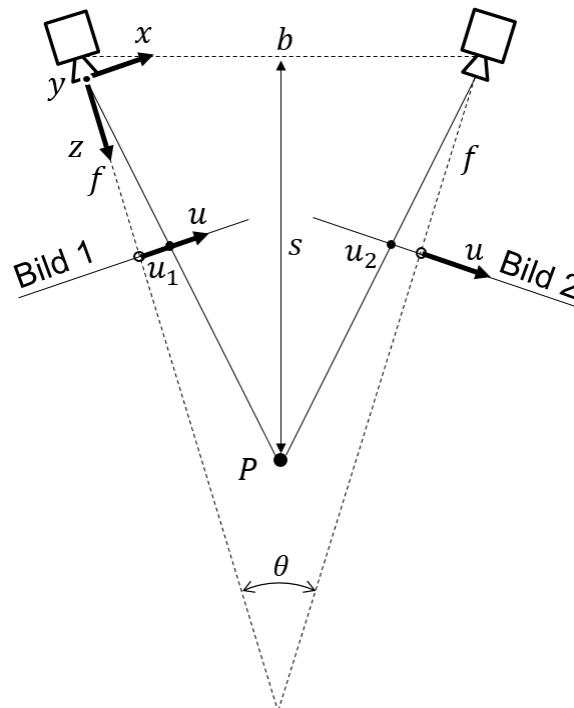


Abbildung 35: Paralleles Stereokamerasystem

Die Tiefenauflösung lässt sich durch folgende Gleichung berechnen.

$$\Delta z = \frac{z^2}{b * f} * \Delta s \quad \text{Gl. 7}$$

Um eine hohe Tiefenauflösung zu erreichen, muss entsprechend der geometrischen Auflösung der Basisabstand b sowie die Brennweite f groß und gleichzeitig der Abstand z zum Messobjekt gering gewählt werden. Der Disparitätsfehler Δd wird durch die Genauigkeit der Kamerakalibrierung und die Pixelgröße der Kamera beschrieben. Um eine hohe Tiefenauflösung zu erreichen, muss die Kamerakalibrierung so genau wie möglich durchgeführt und die Pixelgröße klein gewählt werden. Jedoch betrachtet dieses eindimensionale Fehlermodell unter anderem nicht den Umstand, dass ein zu großer Basisabstand die Messpunktbestimmung erschwert. Durch größere Basisabstände unterscheiden sich die beiden Bilder zunehmend, was eine eindeutige und genaue Zuordnung der Messpunkte in beiden Bildern erschwert. Außerdem beeinflussen sich der Objektabstand und die Brennweite gegenseitig und werden deshalb gemeinsam für den Verwendungszweck ausgelegt. Folglich ergibt sich die Genauigkeit des Systems aus der Gesamtheit der Systemparameter [MVT15]. Durch mathematische

Modellierung mit Fehlerfortpflanzung lässt sich der Einfluss der Kamera- und Systemparameter auf die Messgenauigkeit aller drei geometrischen Raumachsen beschreiben [Sch14].

$$\Lambda_F = J(\bar{x}) \Lambda_x J(\bar{x})^T \quad \text{Gl. 8}$$

Dabei beschreibt \bar{x} den Vektor der abhängigen Variablen, $J(\bar{x})$ die Jacobi-Determinante des Systems, Λ_x die Kovarianz Matrix der unabhängigen Variablen und Λ_F die Kovarianz Matrix der abhängigen Variablen. Dabei wird angenommen, dass die intrinsischen Parameter beider Kameras gleich sind. Die 3D-Weltkoordinate des Messpunktes hängt von der Brennweite f , dem Abstand zum Messpunkt d , dem Konvergenzwinkel der beiden Kameras θ sowie den Koordinaten des Messpunktes in beiden Bildern u_1, v_1, u_2, v_2 ab. Nichtlineare Effekte wie Linsenverzerrungen werden bei diesem Modell als vernachlässigbar klein angenommen und deshalb nicht betrachtet. Die Koordinaten des Messpunktes können wie folgt berechnet werden [Sch14].

$$x = \frac{du_1(u_2 - f \sin \theta - u_2 \cos \theta)}{(u_1 u_2 + f^2) \sin \theta + f(u_2 - u_1) \cos \theta} \quad \text{Gl. 9}$$

$$y = \frac{dv_2(u_1 + f \sin \theta - u_1 \cos \theta)}{(u_1 u_2 + f^2) \sin \theta + f(u_2 - u_1) \cos \theta} \quad \text{Gl. 10}$$

$$z = \frac{fd(u_2 - f \sin \theta - u_2 \cos \theta)}{(u_1 u_2 + f^2) \sin \theta + f(u_2 - u_1) \cos \theta} \quad \text{Gl. 11}$$

Mithilfe der Gleichungen Gl. 9 bis Gl. 11 kann die Jacobi Matrix des Systems sowie deren Determinante eindeutig bestimmt werden. Die Messunsicherheiten des Systems sind in der Kovarianz Matrix enthalten. Grundsätzlich sollten diese Variablen unabhängig voneinander sein. In der Realität sind jedoch Abhängigkeiten der Variablen aufgrund der Kalibrierverfahren für Stereokamerasysteme in manchen Fällen möglich. Abschließend kann daraus die Kovarianz Matrix Λ_F berechnet werden, welche die Varianzen aller drei Raumrichtungen enthält. Der Gesamtfehler ϵ kann dann wie folgt berechnet werden [Sch14].

$$\epsilon = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad \text{Gl. 12}$$

Auf Basis der beschriebenen Stereomodelle kann die Systemauslegung erfolgen. Die Hauptbestandteile des Stereokamerasystems sind die Kameras und Objektive. Entsprechend der Stereomodelle besitzen die Kameraparameter wie die Auflösung, Pixelgröße und Brennweite einen besonderen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Auswahl des Sensortyps

Im Bereich der Industriekameras werden hauptsächlich zwei Sensortechnologien unterschieden. Die CCD- (charge coupled device) und die CMOS-(complementary metal oxide semiconductor) Technologie. Beide Technologien basieren auf Silizium und funktionieren auf dem Prinzip der Quantendetektoren. Der Unterschied liegt im Auswerteverfahren darin, dass bei einem CCD Sensor außerhalb des Sensors in der Kameraelektronik und bei einem CMOS Sensor direkt im jeweiligen Pixel Licht in Spannung wandelt. Dadurch ist es mit CMOS Sensoren möglich, eine höhere Bildwiederholfrequenz bei niedrigeren Kosten und niedrigerer Leistung zu erzielen. Im Anwendungsfall des Inline Referenziersystems werden genau diese Eigenschaften bevorzugt, weshalb die Wahl auf einen CMOS Sensor fällt [Bey12].

Auswahl des Verschlusstyps

Der Verschluss oder auch Shutter einer Kamera legt fest, wie der Sensor belichtet wird. Dabei werden ebenfalls zwei Verschlusstypen unterschieden, der Global- und der Rolling Shutter. Beim Global Shutter wird der gesamte Sensor gleichzeitig und beim Rolling Shutter zeilenweise nacheinander belichtet. Letzterer ist für bewegte Messobjekte weniger gut geeignet, da sich das Messobjekt zwischen der ersten und letzten belichteten Zeile bewegt hat und somit ein verzerrtes Bild aufgenommen wird. Es ist zwar möglich, diesen Effekt durch die Kenntnis der Geschwindigkeit, der Belichtungszeit und der Verschlussfolge im Nachhinein zu reduzieren, dennoch ist ein Global Shutter für bewegte Messobjekte die bessere Wahl. Deshalb wird für das Inline Referenziersystem ein Global Shutter eingesetzt.

Auswahl der Kamera und des Objektivs

Aus beiden Modellen geht hervor, dass für eine hohe Genauigkeit des Systems eine geringe Pixelgröße benötigt wird. Im Bereich der Industriekameras sind zum Zeitpunkt der Arbeit Kameras mit einer Auflösung von bis zu 50 Megapixel erhältlich. Allerdings bedeutet eine hohe Auflösung auch gleichzeitig eine reduzierte Bildrate, größere Datenmengen und deshalb auch eine erhöhte Verarbeitungsdauer für die Auswertung. Aus diesem Grund werden als guter Kompromiss vier Kameras mit 5 Megapixel Auflösung, einem 2/3" Sensor mit einer Pixelgröße von 3,75 µm, einer Bildrate von 75 frames per second (fps) sowie einem vergleichsweise niedrigen Anschaffungspreis ausgewählt. Außerdem verfügen die Kameras neben der Möglichkeit eines Hardwaretriggers noch über eine Bussynchronisation, um ein möglichst gleichzeitiges Auslösen im Stereoverbund zu ermöglichen. Dies ist speziell bei bewegten Objekten für die Messgenauigkeit sehr wichtig und wird später noch näher thematisiert.

Nach der Auswahl der Kameras folgt die Auswahl der Objektive. In diesem Fall müssen die Objektive für die Auflösung und die unterstützte Sensorgröße ausgelegt sein. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erzielen, muss der Messabstand möglichst gering gewählt werden. Um dies bei einem gleichzeitig erhöhten Basisabstand der Kameras zu erreichen, ist eine niedrige Brennweite notwendig. Aus diesem Grund wird die Brennweite des gewählten Objektivs auf 8 mm festgelegt. Damit ist es möglich, einen Öffnungswinkel von 57,8° horizontal und 44,36° vertikal zu erreichen. Laut dem Hersteller verfügt es über nur sehr kleine Verzeichnungen sowie eine hohe Beleuchtungsstärke und ist deshalb für den Anwendungsfall gut geeignet.

Auswahl der Bildverarbeitungssoftware

Neben der Auswahl der Hardware ist auch die Auswahl der Software für die Bildverarbeitung wichtig für das Gesamtsystem. Bereits heute finden viele Systeme maschineller Bildverarbeitung Einsatz in den unterschiedlichsten Produktionsprozessen. Als Anforderungen an die Bildverarbeitungssoftware werden zunächst die Konnektivität zu den Kameras und deren Konfiguration, Kalibrierverfahren für die Stereokamerasysteme und schließlich eine Entwicklungsumgebung, die dreidimensionale Rekonstruktion eines Messobjekts sowie Bildverarbeitungsprozesse enthält, gefordert. Auf dem Gebiet der Bildverarbeitungssoftware lassen sich zwei Klassen unterscheiden. Freiverfügbare Softwarebibliotheken, wie OpenCV sind weit verbreitet und bieten

Entwicklungsumgebungen in den Programmiersprachen Python, Java oder auch anderen Programmiersprachen. OpenCV wurde als eine einfach benutzbare Infrastruktur entwickelt, um auch anspruchsvolle Aufgaben der Bildverarbeitung schnell und einfach lösen zu können. Es stehen viele vorgefertigte Funktionen aus unterschiedlichen Bereichen bereit, die für eine eigene Entwicklung genutzt werden können. Die Softwarebibliothek kann für kommerzielle Zwecke verwendet werden und entwickelte Programme müssen nicht veröffentlicht werden. In der zweiten Klasse werden kommerzielle Softwarebibliotheken wie beispielsweise HALCON von MVTec unterschieden. Ebenso wie OpenCV bietet HALCON viele Funktionen, speziell im Bereich der 3D Vision. Aufgrund der Vorteile im Bereich der dreidimensionalen Bildverarbeitung, der Bewährung von HALCON in anderen Anwendungsfällen bei Mercedes-Benz und weil Lizenzen verfügbar sind, wurde HALCON als Entwicklungsumgebung für das Inline Referenziersystem gewählt [MVT15].

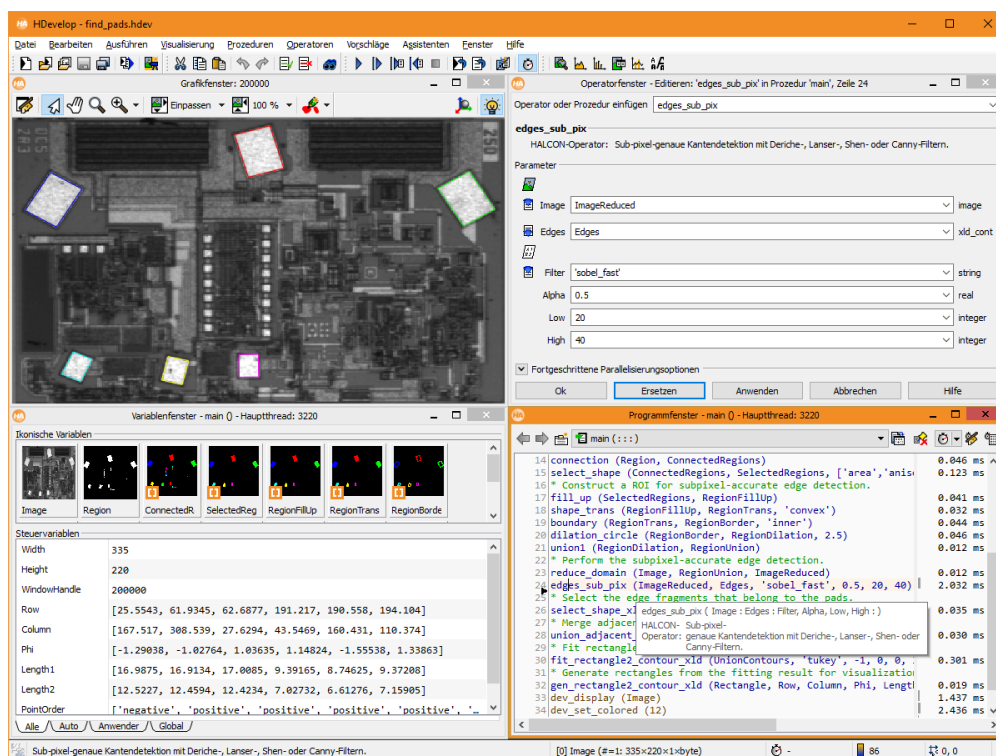


Abbildung 36: Entwicklungsumgebung HALCON [MVT20]

Kamerakalibrierung des Stereokamerasystems

Damit die Inline Referenzierung funktionieren kann, müssen die Stereokamerasysteme kalibriert werden.

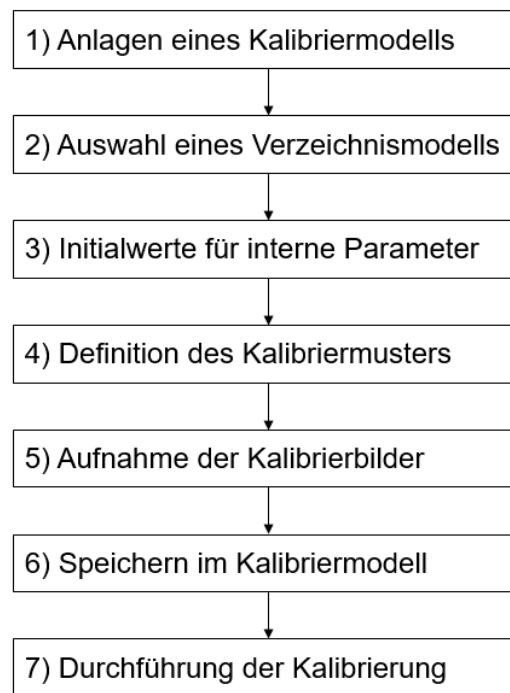


Abbildung 37: Ablauf der Kalibrierung in HALCON

In HALCON wird dafür zunächst ein Kalibriermodell angelegt. Das Kalibriermodell beinhaltet neben Systeminformationen wie der Anzahl verwendeter Kameras auch Informationen über das Kalibrierverfahren wie die Anzahl verwendeter Kalibriertafeln. Anschließend wird das Verzeichnismodell anhand der verwendeten Kameras ausgewählt. Für Kameras mit dem Verschlusstyp Global Shutter kann das Divisionsmodell und das Polynommodell verwendet werden. Beim Divisionsmodell wird die radiale Verzeichnung ausschließlich über einen Parameter modelliert, wohingegen das Polynommodell fünf Parameter nutzt, um sowohl die radiale als auch die tangentielle Verzeichnung zu modellieren. Zwar ist eine Kalibrierung nach dem Divisionsmodell einfacher, effizienter und robuster, jedoch ist das Polynommodell genauer, da es Terme höherer Ordnung verwendet, um die Verzeichnung zu korrigieren. Aus Gründen der Genauigkeit wird deshalb das Polynommodell für die Referenzierung verwendet. Im dritten Schritt werden die intrinsischen Kameraparameter wie die Brennweite des Objektivs, der Verzeichniskoeffizient κ , der horizontale und vertikale Abstand zweier Pixel, die Bildhauptpunkte sowie die Breite und Höhe beider Kameras festgelegt. Um eine Kalibrierung durchführen zu können, muss der verwendete Kalibrierkörper definiert sein. Hierfür wurden zwei vorhandene planare Standardkalibrierkörper von HALCON verwendet. Der verwendete Kalibrierkörper ist in folgender Abbildung 38 dargestellt.

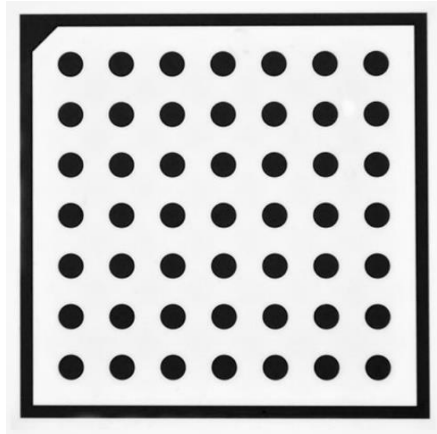


Abbildung 38: HALCON Kalibriertafel [MVT201]

Abschließend folgt die Aufnahme der Kalibrierreferenz. Hierfür werden die Kalibrierplatten aus verschiedenen Positionen heraus vollständig aufgenommen. Es werden zur Sicherstellung höherer Genauigkeiten mehrere Aufnahmen im Abstand des zukünftigen Messabstandes über den Bildbereich verteilt und in unterschiedlichen Posen des Kalibriertargets aufgenommen. Außerdem werden dafür Blende und Fokus der Kameras auf den späteren Arbeitsabstand und die Lichtbedingungen angepasst. Eine spätere Änderung am System bedingt eine erneute Kalibrierung. Wurden die Aufnahmen für die Kalibrierung durchgeführt, können die Kalibrierwerte berechnet werden. Zu den Kalibrierwerten wird ebenfalls die Wurzel des mittleren quadratischen Rückprojektionsfehlers (RMS-Fehler) berechnet. Dieser Wert sollte möglichst gering und im Bereich kleiner 1 Pixel liegen, um später Messungen im Subpixelbereich zu ermöglichen. Zusätzlich wird auch der Epipolarfehler berechnet. Dieser beschreibt die Genauigkeit der Stereorektifizierung. Ausschlaggebend für eine korrekte Kalibrierung sind eine fehlerfreie Kalibrierreferenz, ein geeignetes Kalibriermodell, eine gute Bildqualität und eine ausreichende Anzahl an Kalibrierbildern.

Auswahl der Messmethode

Um die Radmittelpunkte für die Berechnung der Fahrwerksymmetrieachse bestimmen zu können, werden zwei mögliche Messmethoden untersucht. Die erste Messmethode basiert auf einer Generierung von Tiefenbildern sowie einer Rekonstruktion der zu vermessenden Oberflächen. Die zweite Messmethode basiert auf einer Kantendetektion und einer punktwisen dreidimensionalen Rekonstruktion auf Basis der detektierten Kanten. Um beide Methoden miteinander vergleichen und andere

Einflüsse reduzieren zu können, wurde mit dem gleichen Aufbau eine Messung im Labor nachgestellt und die Aufnahmen anschließend mit den unterschiedlichen Messmethoden ausgewertet.

Für die Methode mit den Disparitätsbildern werden die beiden Bilder zunächst rektifiziert. Dabei werden die korrespondierenden Epipolarlinien beider Bilder kollinear und parallel zur X-Achse des Bildkoordinatensystems transformiert.

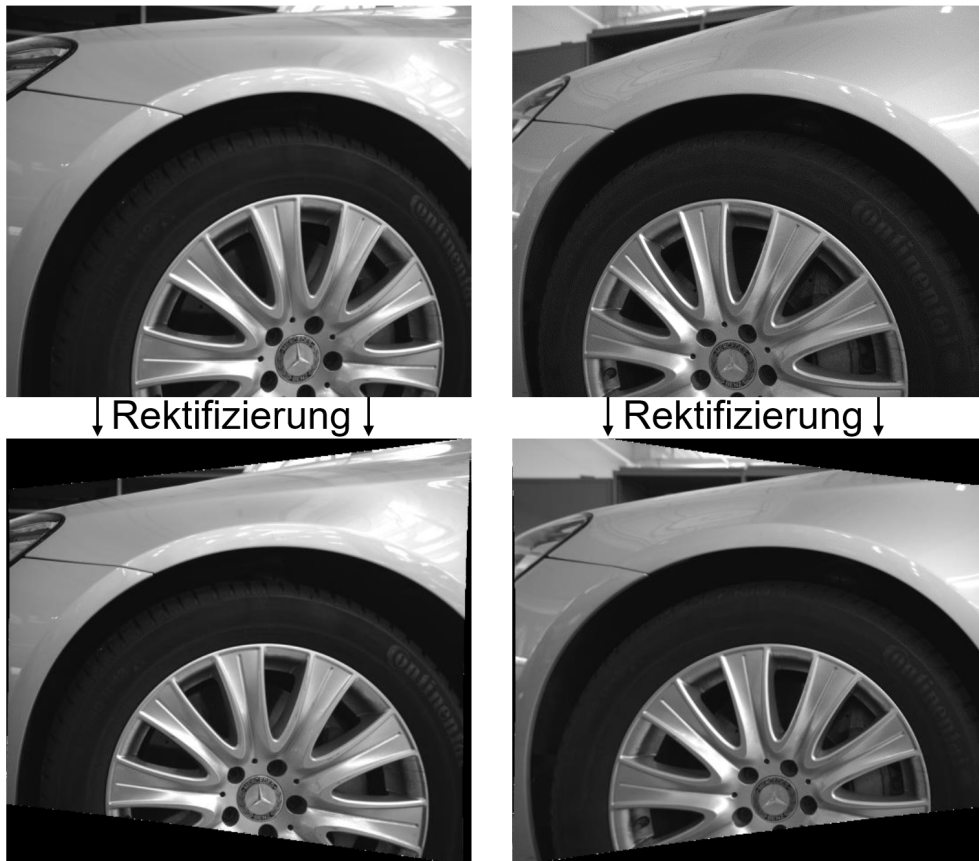


Abbildung 39: Rektifizierung der Bilder [vgl. Sie20]

Nach der Rektifizierung werden die 3D-Daten generiert. Dies kann wiederum durch unterschiedliche Verfahren geschehen, wobei wiederum zwei Sub-Methoden näher betrachtet werden, ein Verfahren auf Basis von Disparitätsbildern und ein Verfahren auf der Basis einer Oberflächenrekonstruktion mit einem CAD-Matching. Da aufgrund der reflektierenden Oberfläche nur wenig Texturen gefunden werden können, wird ebenfalls versucht durch die Projektion eines zufälligen Musters auf die Messfläche mithilfe eines Beamers sowie einem Laser, die Textur zu verbessern. Der Beamer liefert dabei die besten Ergebnisse, wohingegen der Laser nur eine minimale Verbesserung erzielt.

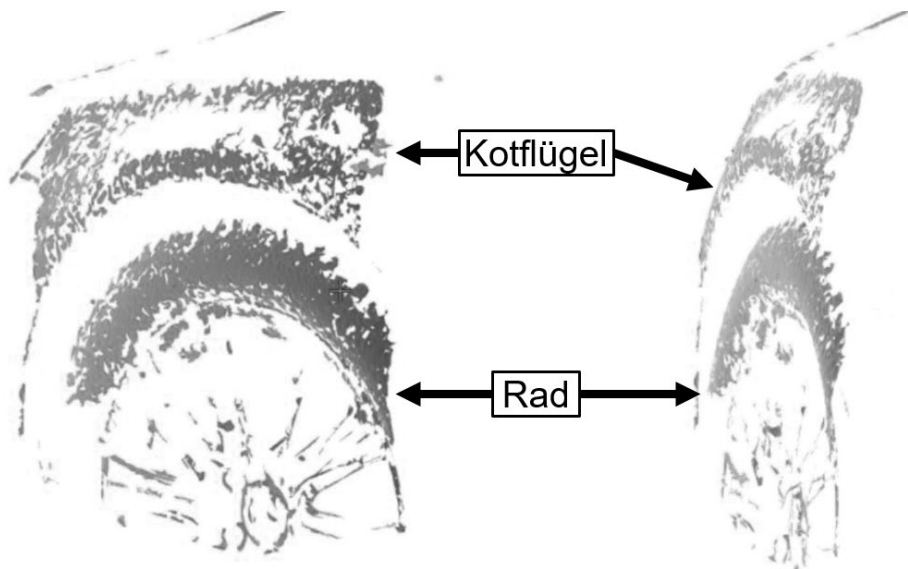


Abbildung 40: 3D-Modell von Rad und Kotflügel mit Beamer Projektion [Sie20]

Abschließend kann die Disparitätsmethode mithilfe des zufälligen Musters des Beamers eine nutzbare Punktwolke bestimmen, die anschließend über ein CAD-Modell des Fahrzeugs mit beispielsweise einem Best-Fit Ansatz angenähert und daran der gesuchte Radmittelpunkt bestimmt werden kann. Praktisch ist diese Methode sehr zeit- und rechenintensiv, sowie auf einer Linie mit unterschiedlichen Derivaten und Variantenvielfalt durch viele Rad-Reifen-Kombinationen mit einem hohen Betreuungsaufwand verbunden, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.

Die kantenbasierte Methode unterscheidet sich insofern von der Disparitätsmethode, dass hierbei keine Flächen dreidimensional rekonstruiert werden, sondern nur punktweise Kanten, die zuvor im Rahmen einer Merkmalsextraktion bestimmt wurden. Erste Versuche mit der kantenbasierten Methode zeigen bereits erfolgsversprechende Ergebnisse, weshalb die Methode im Folgenden weiterentwickelt wird.

Nachdem die Konzeptphase der Inline Referenzierung abgeschlossen wurde, kann nun mit dem Entwurf und der Ausarbeitung des Systems fortgefahren werden. Begonnen wird hierbei mit dem Trigger, der Bildaufnahme und den Kamera-parametern. Es folgt die Prozesskette chronologisch mit der Radmittelpunktbestimmung bis zur abschließenden Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse bzw. der geometrischen Fahrachse. Außerdem folgen einige Sonderfälle und sonstige Betrachtungen sowie weiterführende Ideen am Ende des Kapitels.

Trigger

Für die Aufnahme bewegter Objekte ist der Trigger eines Stereokamerasystems einerseits von großer Bedeutung für die Funktion und andererseits für die Messgenauigkeit. Stimmen die Auslösezeitpunkte beider Kameras nicht überein, so bewegt sich das Messobjekt zwischen beiden Aufnahmen. Möchte man anschließend ein und denselben Messpunkt in beiden Aufnahmen ermitteln, so entsteht ein Fehler in mehrere Raumrichtungen abhängig von der Zeitdifferenz und der Bewegung des Objekts. Zwar ist es möglich, diese Ungenauigkeit durch die Messung der Zeitdifferenz sowie der Geschwindigkeit des Messobjekts zu reduzieren bzw. auch theoretisch vollständig zu korrigieren, praktisch ist dies jedoch in der Realität hauptsächlich durch Messungenauigkeiten nicht vollständig möglich. Deshalb wird für das Inline Referenziersystem das Triggerproblem auf eine andere Art gelöst. Grundsätzlich können für die Lösung des Triggerproblems zwei unterschiedliche Gruppen an Verfahren zusammengefasst werden, eine softwarebasierte und eine hardwarebasierte Gruppe. Ohne die Verwendung von Hardware für den Trigger werden die Bildeinzüge der Kameras per Softwaretrigger angesteuert. Dabei wird über eine Funktion im Programmablauf der Bildeinzug angestoßen. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kameras verfügen teilweise über eine Bussynchronisation. Damit ist es möglich, mehrere Kameras durch das Isochronous Timestamp Packet (ITP) des USB Bus zu synchronisieren. Es funktioniert, indem Zeitstempel vom Host PC mit einem Single-Host Controller zu den Kameras übermittelt werden. Zu beachten ist, dass zwingend eine USB Karte mit einem Single-Host Controller verwendet werden muss, da sonst der Zeitstempel nicht synchronisiert werden kann. Außerdem muss die Bandbreite des USB Bus beachtet werden. Denn wird der Bus überlastet, funktioniert die Bussynchronisation ebenfalls nicht. Mit der Bussynchronisation ist es zwar theoretisch möglich, Zeitdifferenzen von ca. 200 bis 300 Nanosekunden zu erreichen, in der Realität wurden jedoch vermutlich aufgrund der USB Karte des verwendeten Laptops deutlich längere Zeitdifferenzen von bis zu mehreren Millisekunden erreicht [Tos20]. Bessere Ergebnisse lassen sich durch einen Hardwaretrigger erzielen. Dabei wird ein Impuls über eine konduktive Verbindung der Kameras als Trigger für den Auslösezeitpunkt verwendet.

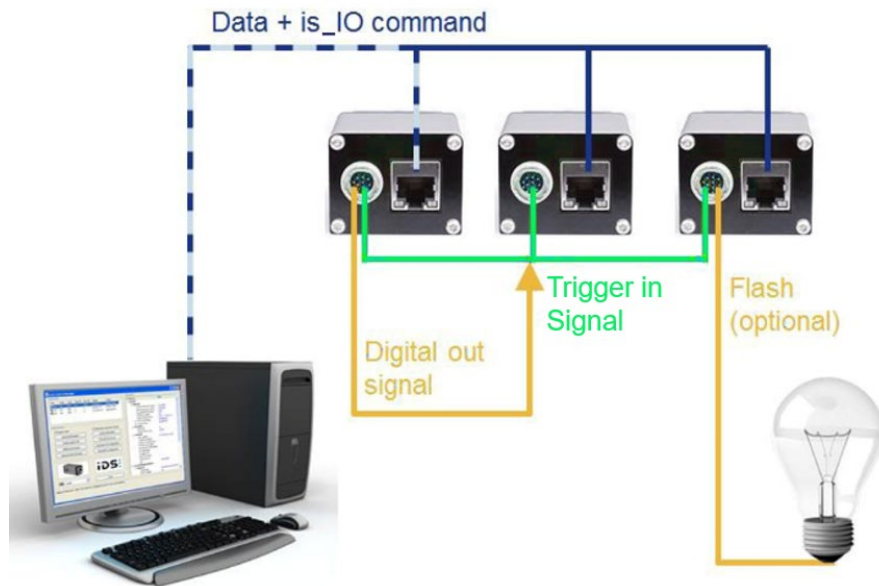


Abbildung 41: Master/Slave-Hardwaretrigger [vgl. MVT16]

Der Auslöseimpuls an eine Kamera kann vom Computer oder einer weiteren Einheit im System wie beispielsweise einer Lichtschranke gesendet werden. Der erste Fall, also die Impulsauslösung durch eine Kamera funktioniert wie in Abbildung 41 dargestellt nach dem Master/Slave-Prinzip. Die Master-Kamera erhält ein Signal vom Computer und sendet daraufhin beispielsweise über den Blitzausgang ein Signal zum Auslösen des Bildeinzugs an die anderen Kameras. Sowohl die Slave-Kameras als auch die Master-Kamera bekommen dann diesen nahezu zeitgleichen Impuls und lösen danach den Bildeinzug aus. Diese Schaltung wird für das Inline Referenziersystem verwendet, weil damit die geringsten Zeitdifferenzen und damit auch die geringsten Messfehler durch das Triggerproblem auftreten. Dafür werden die zwei Kameras eines Stereokamerasystems nach dem Prinzip einer Open Emitter Schaltung verbunden. Grund dafür ist, dass mit dieser Schaltung die kürzeste Verzögerung des Bildeinzugs möglich ist, die laut dem Kamerahersteller 106 Nanosekunden beträgt [IDS21]. Bei den zweiten Stereokameras ist durch die verringerte Anzahl an Pins der Verbindungsleitung nur eine Schaltungsvariante möglich. Hierbei wird der GPIO-Pin der Master-Kamera mit den Triggerpins der anderen Kameras verbunden. In beiden Fällen wird durch die Hardwaretrigger eine Verzögerung des Bildeinzugs von kleiner einer Millisekunde erreicht. Durch diese geringe Verzögerung ist es möglich, die geforderten Genauigkeiten des Inline Referenziersystems einzuhalten. Nachdem bisher nur eine geforderte Gesamtteranz

als Inbetriebnahmeanforderung bekannt ist und alle anderen Einzeltoleranzen der Toleranzkette noch unbekannt sind, wird die geforderte Genauigkeit des heutigen Referenziersystems von einem Millimeter auf dem Fahrwerkstand als Zielgröße herangezogen [Her19].

Kameraparameter und Bildaufnahme

Für die spätere Bildaufnahme und -auswertung müssen einige Variablen definiert sowie interne Kameraparameter und Kalibrierdaten geladen werden. Hierbei werden Variablen wie Belichtungszeit und Kontrast geladen, die je nach Umgebungsbedingungen angepasst werden können. Zusätzlich wird zu Entwicklungszwecken aus einer Textdatei eine eindeutige Nummer zur Bildauswertung geladen, um eine spätere Zuordnung und Nachverfolgung zu vereinfachen. Die Bildaufnahme selbst soll möglichst einfach und ohne zusätzliche Hardware für die Bestimmung des Auslösezeitpunkts auskommen. Dafür wird folgende Schleife solange durchlaufen, bis ein Rad erkannt wird.

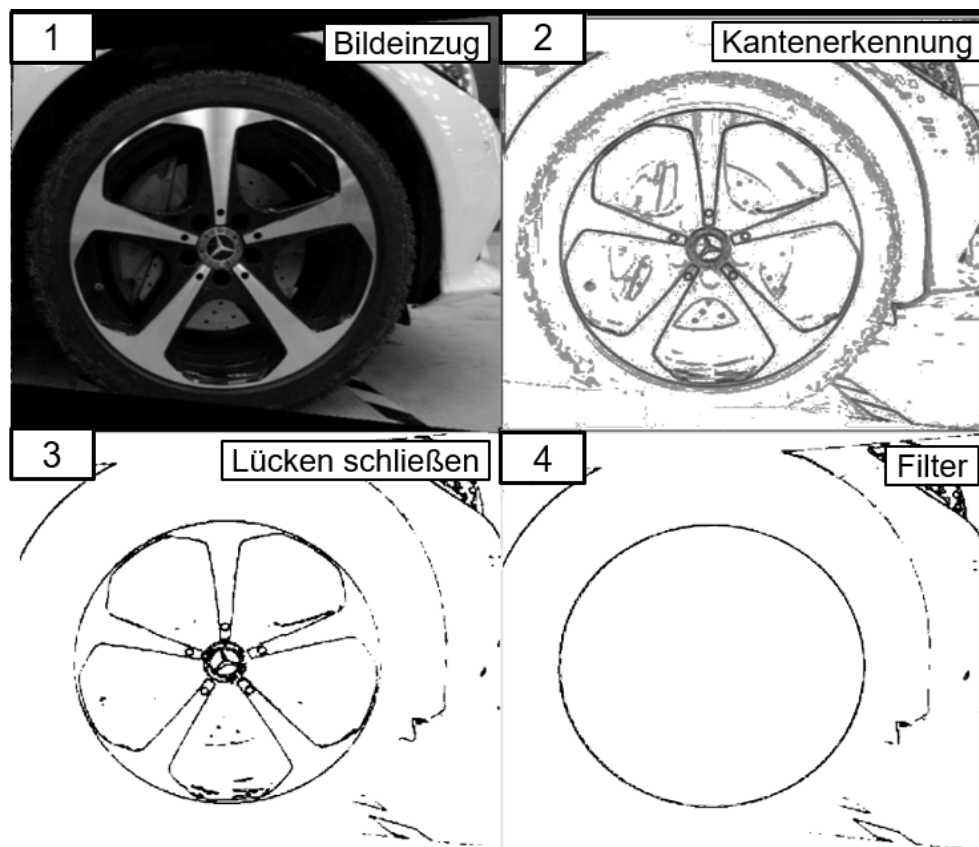


Abbildung 42: Verfahren zur Detektion des Rades [vgl. Paw21]

Wie in Abbildung 42 gezeigt, werden die Kameras in einen Triggerzustand versetzt, um im Fall eines erkannten Rades wie in Bildteil 1 möglichst gleichzeitig den Bildeinzug antriggern zu können. Das gesamte Referenzverfahren wird am statischen Laborbeispiel für eine Aufnahme von Abbildung 42 gezeigt. Im Fall eines erkannten Rades wird zyklisch der Bildeinzug angestoßen, mit dem Trigger ausgeführt und das Bild direkt ausgewertet. Die Auswertung funktioniert auf Basis eines Sobel-Operators. Dieses Verfahrens zur Kantenerkennung nutzt die Eigenschaft der Helligkeitsänderungen von Kanten, um diese wie in Bildteil 2 gezeigt, zu erkennen [Ric11]. Unterbrochene zusammengehörige Radkanten werden, wie in Bildteil 3 gezeigt, geschlossen und, wie in Bildteil 4 gezeigt, nach einem Kreis entsprechend der möglichen Radgrößen, der Rundheit und der Abstände gefiltert. Der Filter ist wichtig, da beispielsweise Stoßfänger, Kotflügel und Türkanten auch Kanten in Form von Kreisteilen enthalten. Diese Schleife wird von beiden Stereokameras durchlaufen und der nächste Schritt der Radmittelpunktbestimmung wird erst angestoßen, sobald von beiden Kameras eines Stereokamerasystems ein Rad erkannt wird. Dafür wird zunächst im Takt von 0,2 Sekunden eine definierte Anzahl an Bildeinzügen angefordert. Diese Taktfrequenz wurde nach der Bandgeschwindigkeit, der verfügbaren Speichergeschwindigkeit und der Busauslastung festgelegt und sollte für jeden Anwendungsfall zunächst ähnlich der Belichtungsparameter bestimmt werden.

Radmittelpunktbestimmung

Sind die Bildeinzüge erfolgt, werden die Bilder direkt ausgewertet. Im ersten Auswertungsschritt wird die Rektifizierung der Bilder vorgenommen. Anschließend wird ähnlich dem Verfahren zur Raddetektion zunächst ein schnelles Verfahren zur Bestimmung der Radkontur durchlaufen. Dabei werden auch die aufgenommenen Bilder nach dem Trigger das erste Mal ausgewertet. Falls mehrere Kanten als mögliche Radkanten erkannt werden, muss die richtige Radkante ausgewählt werden. Dafür wird zunächst eine Kreisregion über alle Punkte einer gefundenen Kante gelegt, um eine Weiterverarbeitung zu vereinfachen. Dies ist in folgender Abbildung 43 im ersten Abschnitt dargestellt.

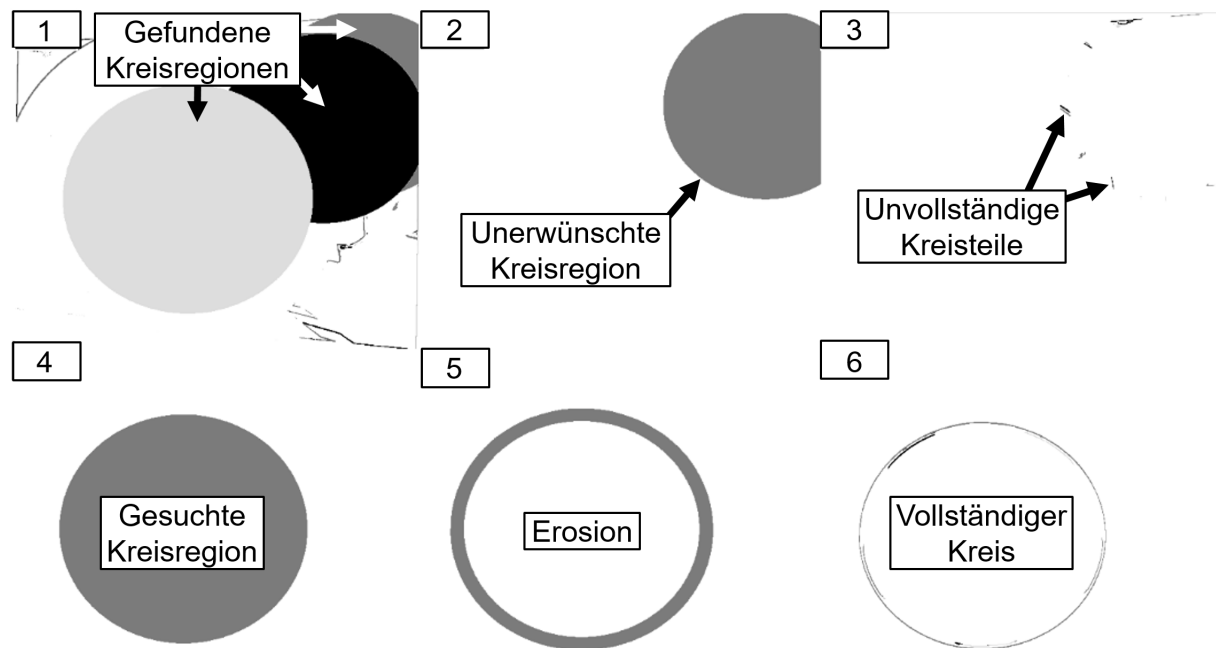


Abbildung 43: Verfahren zur Bestimmung der Radkante [vgl. Paw21]

Anschließend werden die gefundenen Kreisregionen einzeln detailliert betrachtet wie in den Bildabschnitten 2 bis 6 gezeigt wird. Dafür wird eine Dilatation und eine Erosion durchgeführt. Beides sind Begriffe aus der Bildmorphologie und beschreiben vereinfacht die Ausdehnung und die Reduktion der Teilmenge eines Bildes. Im hier behandelten Fall, geht es darum, aus dem Kreis einen Ring zu erzeugen. Anschließend wird nach vollständigen Kreisen gefiltert, die innerhalb des Rings liegen. Eine unerwünschte Kreisregion des Stoßfängers wird in Abschnitt 2 von Abbildung 43 betrachtet. Nach der Dilatation und Erosion im darauffolgenden Abschnitt 3 ist ersichtlich, dass kein vollständiger Kreis vorliegt, weshalb diese Region verworfen wird. Die Abschnitte 4 bis 6 zeigen hingegen die gesuchte Radkante, die eine vollständige kreisförmige bzw. leicht ellipsenförmige Kante zeigt. Die Ellipsenform ist aus perspektivischen Gründen möglich und variiert je nach Schrägstellung des Rades relativ zum Stereokamerasystem trotz erfolgter Rektifizierung. Ist die gewünschte Ringregion gefunden, wird der Radmittelpunkt bestimmt.



Abbildung 44: Radmittelpunktbestimmung [Paw21]

Dafür wird ein Subpixel-Kantenoperator verwendet, der mit dem Verfahren nach Canny die Kante sucht. Dabei werden die horizontalen und vertikalen Gradienten sowie die Richtung und Größe jedes Pixels bestimmt. Die berechneten Maxima werden zur Auswahl der Pixel verwendet und Kanten mit unterschiedlichen Gradienten verbunden. Das Verbinden der Kanten ist wichtig, weil die Reflexionen der Hallenbeleuchtung der in der Regel glänzend reflektierenden Kantenoberfläche unterschiedliche Gradienten erzeugen und Räder mit abgesetzten Kanten erkannt werden müssen. Dieses Verfahren ist sehr empfindlich auf veränderte Lichtverhältnisse und ist der Hauptgrund für die benötigten Kontrast- und Belichtungsparameter. Wurde die Radkante gefunden, so wird im Folgenden für jedes Kamerabild eine Ellipse an die gefundene Kante gefittet. Sind beide Ellipsen bekannt, wird daraus jeweils der Mittelpunkt bestimmt und nach dem Prinzip der Triangulation sowie mit den Kalibrierwerten des Stereokamerasystems die dreidimensionale Koordinate des Radmittelpunkts bestimmt [Ric11].

Entwicklung des Messverfahrens

Entsprechend der Anforderungen an ein Inline Referenziersystem ist ein möglichst einfach in Betrieb zu nehmendes und wartungsfreundliches System vorteilhaft für den Einsatz in der Produktionslinie. Ausgehend von den Nachteilen heutiger Messverfahren durch beispielsweise initiale Prozesse zum Einmessen der Messsysteme zueinander und regelmäßige Kalibrierprozesse zur Gewährleistung der Messfähigkeit, wurde das Ziel definiert, ein neuartiges Messverfahren zu entwickeln, das es ermöglicht auf diese Arbeiten zu verzichten und einfach in der Handhabung ist. Für die Entwicklung des Messverfahrens wird zunächst auf die Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse eingegangen, bevor auf das eigentliche Messverfahren und

die Position der Stereokamerasysteme eingegangen wird. Ausgangspunkt für die Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse ist die Bestimmung der Radmittelpunkte. Dafür muss die relative Lage der beiden Stereokamerasysteme zueinander bekannt sein. Aus Gründen der vereinfachten Darstellung wird zunächst die Bestimmung des Gierwinkels beschrieben, weshalb das Verfahren in der XY-Ebene gerechnet und dargestellt wird. Die Bestimmung des Roll- und Nickwinkels wird darauffolgend beschrieben.

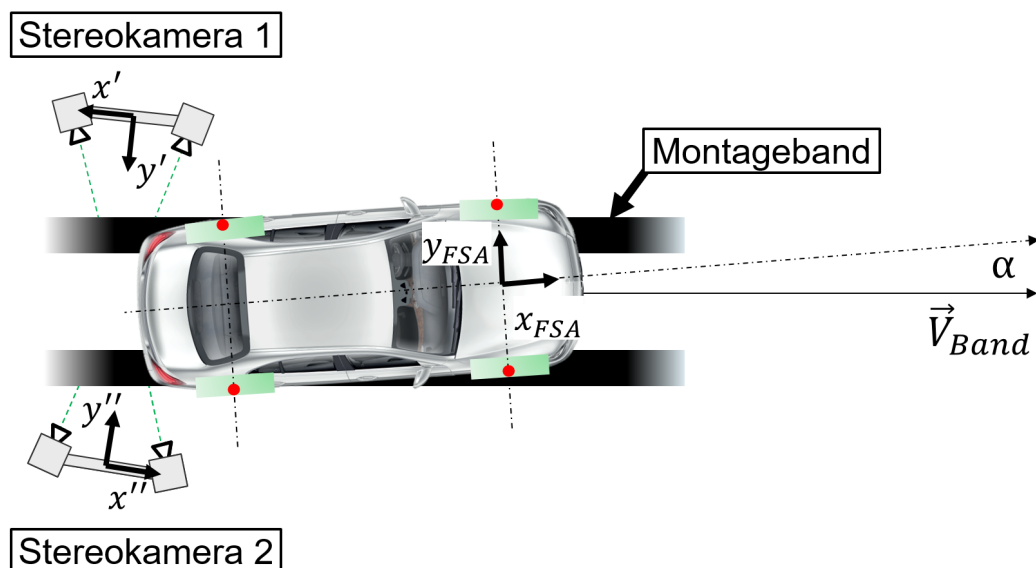


Abbildung 45: Übersicht der Koordinatensysteme im Referenziersystem

Abbildung 45 zeigt an einem Beispiel die Koordinatensysteme des Inline Referenziersystems im Überblick. Dabei sind die beiden Stereokameras wie abgebildet sowohl rotatorisch als auch translatorisch zueinander verschoben und die relative Lage zueinander sowie im Raum ist unbekannt. Die Fahrwerksymmetrieachse wird mit dem Index „FSA“ abgekürzt. Das gesamte Fahrzeug bewegt sich auf dem Band entsprechend dem Bewegungsvektor \vec{V}_{Band} von links nach rechts. Die bestimmten Radmittelpunkte werden jeweils im Koordinatensystem des Stereokamerasystems bestimmt. Anhand des bekannten Radstandes des Fahrzeugs, der entweder als Konstruktionsmaß oder später als Messwert des Fahrwerkstandes bekannt ist, können die Radmittelpunkte jeweils zu einer Seitengerade verbunden werden.

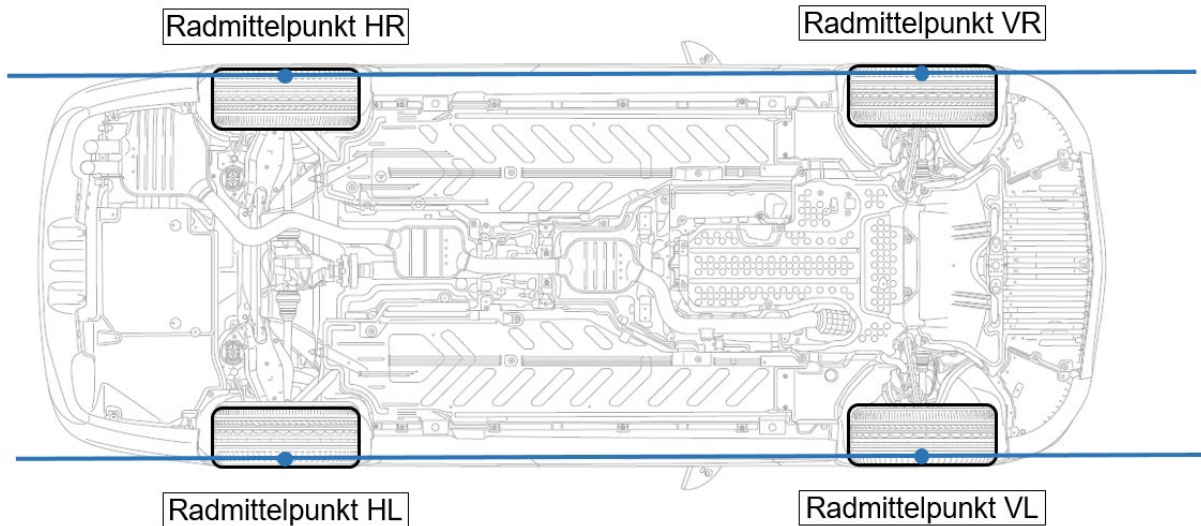


Abbildung 46: Verbinden der Radmittelpunkte je Fahrzeugseite [vgl. Dai18]

Aus fahrdynamischen Gründen sind die Spurweiten eines Fahrzeugs in der Regel unterschiedlich. Dadurch sind die Seitengeraden nicht parallel, sondern schneiden sich in einem Punkt. Der Sonderfall, dass beide Seitengeraden parallel sind, ist ebenfalls möglich und wird durch eine Parallele beider Geraden behandelt. Um das Messprinzip besser darstellen zu können, wurde in folgender Abbildung 47 der Unterschied in der Spurweite übermäßig groß und abstrahiert dargestellt.

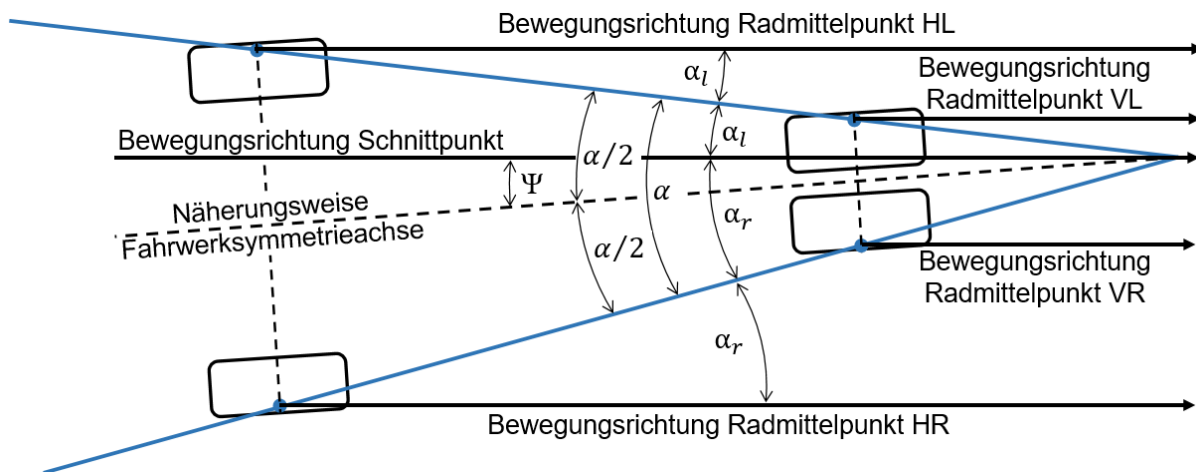


Abbildung 47: Bestimmung der näherungsweisen Fahrwerksymmetrieachse

Die Fahrwerksymmetrieachse ergibt sich näherungsweise aus der Winkelhalbierenden, die von den Seitengeraden eingeschlossen wird. Weshalb die Fahrwerksymmetrieachse mit diesem Verfahren nur näherungsweise bestimmt werden kann, wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nachfolgend beschrieben.

Um den Winkel α für die Bestimmung der Winkelhalbierenden aus den Messwerten der beiden Stereokamerasysteme berechnen zu können, muss die Winkellage beider Stereokamerasysteme zueinander bekannt sein. Dies ist durch die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs möglich. Dadurch, dass die Bewegungsvektoren aller Punkte eines starren Körpers bei einer geradlinigen Bewegung in die gleiche Richtung zeigen und den gleichen Betrag besitzen, können die Bewegungsvektoren dazu verwendet werden, um die relative Winkellage der Stereokamerasysteme zueinander zu bestimmen. Dafür wird das zu vermessende Fahrzeug als starrer Körper angenommen. Die Geradlinigkeit der Fahrzeugbewegung auf dem Montageband wurde für ein Transportband in Halle 36 ohne Beschleunigungen im Rahmen von Tests mit einem Lasertracker untersucht.

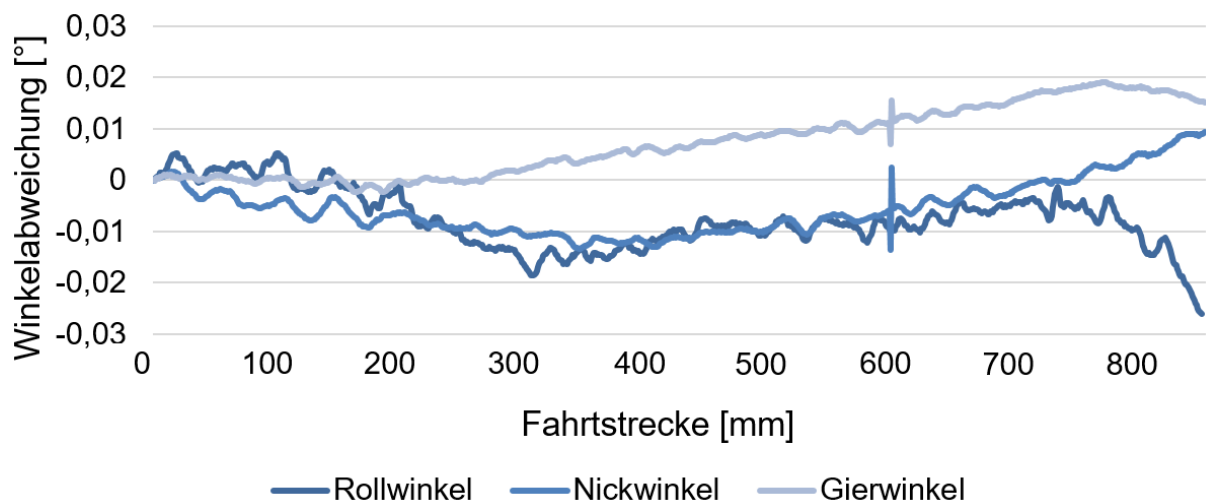


Abbildung 48: Untersuchung zur Geradlinigkeit der Bandbewegung

Wie in Abbildung 48 dargestellt, wurde dafür eine Strecke von 860 mm auf dem Montageband untersucht, auf der alle Messpunkte uneingeschränkt sichtbar waren. Dafür wurden mehrere Messpunkte auf einem Fahrzeug angebracht, das den Bandabschnitt mehrfach durchlaufen hat. Da nur ein Lasertracker verfügbar war, mussten drei Messfahrten eines Fahrzeugs zusammengefasst werden, weshalb dieses Verfahren keine belastbaren Messdaten liefert. Dieses wird dennoch zum Vergleich mit den später für die Kalibrierverfahren durchgeführten Roboterversuche analog durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit im Rahmen der Möglichkeiten zwischen Labor und Produktionslinie herstellen zu können. Außerdem stellen die Ergebnisse Anhaltswerte für die Geradlinigkeit der Bewegung dar, die durch das Zusammenführen

von drei Messfahrten zu einem Ergebnis vermutlich größer als die wahren Winkelabweichungen sind. Zusätzlich lässt sich durch die statische Überbestimmtheit der vier Räder auf zwei Förderbändern argumentieren, dass eine Veränderung des Gierwinkels durch ungleichmäßig fördernde Bänder ohne Schlupf zwischen Band und Reifen nur in geringen Größenordnungen möglich ist. Abschließend wird deshalb die Bewegung des Fahrzeugs auf dem Montageband als näherungsweise geradlinige Bewegung angenommen.

Für die Berechnung der Fahrwerksymmetrieachse werden zunächst entsprechend Abbildung 48 seitenweise die Winkel α_l und α_r bestimmt. Beide Winkel werden dafür ausgehend von der Bewegungsrichtung berechnet. Das bedeutet, dass im Fall von Abbildung 47 die Winkel um die Z-Achse für α_l mathematisch negativ und α_r positiv sind. Allgemein berechnen sich diese Winkel wie folgt nach:

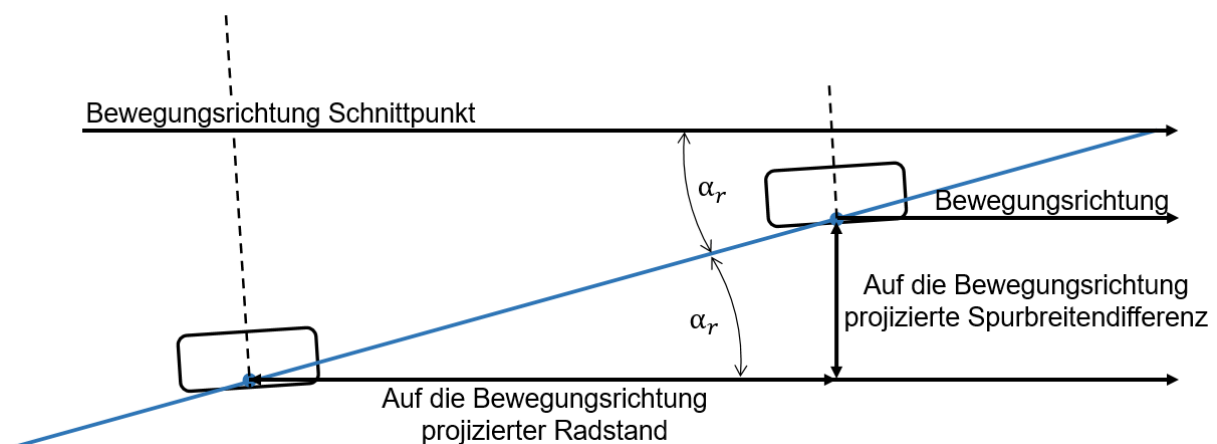


Abbildung 49: Berechnung eines Seitenwinkels

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\text{Spurbreitendifferenz}}{\text{Radstand}}\right) \quad \text{Gl. 13}$$

Dabei wurde die Gleichung um die Projektion auf die Bewegungsrichtung vereinfacht. Diese Vereinfachung kann getroffen werden, weil die Veränderung der Projektion durch die Schiefstellung des Fahrzeugs auf dem Band auf beiden Seiten zur gleichen Bewegungsrichtung durchgeführt wird und kein absolutes Maß ist, sondern die Spurbreitendifferenz ermittelt wird. Deshalb hat die Schiefstellung des Fahrzeugs auf das Ergebnis der Winkelhalbierenden keinen Einfluss. Der Winkel α ist dabei wie in Abbildung 49 dargestellt, zwischen der Seitengerade und der Bewegungsrichtung als

Wechselwinkel zweier paralleler Bewegungsvektoren sowie der Seitengerade zweimal vertreten. Anschließend kann aus beiden Seitenwinkeln wie folgt die Zielgröße Ψ als Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und der näherungsweisen Fahrwerksymmetrieachse bestimmt werden.

$$\psi = \frac{\alpha_l + \alpha_r}{2} \quad \text{Gl. 14}$$

Um diese Rechnung vornehmen zu können, muss die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs als Referenz relativ zu beiden Stereokamerasystemen bekannt sein. Der translatorische Abstand zwischen den Stereokamerasystemen wird nicht benötigt, da nur relative Abstände in der Rechnung berücksichtigt werden.

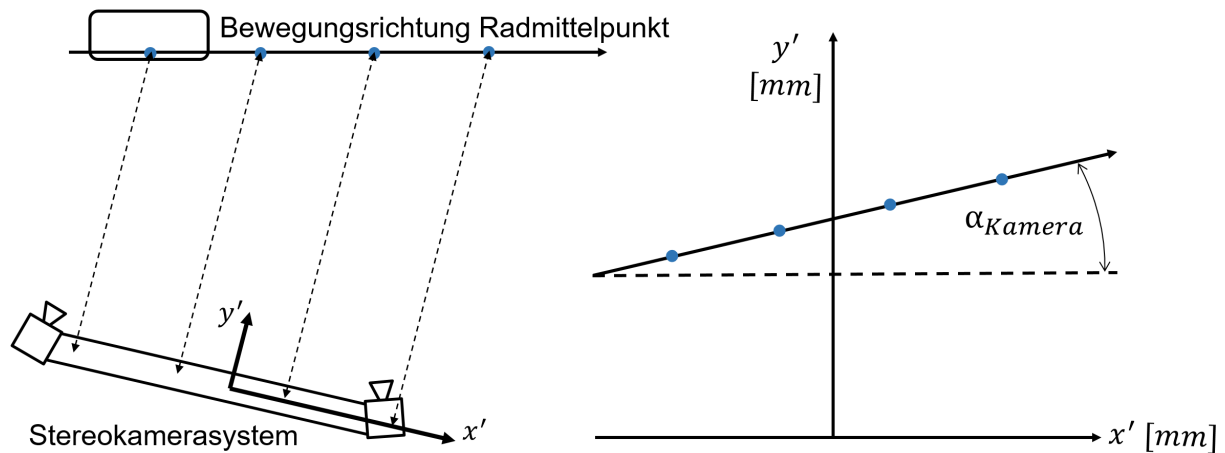


Abbildung 50: Winkelbestimmung zwischen Kamera und Fahrzeugbewegung

Entsprechend Abbildung 50 wird der Radmittelpunkt über den verfügbaren Öffnungswinkel des Stereokamerasystems mehrfach vermessen. Aus den so ermittelten Messpunkten wird anschließend der Bewegungsvektor des vermessenen Rades im Kamerakoordinatensystem durch eine lineare Regression bestimmt. Außerdem wird aus der Steigung der Regressionsgeraden der Winkel des Stereokamerasystems zur Bewegungsrichtung α_{Kamera} bestimmt. Damit werden im Anschluss die Messpunkte im Beispiel mit folgender inverser Drehmatrix um den Winkel α_{Kamera} gedreht, damit das Koordinatensystem des Stereokamerasystems parallel zum Bewegungsvektor steht.

$$\begin{pmatrix} x'_t \\ y'_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{Kamera}) & \sin(\alpha_{Kamera}) \\ -\sin(\alpha_{Kamera}) & \cos(\alpha_{Kamera}) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 15}$$

Werden diese Schritte für beide Fahrzeugseiten und jeweils für Vorder- und Hinterräder je Seite durchgeführt, entsprechen die Abstände beider Bewegungsvektoren je Seite der auf die Bewegungsrichtung projizierten Spurbreitendifferenz. Anschließend in Gl. 13 und Gl. 14 eingesetzt, stellen sie die Zielgröße der Referenzierung in Form des Winkels zwischen der Bewegungsrichtung und der näherungsweisen Fahrwerksymmetrieachse dar.

Nachweis zur Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse

In diesem Abschnitt wird der Nachweis erbracht, dass die Winkelhalbierende der Seitenachsen näherungsweise der Fahrwerksymmetrieachse entspricht. Im ersten Schritt wird dazu das klassische Rechenverfahren mit dem neuen Rechenverfahren algebraisch gleichgesetzt.

Der klassische Ansatz berechnet sich nach:

Mittelpunkt Vorderachse:

$$x_v = \frac{x_{vl} + x_{vr}}{2} ; y_v = \frac{y_{vl} + y_{vr}}{2} \quad \text{Gl. 16}$$

Mittelpunkt Hinterachse:

$$x_h = \frac{x_{hl} + x_{hr}}{2} ; y_h = \frac{y_{hl} + y_{hr}}{2} \quad \text{Gl. 17}$$

Winkel klassischer Ansatz:

$$\alpha_{klassisch} = \arctan \left(\frac{\left(\frac{y_{hl} + y_{hr}}{2} \right) - \left(\frac{y_{vl} + y_{vr}}{2} \right)}{\left(\frac{x_{hl} + x_{hr}}{2} \right) - \left(\frac{x_{vl} + x_{vr}}{2} \right)} \right) \quad \text{Gl. 18}$$

Der neue Ansatz berechnet sich nach:

Seitenwinkel links:

$$\alpha_l = \arctan \left(\frac{y_{hl} - y_{vl}}{x_{hl} - x_{vl}} \right) \quad \text{Gl. 19}$$

Seitenwinkel rechts:

$$\alpha_r = \arctan \left(\frac{y_{hr} - y_{vr}}{x_{hr} - x_{vr}} \right) \quad \text{Gl. 20}$$

Winkel neuer Ansatz:

$$\alpha_{neu} = \left(\frac{\arctan\left(\frac{y_{hr} - y_{vr}}{x_{hr} - x_{vr}}\right) + \arctan\left(\frac{y_{hl} - y_{vl}}{x_{hl} - x_{vl}}\right)}{2} \right) \quad \text{Gl. 21}$$

Gleichsetzen der beiden Ansätze:

$$\alpha_{klassisch} = \alpha_{neu} \quad \text{Gl. 22}$$

$$\arctan\left(\frac{\left(\frac{y_{hl} + y_{hr}}{2}\right) - \left(\frac{y_{vl} + y_{vr}}{2}\right)}{\left(\frac{x_{hl} + x_{hr}}{2}\right) - \left(\frac{x_{vl} + x_{vr}}{2}\right)}\right) \quad \text{Gl. 23}$$

$$= \left(\frac{\arctan\left(\frac{y_{hr} - y_{vr}}{x_{hr} - x_{vr}}\right) + \arctan\left(\frac{y_{hl} - y_{vl}}{x_{hl} - x_{vl}}\right)}{2} \right)$$

$$\left(\frac{\left(\frac{y_{hl} + y_{hr}}{2}\right) - \left(\frac{y_{vl} + y_{vr}}{2}\right)}{\left(\frac{x_{hl} + x_{hr}}{2}\right) - \left(\frac{x_{vl} + x_{vr}}{2}\right)} \right) \quad \text{Gl. 24}$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{y_{hr} - y_{vr}}{x_{hr} - x_{vr}}\right) + \left(\frac{y_{hl} - y_{vl}}{x_{hl} - x_{vl}}\right)}{2} \right)$$

$$\left(\frac{(y_{hl} + y_{hr}) - (y_{vl} + y_{vr})}{(x_{hl} + x_{hr}) - (x_{vl} + x_{vr})} \right) \quad \text{Gl. 25}$$

$$\neq \left(\frac{y_{hr} - y_{vr}}{x_{hr} - x_{vr}} \right) + \left(\frac{y_{hl} - y_{vl}}{x_{hl} - x_{vl}} \right)$$

Das Ergebnis des algebraischen Gleichsetzens beider Ansätze zeigt, dass die beiden Ansätze nicht gleich sind und somit nicht die gleichen Ergebnisse liefern. Es folgt deshalb eine weitere Untersuchung der Unterschiede der beiden Ansätze. Hierbei darauf abgezielt herauszufinden, in welchen Fällen die beiden Ansätze gleiche Ergebnisse und wann sie unterschiedliche Ergebnisse liefern.

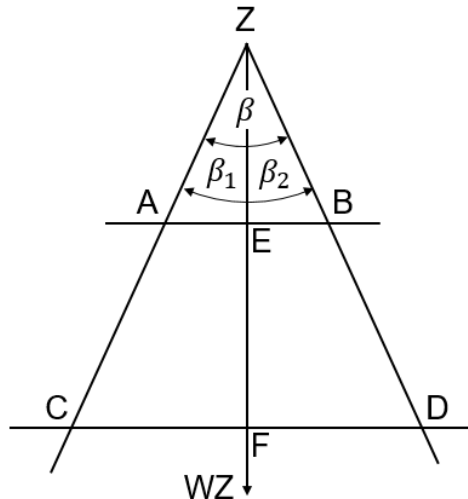


Abbildung 51: Skizze zum Winkelhalbierendensatz

In Abbildung 51 entsprechen die Punkte A, B, C und D den Radmittelpunkten eines Fahrzeugs und Z stellt den Schnittpunkt der beiden Seitengeraden dar. Die Punkte E und F entsprechen den Achsmittelpunkten und die Gerade \overrightarrow{EF} gilt als die Fahrwerksymmetrieachse nach dem klassischen Ansatz mit $\vec{E} = \vec{A} + \frac{1}{2}\overrightarrow{AB}$, $\vec{F} = \vec{C} + \frac{1}{2}\overrightarrow{CD}$ und $\overrightarrow{EF} = \vec{C} + \frac{1}{2}\overrightarrow{CD} - \vec{A} - \frac{1}{2}\overrightarrow{AB}$. Die Winkelhalbierende ausgehend von Z wird als WZ bezeichnet [Kön21]. Es gilt zu klären, in welchen Fällen die Gerade \overrightarrow{EF} der Winkelhalbierenden WZ entspricht, also die beiden Ansätze gleiche Ergebnisse liefern. Nach dem Winkelhalbierendensatz ist dies der Fall, wenn gilt:

$$\frac{\overline{AE}}{\overline{BE}} = \frac{\overline{AZ}}{\overline{BZ}} \quad \text{Gl. 26}$$

Folglich muss ABCD ein gleichschenkliges Trapez sein, damit die beiden Ansätze die gleichen Ergebnisse liefern [Kön21]. Da dies in der Realität durch Toleranzen vermutlich nur in Einzelfällen eintritt, wird im Folgenden ein numerischer Ansatz betrachtet, um herauszufinden, in welchen Größenordnungen beide Ansätze in der Realität voneinander abweichen.

Dafür wurden zufällig mögliche Abweichungen in jeweils einem Toleranzquadrat um die Sollmaße wie in folgender Abbildung 52 gezeigt, durchgerechnet.

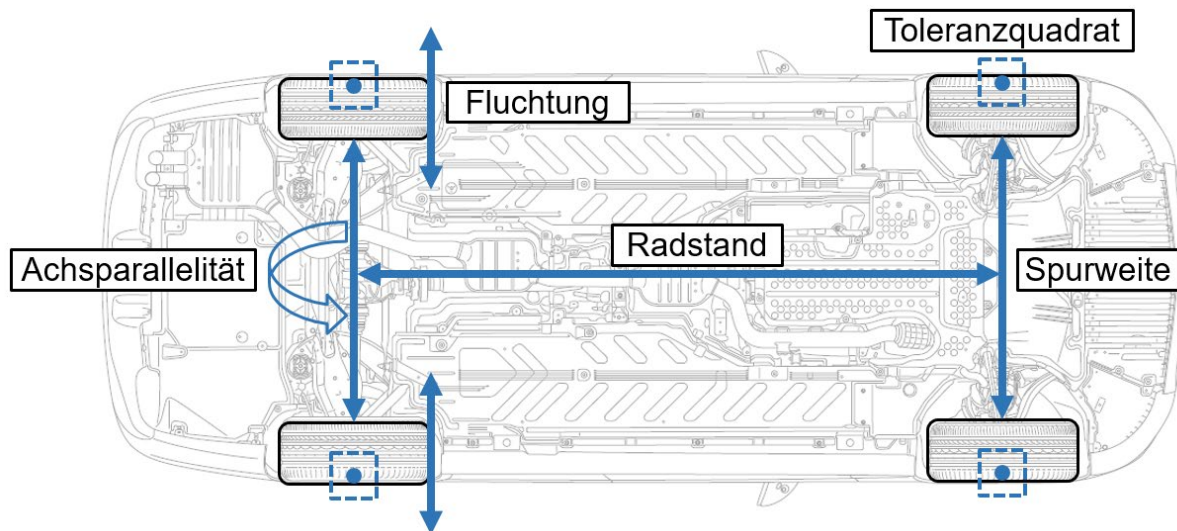


Abbildung 52: Zusammenfassen von Toleranzen zu Toleranzquadraten [vgl. Dai18]

Die Toleranzquadrate können sich durch unterschiedliche Toleranzeinflüsse wie die Achsparallelität, den Radstand, die Spurweite und die Fluchtung der Räder ergeben. Um realistische Werte für den numerischen Ansatz zu verwenden, wurden die Maße von Spurbreite und Radstand der E-Klasse Baureihe 213 verwendet, die im Rahmen dieser Arbeit als Referenzbaureihe dient. In Rücksprache mit der Toleranzabteilung wurde für die Kantenlänge der Toleranzquadrate ein konservativ großer Wert von 10 mm angenommen. Folglich wurde für jeden Radmittelpunkt zum Soll-Maß ein zufälliger Toleranzwert addiert, so dass die Toleranz in X- und Y-Richtung je maximal 5 mm beträgt.

$$\begin{pmatrix} x_{neu} \\ y_{neu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{Soll} \\ y_{Soll} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 27}$$

Die so ermittelten Radmittelpunkte werden anschließend mit beiden Verfahren berechnet und der Gierwinkel des neuen Verfahrens vom Gierwinkel des klassischen Verfahrens subtrahiert, um die Abweichung zu berechnen. Um außerdem die Einflussgrößen näher bestimmen zu können, wird im Folgenden einzeln auf Toleranzfälle eingegangen. Begonnen wird mit einer X-Verschiebung der Radmittelpunkte, also einer Veränderung des Radstandes bzw. einer Rotation der Achsen zueinander. Dies bedeutet zunächst insofern keine Veränderung des Gierwinkels, da entweder der Radstand als Sollmaß angenommen wird oder auf dem Fahrwerkstand im Rahmen der Messgenauigkeit gemessen wird. Selbst wenn man

von einer Messungenauigkeit von mehreren Millimetern ausgeht, bleibt die Abweichung bei null. Anders sieht es bei der Verschiebung des Radmittelpunkts in Y-Richtung aus und einer damit verbundenen Verschiebung der Achsmittelpunkte.

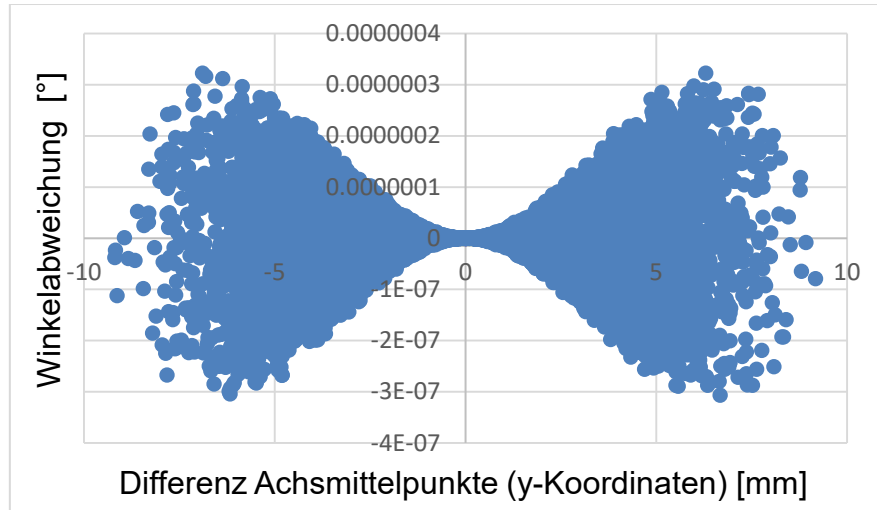


Abbildung 53: Einfluss der Achsmittelpunktverschiebung in Y-Richtung [Paw21]

Wie in Abbildung 53 dargestellt, bedeutet eine Spurbreitenänderung auch gleichzeitig eine nichtlineare Abweichung der beiden Verfahren. Jedoch werden selbst bei den konservativ hoch angenommenen Toleranzen nur Winkelabweichungen im Zehntelmikrogradbereich erreicht, weshalb dieser Einfluss für eine Inline Referenzierung vernachlässigbar klein ist. Abschließend wird der maximale Einfluss der ± 5 mm Toleranz auf die Abweichung analysiert.

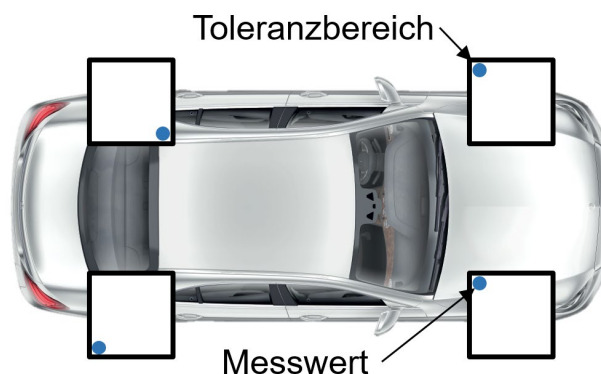


Abbildung 54: Toleranzfall mit der größten Abweichung [vgl. Dai18]

Der in Abbildung 54 dargestellte Extremfall sowie der an der Fahrzeugquer- bzw. Fahrzeuglängsachse gespiegelte Fall ergibt die größte Abweichung zwischen den

beiden Verfahren. Dabei werden die vollen 5 mm Abweichung in jede Richtung angewandt. Selbst in diesem Extremfall weichen die beiden Verfahren um $0,0004^\circ$ voneinander ab. Dies stellt weniger als ein Prozent der Messgenauigkeit des Fahrwerkstandes dar, der als Referenzwert für die Entwicklung des Inline Referenzverfahrens genutzt wurde und ist somit in einem vernachlässigbar kleinen Bereich. Andererseits können dadurch auf ein initiales Einmessen der Systeme und ein regelmäßiges Kalibrieren mit dem Eichmeister verzichtet werden. Damit werden nicht nur ein Anlagenstillstand und der Aufwand zur Durchführung dieser Tätigkeiten eingespart, sondern auch die Genauigkeit verbessert. Denn die Messungenauigkeit des Systems zur initialen Vermessung der Anlage und auch die regelmäßige Kalibrierung mit dem Eichmeister sorgen für zwei weitere Glieder in der Toleranzkette, die mit dem neuen Ansatz nicht einberechnet werden. Auch der Fall einer Veränderung im System wie einer Verschiebung oder Manipulation eines Stereokamerasystems kann bereits mit einer Messung erkannt werden, so dass nicht wie im heutigen Fall einer wöchentlichen Kalibrierung mit dem Eichmeister theoretisch nach einer Veränderung bis zu eine Woche unbemerkt mit Messfehlern produziert wird, da die relative Lage der Kamerasysteme zueinander mit jeder Messung überprüft wird. Auch der Fall eines defekten Stereokamerasystems bedeutet keine langen Ausfallzeiten, die speziell bei einem Inline Referenziersystem zu einer höheren Zahl von Ausfällen als ein Fahrwerkstand führen würde, sofern ein bereits kalibriertes Stereokamerasystem zum Tausch bereitsteht. Ohne eine Vermessung kann direkt weiter produziert werden. Ein weiterer Einfluss, der noch in diesem Kapitel thematisiert werden soll, ist der Einfluss auf das Ergebnis der Inline Referenzierung durch den Lenkwinkel. Im Fahrwerkstand wird eine Lenkradwaage dazu verwendet, um den Lenkradwinkel zu bestimmen und das Lenkrad für die Messung innerhalb eines bestimmten Toleranzbereichs gerade zu stellen. In der Produktionslinie hingegen ist kein bestimmter Lenkwinkel gefordert. Aus diesem Grund wurde zunächst die Schiefstellung des Lenkrades im betroffenen Bandbereich der E-Klasse Produktion über mehrere Fahrzeuge hinweg gemessen und daraufhin im Labor eine Messreihe zum Einfluss des Lenkradwinkels auf das Ergebnis der Referenzierung betrachtet. Die Messungen in der Produktionslinie ergaben Lenkwinkel im Bereich zwischen 3 und 7 Grad am Lenkrad, jedoch haben Werker von deutlich größeren Winkeln berichtet, die in der Messreihe nicht aufgetaucht sind. Aus diesem Grund wurde ein Lenkradwinkelbereich von -20° bis 20° im Labor untersucht.

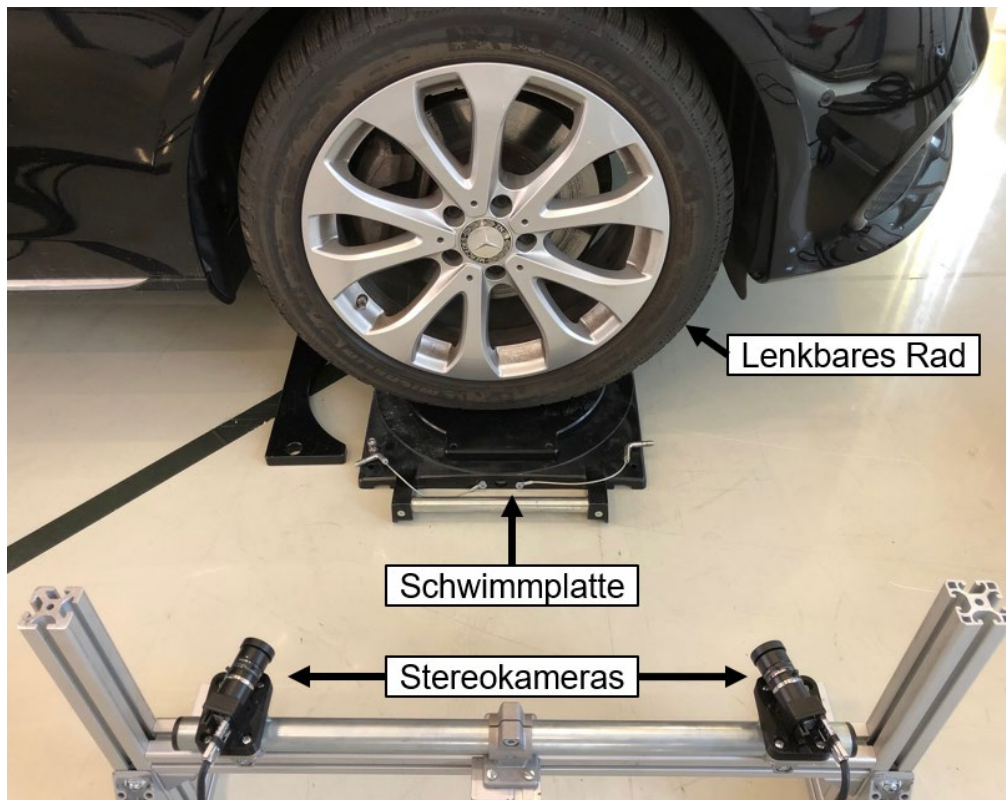


Abbildung 55: Lenkwinkelversuch auf Schwimmplatten

Wie in Abbildung 55 gezeigt, wurde dafür eine E-Klasse im Labor auf Schwimmplatten gestellt und der Lenkwinkel über ein Prüfmodul des Mantelrohrmoduls bestimmt. Die Ergebnisse wurden auf dem PC ausgegeben, der gleichzeitig die Aufnahmen mit dem Stereokamerasystem ausgeführt hat, so dass im Anschluss die Daten zusammengeführt und ausgewertet werden konnten. Sowohl in X- als auch in Y-Richtung bewegt sich der Radmittelpunkt relativ zum statischen Stereokamerasystem.

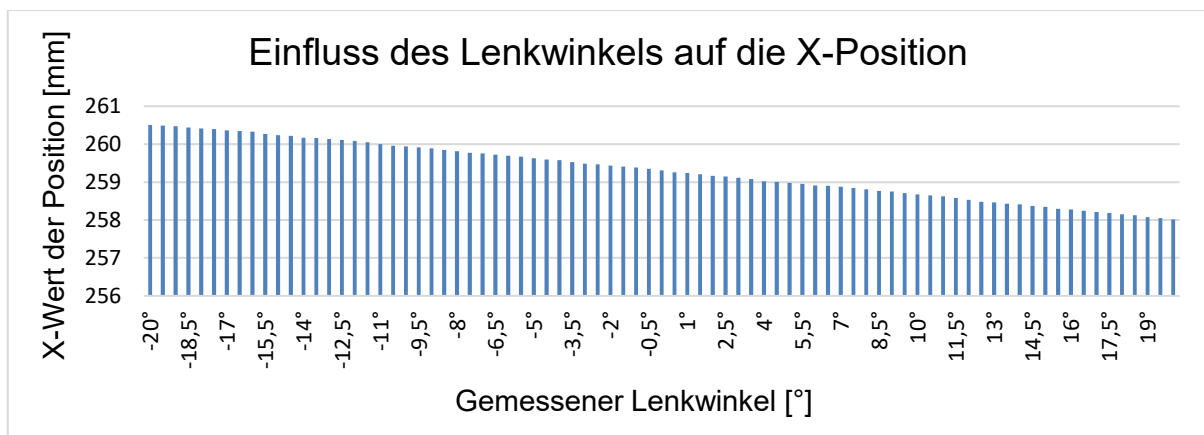


Abbildung 56: Einfluss des Lenkwinkels auf die X-Position

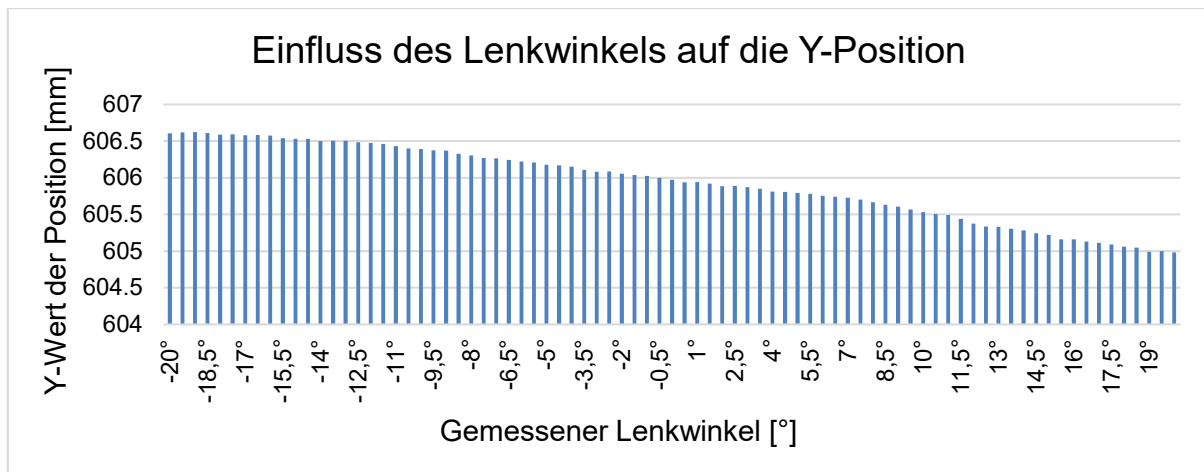


Abbildung 57: Einfluss des Lenkwinkels auf die Y-Position

Wie in Abbildung 56 und Abbildung 57 gezeigt, beeinflusst der Lenkwinkel beide Positionswerte des Radmittelpunkts. Auf die zuvor gemessenen Lenkwinkel in der Produktion bedeutet dies folgende Abweichung.

Lenkradwinkel [°]	Y-Abweichung der Radmitte zur Lenkradstellung geradeaus [mm]	Gierwinkelabweichung zur Lenkradstellung geradeaus [°]
3	0,103	0,0020
7	0,246	0,0048
10	0,440	0,0086
20	0,993	0,0194

Tabelle 7: Gierwinkelabweichung infolge Lenkwinkeleinfluss

Da Lenkwinkel in der Montagelinie im Bereich von ca. 20 Grad durch Werker berichtet wurden und diese einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Kalibrierergebnisse bedeuten, sollte im Idealfall das Lenkrad in der Montagelinie geradegestellt sein. Außerdem ist es auch denkbar, die Abweichung durch Kenntnis des Zusammenhangs zwischen der Abweichung des Radmittelpunkts und des gemessenen Lenkwinkels zu kompensieren. Dies ist jedoch nicht so einfach, da je nach Lenkrichtung, in die das Lenkrad zuvor bewegt wurde, unterschiedliche Werte gemessen wurden. Dabei traten Differenzwerte von bis zu 0,8 mm auf, die sich vermutlich aus dem Zahnflankenspiel der Lenkung ergeben und eine Gierwinkelabweichung von 0,0156° bedeuten. Folglich sollten für eine Kompensation des Lenkwinkels zunächst weitere Messungen durchgeführt werden, denn es wurde

der Test nur mit einem Allradmodell und einer Rad-Reifen-Kombination untersucht. Vermutlich wird es variantenbedingt dadurch einige Fälle geben, weshalb das Geradestellen der Lenkung in der Produktionslinie vorzusehen ist. Eine solche manuelle Tätigkeit wäre beispielsweise zu Beginn des statischen intelligenten Schnittstellen Tests (IS Test) möglich, indem die Diagnosegeräte durch diesen Dienst erweitert würden oder das Fahrzeug den eingebauten Lenkwinkelsensor und das Instrumentencluster für eine entsprechende Anwendung verwendet würden.

Neben der Bestimmung des Gierwinkels wird für die Kalibrierung der Fahrerassistenzsysteme zusätzlich der Roll- und Nickwinkel benötigt. Beide Winkel können vom fahrfertigen Zustand abweichen, da sich das Fahrwerk beispielsweise durch Setzeffekte zwischen der Produktionslinie und dem Fahrwerkstand noch setzen bzw. durch die Kalibrierung der Aktivfahrwerke verändern kann. Bezüglich des Roll- und Nickwinkels werden die Differenzen der Produktionslinie zum späteren Fahrzustand benötigt. Eine Ermittlung beider Winkel mit den Stereokamerasystemen des Inline Referenziersystems ist möglich, indem die Radhauskanten relativ zu den Radmittelpunkten vermessen werden. Jedoch müsste dafür jeweils der gleiche Referenzpunkt an den Kotflügelkanten wie später auf dem Fahrwerkstand ermittelt werden. Diese Referenzpunkte werden heute in der E-Klasse Produktion mit einem Linienlaser bestimmt, der jeweils zwischen den beiden Rollen eines Rades des Fahrwerkstandes angeordnet ist. Es ist folglich schwierig, den gleichen Referenzpunkt mit einem zweiten Messsystem in der Produktionslinie zu vermessen, was zu Ungenauigkeiten führen würde. Außerdem eignet sich die Radhauskante aufgrund ihrer Toleranzen nur bedingt als Referenz. Aus diesen Gründen wurde für das Konzept der Inline Referenzierung eine geeignetere Messmethode gesucht und auf folgende fahrzeugeigene Sensorik zurückgegriffen.

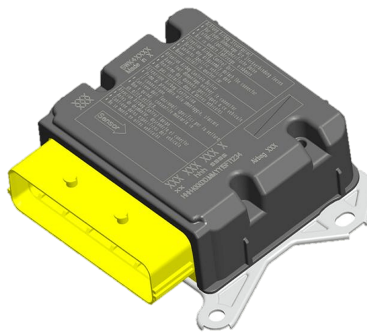


Abbildung 58: Occupant Restraint Controller (ORC) [Con22]

Der Occupant Restraint Controller (ORC) ist inzwischen serienmäßig in jedem Fahrzeug verbaut. Dieser ist mit Beschleunigungssensoren in die X- und Y-Richtung des Fahrzeugs ausgestattet und steuert eine Vielzahl von Rückhaltevorrichtungen im Fahrzeug wie Airbags und andere passive Sicherheitssysteme. Mithilfe der Beschleunigungssensoren im ORC können aus den Beschleunigungswerten Winkel relativ zur Erdbeschleunigung wie folgt berechnet werden.

$$\alpha_x = \arctan\left(\frac{A_x}{9,81 \frac{m}{s^2}}\right) \quad \text{Gl. 28}$$

$$\beta_y = \arctan\left(\frac{A_y}{9,81 \frac{m}{s^2}}\right) \quad \text{Gl. 29}$$

Dabei beschreiben A_x und A_y die Beschleunigung in m/s^2 in die X- bzw. Y-Richtung des Fahrzeugs sowie die Winkel α_x und β_y , den Roll- und Nickwinkel. Die Auflösung des ORC Beschleunigungssensors in der E-Klasse der Baureihe 213 beträgt auf die Winkelgenauigkeit umgerechnet $0,0071^\circ$. Jedoch sendet das ORC Steuergerät Beschleunigungswerte nicht mit dieser Genauigkeit auf dem Dynamics CAN und auch die Diagnosefunktionen des Steuergerätes bieten keine genaueren Werte. Dies liegt eventuell darin begründet, dass das ORC bei einem Unfall Beschleunigungswerte mit einer hohen Wiederholfrequenz aussenden muss, um schnell darauf reagieren zu können und die Genauigkeit zweitrangig ist. Dennoch wird für diese Arbeit die Verfügbarkeit eines Beschleunigungswertes mit voller Genauigkeit von umgerechnet $0,0071^\circ$ angenommen. Da für die Realisierung eines Inline Inbetriebnahmeverfahrens auch Änderungen am Fahrzeug notwendig sind, wird davon ausgegangen, dass genauere Beschleunigungswerte für die Inline Referenzierung beispielsweise als Diagnosefunktion oder im Rahmen eines Produktionsmodus mit im Sensorlastenheft aufgenommen und realisiert werden können [Sec21]. Das Konzept der Referenzierung des Nick- und Rollwinkels wird sowohl für die Inline Kalibrierung in der Montagelinie sowie im fahrfertigen Zustand auf dem Fahrwerkstand durchgeführt. Anhand der Beschleunigungswerte wird mit Gl. 28 und Gl. 29 jeweils der Nick- und Rollwinkel bestimmt. Sofern im Fahrwerkstand zur Messung des fahrfertigen Zustandes die Kalibrierung des ORC erfolgt ist, müssen die Kalibrierwerte vom Ergebnis subtrahiert

werden, um eine Vergleichbarkeit mit der Inline Messung herzustellen. Zusätzlich muss die Messung in beiden Fällen möglichst ohne störende Einwirkungen auf das Fahrzeug durchgeführt werden. Die Bewegung auf der Fördertechnik ist im Idealfall geradlinig und bei Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit wirkt außer der Erdbeschleunigung keine weitere Beschleunigung auf das Fahrzeug. In der Praxis gibt es jedoch in der Linie und auch im Fahrwerkstand kleine Beschleunigungen, für die ein Messschwellwert anhand der Umgebungsbedingungen und der zu erreichenden Toleranzen zunächst definiert werden sollte. Im Idealfall kann der Inlinewert auch bei einem Bandstillstand ermittelt werden. Einen weiteren Mehrwert stellt dieses Referenzierverfahren für die Kalibriergüte dar. Durch ein kontinuierliches Überwachen der Beschleunigungswerte zu den Schwellwerten können Zeitpunkte, die für eine Kalibrierung ungeeignet sind, weil beispielsweise die Fördertechnik beschleunigt bzw. verzögert oder ein Werker ins Fahrzeug steigt, für eine Kalibrierung und Referenzierung ausgeschlossen werden. Durch die relativen Messungen zwischen den beiden Zuständen in der Linie und auf dem Fahrwerkstand mit dem ORC entstehen Vorteile in Bezug auf die Messgenauigkeit und die Einflüsse durch zwei unterschiedliche Messsysteme werden vermieden. So wird die Toleranzkette des Referenzierprozesses verkürzt. In der Praxis konnte dieses Verfahren nicht überprüft werden.

Abschließend ist es auch denkbar, die Inline Referenzierung des Gierwinkels ebenfalls über die Beschleunigungswerte des ORC zu bestimmen. Dafür müssten die Messwerte des ORCs aus dem Stillstand während der Beschleunigungsvorgänge auf dem Montageband aufgezeichnet und aus beiden Beschleunigungsvektoren eine Vektoraddition über alle Messungen durchgeführt werden, um die Bewegungsrichtung zu erhalten. Für diese Berechnung können sowohl die Beschleunigungs- als auch die Verzögerungsvorgänge genutzt werden. Als zweite Referenz würden anschließend Beschleunigungen des Fahrzeugs aus eigenem Antrieb dienen, indem der Lenkradwinkel und die Bewegungsrichtung aus der Vektoraddition miteinander verrechnet werden müssten. Dieses Konzept würde ohne externe Hardware in der Produktionslinie auskommen, allerdings wird es unter anderem aufgrund der Fehleraddition bei jeder Messung vermutlich deutlich ungenauer als das zuvor beschriebene Referenziersystem sein, weshalb an dieser Stelle die Idee erwähnt, jedoch nicht ausgeführt wird.

5 Inline Kamerakalibrierverfahren

5.1 Planung des Inline Kamerakalibrierverfahrens

Im Rahmen des Entwicklungsschrittes Planung und Klären werden ausgehend von den zunächst allgemein ermittelten Anforderungen, die kameraspezifischen Anforderungen des Inline Kamerakalibrierverfahrens abgeleitet.

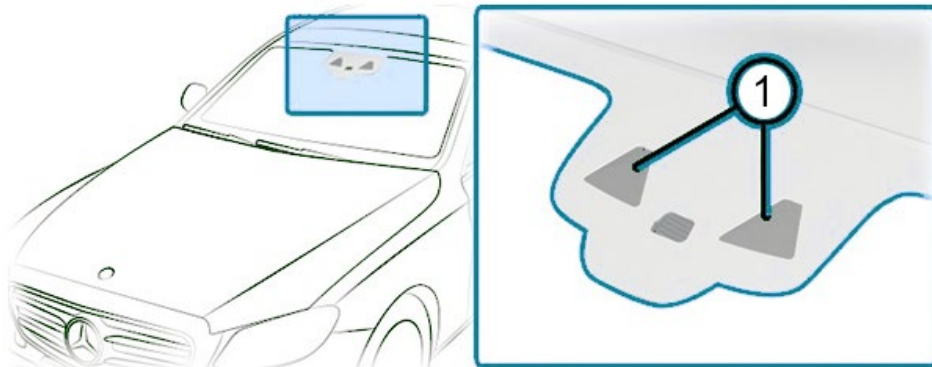


Abbildung 59: Stereo Multi Purpose Camera (SMPC) [Mer22]

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verfahren hauptsächlich für die (S)MPC (siehe Abbildung 59 Position 1) entwickelt, weil hierfür ähnlich wie für andere in Fahrtrichtung ausgerichtete Sensorik in der Regel aufgrund der möglichen Geschwindigkeiten in diese Richtung die höchsten Anforderungen an die Sensorreichweite und damit auch an die Kalibrierung gestellt werden. Jedoch werden auch andere Verbaupositionen während der Entwicklung überprüft. Dafür sollen im Rahmen dieser Arbeit Kalibrierverfahren für die drei Raumwinkel entwickelt werden.

Anforderungen an das Inline Kamerakalibrierverfahren

Für die Entwicklung des Inline Kamerakalibrierverfahrens werden von den zuvor für das Gesamtverfahren definierten Anforderungen besonders folgende Anforderungen gewichtet. Die erste Anforderung betrifft die Verlagerung des Verfahrens vom statischen Fahrwerkstand in die dynamische Montagelinie und zweitens wird eine targetlose Kalibrierung in der Produktionslinie gefordert. Targetlos bedeutet in diesem Fall, dass keine klassischen Targets verwendet werden sollen, die eingemessen und vom Sensor detektiert werden. Dafür soll, sofern möglich, die veränderliche Umgebung der Produktionshalle genutzt werden, die bereits vorhanden und nicht vermessen ist,

weshalb diese nicht als Target im klassischen Sinne verstanden wird. Außerdem wird eine möglichst genaue Kalibrierung gefordert, die zudem möglichst universell in unterschiedlichen Produktionshallen und unterschiedlichen Derivaten eingesetzt werden kann.

5.2 Entwurf des Inline Kamerakalibrierverfahrens

Ziel dieses Unterkapitels ist es, Kalibrierkonzepte für Kamerasysteme zu sammeln, weiterzuverfolgende Konzepte auszuwählen sowie die gewählten Konzepte auszuarbeiten. Dafür werden im Folgenden Kalibrierkonzepte vorgestellt, die in die engere Auswahl gekommen sind, sowie jeweils die Vor- und Nachteile der Konzepte benannt. Die Auswahl weiterzuverfolgender Konzepte folgt im Anschluss daran.

Zunächst werden bei der Konzeption nach dem Prinzip der Lösungsneutralität und Ideallösung die Stärken und Schwächen der Kamera betrachtet, um die Stärken für eine Kalibrierung zu nutzen und die Schwächen des Sensors zu vermeiden. Als Stärke der Kamera ist zunächst die hohe Auflösung genannt, die es ermöglicht, dreidimensionale Objekte zweidimensional im Subpixelbereich zu detektieren. Eine dreidimensionale Tiefenschätzung ist damit zwar möglich, jedoch vergleichsweise ungenau, weshalb diese Eigenschaft als Einschränkung für Kalibrierkonzepte berücksichtigt werden muss. Als passiver Sensor ist die Kamera auf Lichtquellen angewiesen. Dabei müssen der Kontrast und die Helligkeit stimmen, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. Folglich sollte eine Kalibrierung nicht in einer zu dunklen, jedoch auch nicht in einer zu hellen Produktionsumgebung durchgeführt werden. Außerdem wurde zu Beginn der Konzeptsuche für alle Sensortypen eine Analyse zum Sensoröffnungswinkel in der Produktionslinie durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse zeigt, was die Sensoren im Produktionsumfeld detektieren und stellt damit die Grundlage für die Konzeption der Kalibrierkonzepte dar. Das Ergebnis war in Bezug auf die Kamerasysteme, dass sowohl die Produktionsumgebung, Teile des eigenen Fahrzeugs, als auch das vorausfahrende bzw. das rückwärtige Fahrzeug detektiert werden kann.

Konzepte für das Inline Kamerakalibrierverfahren

Kalibrierkonzept auf Basis des optischen Flusses

Das erste Konzept basiert auf der Ermittlung des optischen Flusses und dem daraus resultierenden Fluchtpunkt des Vektorfeldes. Als Hauptbestandteil des Konzeptes

beschreibt der optische Fluss die Bewegungsschätzung jedes Pixels eines Bildes. Dafür wird die Verschiebung von Punkten im Bild zum Zeitpunkt t und zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ betrachtet, wodurch Bewegungen im Bildbereich sichtbar werden. Durch den zeitlichen Unterschied Δt zwischen den Aufnahmen sowie die Bewegung des Montagebandes entsteht ein räumlicher Abstand zwischen den beiden Aufnahmen, der in zwei unterschiedlichen Perspektiven abgebildet wird. In beiden Aufnahmen werden korrespondierende Punkte zu Vektoren verbunden. Das Prinzip des Konzepts ist in folgender Abbildung 60 ersichtlich [Ric11] [Mei20].



Abbildung 60: Überlagerte Bildbereiche zeitlich versetzter Aufnahmen [vgl. Que20]

Zur Veranschaulichung wurden in Abbildung 60 nur markante Punkte eines Bildbereichs verbunden. Bei einer geradlinigen Bewegung, wie sie für Fahrzeuge auf dem Montageband angenommen werden kann, zeigen die Vektoren in Richtung des Fluchtpunktes bzw. in die Bewegungsrichtung der Kamera. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 61 eine Prinzipdarstellung des gesamten Vektorfeldes zu sehen. Im dargestellten Beispiel ist die Bewegungsrichtung der Kamera im mittleren linken Bildbereich zu finden und mit einem Kreis markiert. Die konstruktive Soll-Lage der Bewegungsrichtung liegt jedoch in der Bildmitte, die mit dem gestrichelten Kreis dargestellt ist. In diesem Fall liegt eine Abweichung im Gierwinkel vor, die durch den Pfeil gekennzeichnet ist.

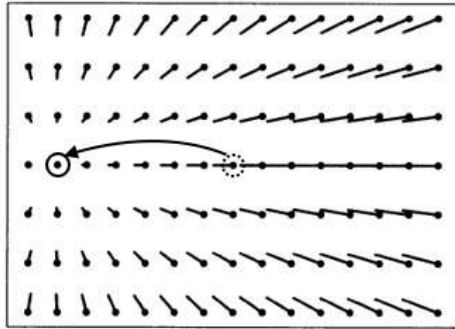


Abbildung 61: Zusammenhang von Vektorfeld und Bewegungsrichtung [Que20]

Aus der Lagedifferenz zwischen beiden Punkten, der Sensorauslösung und den optischen Eigenschaften der Kamera lässt sich der Gierwinkel aus der horizontalen Abweichung und der Nickwinkel aus der vertikalen Abweichung berechnen. Außerdem verändert sich die Länge der Vektoren mit dem Abstand des Messpunktes zur Kamera sowie des Messpunktes relativ zum Fluchtpunkt im Bild. Die Messpunkte haben in Abbildung 61 jeweils den gleichen Abstand zur Kamera, wodurch der Längenunterschied in Bezug auf die relative Lage zum Fluchtpunkt sichtbar wird. Damit ist eine Tiefenschätzung auch mit Monokamerasystemen möglich und wird für ein weiteres Kalibrierkonzept herangezogen. Jedoch sind für den Betrieb in der Produktionslinie einige Änderungen vorzusehen. Diese Änderungen betreffen die Verkürzung der Kalibrierstrecke, die als geradlinig anzunehmende und langsamere Bewegung des Fahrzeugs in nahezu dessen Längsrichtung auf dem Montageband und sich relativ zur statischen Produktionsumgebung bewegendes Objekte, wie beispielsweise Werker oder andere Fahrzeuge, die nicht in jedem Fall für das Verfahren genutzt werden sollten. Das Grundverfahren ist bereits zum Standard für Online Kalibrierverfahren im Kundenbetrieb geworden, jedoch bietet es lediglich die Kalibrierung des Gier- und Nickwinkels und es sind noch einige Herausforderungen im Produktionsumfeld zu lösen [Ric11] [Mei20].

Kalibrierkonzept mittels Detektion von Fahrzeugen

Das zweite Konzept ist aus der Analyse des Öffnungswinkels in der Produktionslinie entstanden und beschreibt die Kalibrierung anhand von Fahrzeugteilen, die für die Kamera sichtbar sind. Kameras, die in sowie gegen die Fahrtrichtung ausgerichtet sind, erfassen benachbarte Fahrzeuge in der Produktionslinie. Trotz einer hohen Variantenvielfalt und mehreren Derivaten in einer Produktionslinie, sind Merkmale

vorhanden, die an jedem Fahrzeug vorkommen. Darunter fällt beispielsweise der Mercedes-Stern, der sowohl an Front und Heck jedes Fahrzeuges zu finden ist.



Abbildung 62: Der Mercedes-Stern als Kalibrierreferenz [Que20]

In Abbildung 62 ist das Konzept grob für den Mercedes-Stern eines vorausfahrenden Fahrzeuges realisiert. Es wurde davon sowohl der Schwerpunkt des Kreises als auch der oberste Kreispunkt, der sich durch die Verlängerung der vertikalen Speiche ergibt, betrachtet. Anhand der beiden Punkte ist eine Bestimmung aller drei Kalibrierwinkel möglich, sofern die Lage der Referenz bekannt ist. Zwar sind in der Produktion die benachbarten Fahrzeuge ebenfalls durch das Inline Referenziersystem vermessen, jedoch sind die Toleranzen, die sich aus der Toleranzkette zwischen den Radmittelpunkten und den sichtbaren Referenzen wie dem Mercedes-Stern ergeben, so groß, dass sie bereits die Genauigkeitsanforderungen im Zehntelgradbereich übersteigen. Selbst bei Referenzen des eigenen Fahrzeuges sind die Toleranzen zu groß und hinzukommt, dass einige Referenzen wie Kanten durch Reflexionen im Lack nur unsicher erkannt werden können und das eigene Fahrzeug eine schlechte Referenz darstellt, weil die Referenzen außerhalb des Fokusbereichs der Kamerasysteme liegen.

Kalibrierkonzept Triangulation

Abgeleitet vom Prinzip der Triangulation können in der Produktionsumgebung Punkte vermessen werden, die von Kamerasystemen erkannt werden können. Aus der bekannten Position von mindestens drei Punkten im Bild können sowohl die eigene Position im Raum als auch die Kalibrierwerte berechnet werden. Ähnliche Verfahren werden im Bereich der Koordinatenmesssysteme eingesetzt, jedoch werden dafür spezielle Marker als Messpunkte verwendet. Ein ähnliches Verfahren ist zwar für die

Inline Kalibrierung denkbar, indem die Produktionsumgebung vermessen würde, jedoch ist ein solches System nicht robust gegen Änderungen in der Produktionslinie und wäre mit einem Wartungsaufwand für zukünftige Änderungen in der Produktion sowie mit einem Aufwand für die Vermessung jeder Produktionslinie verbunden.

Kalibrierkonzept Kantendetektion

Einzelne der vorgestellten Konzepte ermöglichen die Bestimmung des Gier- und Nickwinkels, jedoch nicht des Rollwinkels. Aus diesem Grund werden noch speziell für die Bestimmung des Rollwinkels Konzepte gesucht. Ein Konzept der Kantendetektion kann verwendet werden, um sowohl spurparallele Kanten zu finden, als auch um sonstige Kanten im Bild zu finden.

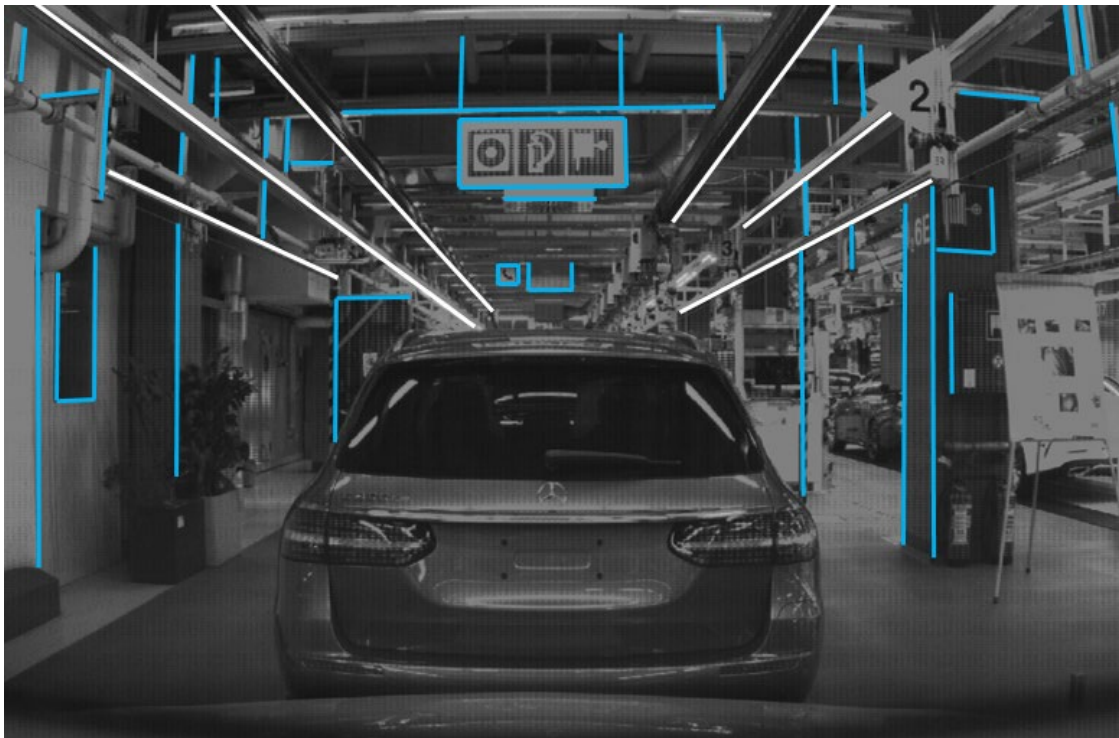


Abbildung 63: Kalibrierkonzept Kantenerkennung in der Produktionsumgebung

Hintergrund ist einerseits, dass Spuren im Kundenbetrieb der Onlinekalibrierung verwendet werden, um einen Fluchtpunkt im Bild zu ermitteln. Dafür werden bei höherer Geschwindigkeit Spurgeraden erkannt und verlängert. Andererseits wird der Schnittpunkt als Fluchtpunkt ähnlich wie bei dem Konzept zum optischen Fluss als Bewegungsrichtung angenommen. Dadurch können mit diesem Verfahren der Gier- und der Nickwinkel bestimmt werden. Jedoch lässt die Produktionsumgebung nicht

immer die Erkennung spurparalleler Kanten zu, da diese in der Regel durch ein benachbartes Fahrzeug verdeckt sind. Wie in Abbildung 63 gezeigt, sind einige spurparallele Kanten weiß dargestellt. Das Konzept der Kantenerkennung kann jedoch auch unabhängig von spurparallelen Kanten dafür verwendet werden, um Kanten im Bild zu finden. Mit der Annahme, dass es in einem Produktionsumfeld einige horizontale und vertikale Kanten gibt, wird genau nach diesen Kanten gefiltert. Diese sind in Abbildung 63 blau eingefärbt. Zwar wurden einige der dargestellten Kanten mit einer Neigungssensorik in ihrer Neigung geprüft und speziell bei den Betonsäulen eine größere Abweichung festgestellt, jedoch sollte aufgrund der großen Anzahl an horizontalen und vertikalen Kanten das Konzept bessere Werte liefern, als die spurparallelen Kanten [Mei20].

Kalibrierkonzept Ebenenschätzer

Das Kalibrierkonzept des Ebenenschätzers ist ebenso ein Konzept, das bei der Onlinekalibrierung Anwendung findet. Dabei wird versucht, die Fahrbahnebene zu schätzen und angenommen, dass diese über mehrere Messungen hinweg horizontal ausgerichtet ist. Damit können Roll- und Nickwinkel bestimmt werden. Im Produktionsumfeld ist die Bodenebene für die (S)MPC nur in kleinen Bereichen seitlich des vorausfahrenden Fahrzeugs sichtbar, der auch durch Betriebsmittel okkludiert sein kann. Denkbar wäre das Konzept im Produktionskontext auch für Ebenen an Wänden und der Decke, sofern diese in ausreichender Größe sichtbar sind sowie für die 360 Grad Kamerasysteme. Ein weiteres Thema in diesem Kontext ist die benötigte Struktur für eine Ebenenschätzung. Auf nahezu strukturlosen Ebenen wie sie typischerweise auf einem Boden oder den Wänden in den Produktionshallen vorkommen, funktioniert das Verfahren nicht. Grund dafür ist die Funktionsweise des Verfahrens, das Punkte eindeutig erkennen und wiedererkennen muss, was auf strukturlosen Ebenen nicht möglich ist. Deshalb müsste dafür die Produktionsumgebung mit beispielsweise zufälligen Mustern am Boden oder Bildern an den Wänden angepasst werden [Mei20].

Kalibrierkonzept künstlicher Horizont

Die Grundidee des künstlichen Horizonts ist es, aus den Flussvektoren des optischen Flusses eine Art künstlichen Horizont sowie eine künstliche Vertikale zu berechnen, indem die Flussvektoren in ihre horizontale und vertikale Komponente zerlegt und entsprechend eines Verlängerungsfaktors verlängert werden. Dies ist notwendig, da

sich beim optischen Fluss die Vektorlänge aufgrund des Abstandes zum Messpunkt im dreidimensionalen Raum sowie aufgrund des Abstandes zwischen Bewegungsrichtung und Messpunkt auf der Bildebene verändern. Wird der individuelle Faktor für den Flussvektor bestimmt, so können damit Punktwolken um den künstlichen Horizont für die vertikale Komponente des Flussvektors und um die künstliche Vertikale für die horizontale Komponente des Flussvektors berechnet werden.

Auswahl weiter zu verfolgender Konzepte

Um aus den gesammelten Konzepten weiter zu verfolgende Konzepte auswählen zu können, wird eine Bewertung der Konzepte nach den zuvor gesammelten Anforderungen vorgenommen. Als Bewertungskriterien werden folglich bezogen auf die dynamische Anwendung in der Montagelinie die Genauigkeit, benötigte Betriebsmittel, Einflüsse der Produktionsumgebung, Kosten, Komplexität und Umsetzbarkeit herangezogen. Daraus ergibt sich, dass das Konzept auf Basis des optischen Flusses für die Bestimmung des Gier- und Nickwinkels weiter ausgearbeitet wird. Gründe dafür sind, dass ausschließlich die bereits vorhandene Produktionsumgebung als Referenz notwendig ist. Das Verfahren funktioniert ohne die Produktionsumgebung vorher zu vermessen und reduziert damit Instandhaltungsaufwände bei Veränderungen in der Produktionsumgebung. Außerdem wird das Verfahren aufgrund der vorhandenen Erfahrung im Kundenbetrieb als sehr genau eingestuft. Nachteilig sind jedoch die vergleichsweise hohe Komplexität des Verfahrens und die fehlende Möglichkeit zur Kalibrierung des Rollwinkels. Aufgrund des fehlenden Rollwinkelverfahrens werden zusätzlich die beiden Konzepte des künstlichen Horizonts und der Kantendetektion weiter ausgearbeitet. Gründe für diese Entscheidung sind ähnlich der ersten Auswahl die reduzierte Abhängigkeit zu Eigenschaften der Produktionsumgebung und eine hohe vermutete Genauigkeit der Verfahren.

	Optischer Fluss	Fahrzeugdetektion	Triangulation	Kantendetektion	Ebenenschätzer	Künstlicher Horizont
Genauigkeit	+	-	+	+	+	+
Betriebsmittel	+	+	-	+	o	+
Umgebungseinflüsse	o	o	-	o	-	o
Kosten	+	+	o	+	-	+
Komplexität	-	-	o	+	-	-
Umsetzbarkeit	+	-	+	+	o	o
Gesamtergebnis	+	-	-	+	-	+

Tabelle 8: Übersicht von Anforderungen und Kamerakalibrierkonzepten

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts auf Basis des optischen Flusses

Zur Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts wurden zunächst die benötigten Kamerasysteme ausgewählt. Die Ausarbeitung sollte möglichst an einem Kamerasystem durchgeführt werden, das den Eigenschaften zukünftiger Fahrzeugkamerasysteme entspricht. Damit soll die Entwicklung möglichst nah an einem zukünftigen Seriensystem erfolgen, das mit dem Inline Kalibrierverfahren in Betrieb genommen werden kann. Aus diesem Grund wurden die Eigenschaften älterer Fahrzeugkamerasysteme bis zum Stand der Technik zum Zeitpunkt dieser Arbeit betrachtet und Kameraentwickler nach Entwicklungstrends befragt. Bezüglich der Trends ist eine Zunahme des Öffnungswinkels und der Auflösung zu erwarten, wobei sich die Auflösung pro Grad Öffnungswinkel nur geringfügig verändert. Außerdem werden zukünftig mit höheren Stufen des automatisierten Fahrens immer mehr Sichtbereiche durch Kameras geschlossen, die bisher nicht verwendet wurden. Da eine zukünftige Fahrzeugkamera nicht für die Ausarbeitung zur Verfügung steht, wurde zunächst versucht, eine Industriekamera mit den gewünschten Eigenschaften zu verwenden, da diese anders als Kameras aus dem Verbrauchermarkt keine unbekannten Vorverarbeitungen des Bildes vornimmt, die für die Entwicklung störend sind. Jedoch konnte keine Industriekamera mit den gewünschten Eigenschaften gefunden werden. Die Diskrepanz zwischen den Eigenschaften verfügbarer

Industriekameras und den gewünschten Eigenschaften war zu groß. Aus diesem Grund wurden Kameras der Firma GoPro vom Typ Hero 3+ Black Edition und Hero 5 Black gewählt. Beide Kameras verfügen über einen großen Öffnungswinkel mit einer hohen Auflösung und lassen sich dank vielfältiger Befestigungsmöglichkeiten leicht und ohne Schäden an Kundenfahrzeugen in der Produktion anbringen, um Daten in der Produktion für die Entwicklung zu sammeln. Die beiden Kameras wurden im Bildserienmodus betrieben, um Einflüsse durch die Bildstabilisierung zu vermeiden, welche unerwünschte Auswirkungen auf die Kalibrierung bedeuten. Jedoch wurden auch Kameraerprobungsträger mit heutigen Kamerasystemen und aus Gründen der Wiederholbarkeit nicht nur Messungen in der Produktionslinie, sondern auch mit Robotersystemen im Labor durchgeführt.

Entwicklung des Kalibrierkonzepts auf Basis des optischen Flusses

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung des Kalibrierkonzepts auf Basis des optischen Flusses, die dafür verwendeten Funktionen aus OpenCV und deren Funktionsweise beschrieben. Zunächst werden Startpunkte für die Berechnung des optischen Flusses gesucht. Dafür werden mit der Funktion „goodFeaturesToTrack“ nach dem Kantendetektor von Shi und Tomasi sowie dem Harris Corner Detector nach geeigneten Startpunkten im Bild gesucht. Beide Algorithmen suchen nach Eckpunkten im Bild. Eckpunkte haben den Vorteil, dass sie anders als beispielsweise Punkte an Kanten eindeutig aus unterschiedlichen Perspektiven wiedergefunden werden können. Damit können aufgrund der Wahl geeigneter Punkte Detektionsfehler reduziert werden. Im Verfahren nach Chris Harris, welches von Shi und Tomasi weiterentwickelt wurde, werden dafür stark vereinfacht die Intensitäten umgebender Pixel miteinander verglichen. Dabei ergeben sich drei Fälle, die entsprechend folgender Abbildung 64 nach den Eigenwerten des Strukturtensors λ_1 und λ_2 klassifiziert werden können. Die Eigenwerte des Strukturtensors können vereinfacht als Grad der Veränderung von Intensitäten in jeweils eine Bildrichtung angesehen werden [Shi94] [Har88].

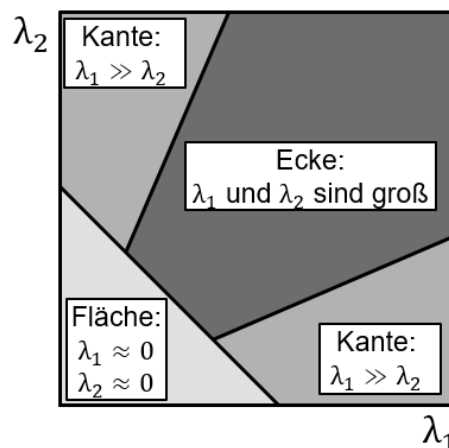


Abbildung 64: Klassifizierung anhand der Eigenwerte des Strukturtensors [Que20]

Eine Fläche hat die Eigenschaft, dass sich die Intensitäten in beide Richtungen nur geringfügig ändern. Deshalb sind die Eigenwerte des Strukturtensors λ_1 und λ_2 in diesem Fall klein und liegen im unteren linken Teil des Schaubilds. Eine Kante hat dagegen die Eigenschaft, dass sich die Intensitäten in nur eine Richtung signifikant ändern und bei einer Ecke ändern sich Intensitäten in beide Richtungen signifikant. Der Schwellwert, der den Übergang zwischen den Fällen definiert, muss experimentell bestimmt werden [Shi94] [Har88].

Um anschließend die Genauigkeit des Verfahrens zu verbessern, werden die Startpunkte mit Subpixelgenauigkeit bestimmt. Dafür berechnet die Funktion „cornerSubPix“ aus den zuvor bestimmten Eckpunkten die subpixelgenauen Koordinaten der Eckpunkte. Das Verfahren nach Förstner und Gülch basiert dafür auf der Analyse von Grauwerten innerhalb eines Abstandes um den Eckpunkt. Aus der Änderung der Intensität zwischen den Pixeln zu den Kanten können die Eckpunkte mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden [Gül87].

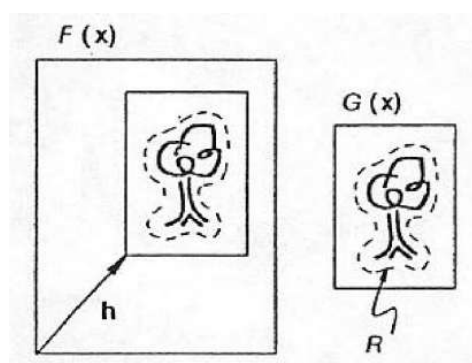


Abbildung 65: Beschreibung eines Bildteils über den Disparitätsvektor [Kan81]

Die Berechnung des optischen Flusses wird mit der Funktion „calcOpticalFlowPyrLK“ nach Lucas und Kanade durchgeführt [Kan81]. Wie in Abbildung 65 dargestellt, wird ein Bildteil $G(x)$, der in unserem Fall ein Bildausschnitt um die Eckpunkte darstellt, im gesamten Bild $F(x)$ der Produktionsumgebung gesucht. Dabei beschreibt x den Vektor zu jedem Pixelwert im Bild. Es gilt $G(x)=F(x+h)$, wobei h die Position des Bildausschnitts im Bild beschreibt, die sich durch die Bewegung der Kamera relativ zum detektierten Objekt verändert. Zusätzlich wird für die Berechnung von h ein Gebiet R ausgewählt. Die Reduktion des Suchbereichs auf ein Gebiet des Bildes dient dazu, Probleme einer Verdeckung zu umgehen sowie die Berechnungszeit zu reduzieren.

Programmierung des Kalibrierkonzepts auf Basis des optischen Flusses

Wie bereits in der Entwicklung beschrieben, beginnt der Programmablauf mit dem Einlesen des ersten Grauwertbildes sowie der Reduktion des zu analysierenden Bildbereichs um eigene Fahrzeugteile, wie beispielsweise die eigene Haube. Dies ist wichtig, da es sonst zu Reflexionen der Umgebung in den Fahrzeugteilen kommen kann, welche zu fehlerhaften Flussvektoren führen können. Dies wird durch das Schwärzen des Bereichs umgesetzt. Anschließend folgt die Untersuchung des Bildes nach Startpunkten. Dabei wird die maximale Anzahl an Eckpunkten sowie ein Mindestabstand zwischen den Punkten definiert. Letzteres ist wichtig, um Punkte im gesamten Bildbereich zu finden und keine Punkthaufen zu generieren. Im Anschluss daran werden die Startpunkte, die sich nah an der Kante der geschwärzten Region befinden, verworfen und die Startpunkte mit Subpixelgenauigkeit bestimmt. Nachdem die Startpunkte bestimmt wurden, wird das nächste Bild geladen und um dieselbe Bildregion reduziert. Der Bildabstand sollte dabei je nach Bandgeschwindigkeit und Bildwiderholfrequenz festgelegt werden. Dabei sollte die Vektorlänge nicht zu kurz und auch nicht zu lang gewählt werden. Denn sind die Vektoren zu kurz, erhöht sich der Fehlereinfluss durch die Erkennungsgenauigkeit der Punkte. Sind die Vektoren zu lang, unterscheiden sich die Bilder zu stark voneinander, sodass die Wiedererkennung der Punkte ungenauer wird. In einer Messreihe dazu wurden die besten Ergebnisse mit einem Bildabstand von ca. 10 bis 15 cm erzielt. Es folgt die Berechnung des optischen Flusses entsprechend der Startpunkte aus dem ersten Bild. Als Rückgabewerte werden die Endpunkte der Flussvektoren, eine Statusvariable, die angibt, ob der Punkt wiedergefunden wurde und ein Fehlerwert, der die Genauigkeit des wiedergefundenen Punktes angibt, rückgemeldet. Mithilfe der Statusvariablen und

der Fehlerwerte werden anschließend nicht wiedergefundene Punkte sowie Punkte mit einem zu hohen Fehlerwert aussortiert. Der optische Fluss wird nicht nur über zwei, sondern über fünf Folgebilder bestimmt und anschließend aus der Kette an Flussvektoren eine Regressionsgerade berechnet. Zur Anzahl der Bilder für eine Regressionsgerade wurde ebenfalls eine Messreihe durchgeführt, die für fünf bzw. sechs Folgebilder die besten Ergebnisse erzielt hat.

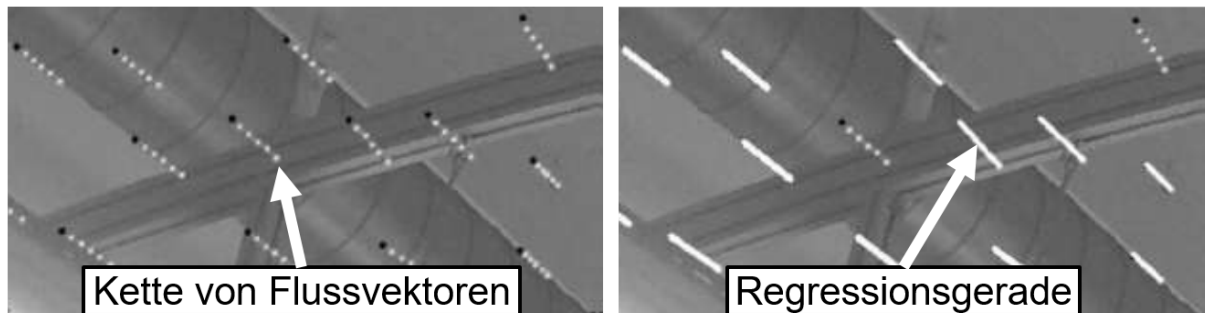


Abbildung 66: Bildausschnitt mit Flussvektoren aus fünf Folgebildern [Que20]

In Abbildung 66 ist derselbe Bildausschnitt links mit einer Kette von Flussvektoren aus einem dunklen Startpunkt und den 5 weißen Folgepunkten und rechts als weiße Regressionsgerade dargestellt. Es wurden nicht alle Flussvektoren als Regressionsgerade dargestellt, da nicht alle Flussvektoren geeignet sind. Dies wird durch die Filterung der Vektoren erreicht. So wird zunächst nach der Länge der Vektoren gefiltert. Grundsätzlich sind längere Vektoren für die Berechnung besser geeignet, als kurze Vektoren, weshalb zu kurze Vektoren ausgefiltert werden. Es werden jedoch auch zu lange Vektoren ausgefiltert, da sie sowohl eine Fehldetektion als auch eine Detektion einer sehr nahen Referenz im Bildrandbereich bedeuten können, die typischerweise durch Werker oder bewegliche Gegenstände wie Werkstattwagen entstehen können. Außerdem dient die Kette von Flussvektoren als weitere Möglichkeit zum Filtern. So wird ein Maximalwert für die Abweichung der Punkte von der Regressionsgeraden definiert und damit die Krümmung einer Kette an Flussvektoren begrenzt. Außerdem kann die Bewegung eines detektierten Objekts bzw. die Beschleunigung des Montagebandes anhand der Länge der Flussvektoren bestimmt werden. Im Idealfall besitzen die Flussvektoren einer Kette gleiche Längen. Liegt eine Beschleunigung des Bandes oder eine Bewegung der Referenz vor, besitzen die Vektoren einer Kette in der Regel unterschiedliche Längen. Außerdem

wird die Richtung der Vektoren für einen Filter verwendet. Ideale Flussvektoren sind entgegen der Bewegungsrichtung im Bild ausgerichtet. Flussvektoren, die beispielsweise durch Reflexionen der Hallenbeleuchtung entstehen, charakterisiert typischerweise eine Ausrichtung in eine andere Richtung. Anhand einer sogenannten Region of Interest kann ein Filtern erfolgen. Die Region in Form eines Rechtecks wird durch die Verbautoleranzen in der Horizontalen für den Gier-, in der Vertikalen für den Nickwinkel sowie durch die Lage des Fahrzeugs zur konstruktiven Soll-Lage als Rechteck definiert. Für den Filter werden die Vektoren anschließend entgegen ihrer Richtung verlängert und weiterverwendet, sofern sie die Region of Interest schneiden. Hierbei muss jedoch der Sonderfall berücksichtigt werden, dass eine Kamera nicht richtig verbaut wird und Kalibrierwinkel außerhalb der Verbautoleranzen liegen. Dies wird durch den Anteil an Flussvektoren bestimmt, welche die Region of Interest nicht schneiden. Beträgt dieser Wert mindestens die Hälfte aller Vektoren, so ist von einem Fehlverbau auszugehen und die Kamera sollte überprüft sowie ggf. nachgearbeitet werden.

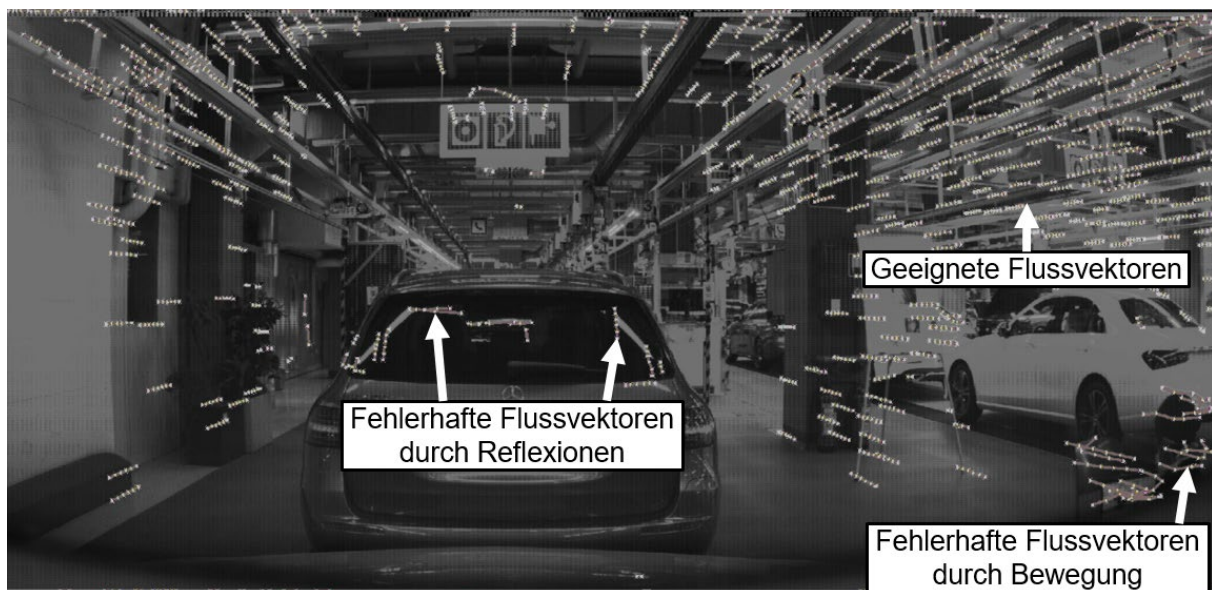


Abbildung 67: Flussvektoren im Produktionsumfeld ohne Maskierung

In Abbildung 67 sind bewusst keine Bildbereiche reduziert worden, sodass fehlerhafte Vektoren aus Reflexionen im Bereich des vorausfahrenden Fahrzeugs sichtbar sind. Außerdem wurde am rechten unteren Seitenrand eine Person abgebildet, die sich während der Aufnahmen bewegt hat. Dies ist anhand der Krümmung und der unterschiedlichen Länge der Vektoren erkennbar. Das Verfahren nutzt durch die Filter

Personen als Referenzpunkte, wenn sie sich nicht oder nur im Rahmen der Toleranzen bewegen und damit für die Kalibrierung geeignet sind.

Sobald die Regressionsgeraden bestimmt wurden, werden die Schnittpunkte der Regressionsgeraden berechnet. Hierbei werden nur Regressionsgeraden verwendet, die sich mit einem bestimmten Schnittwinkel schneiden. Der Grund dafür wird im Folgenden hergeleitet.

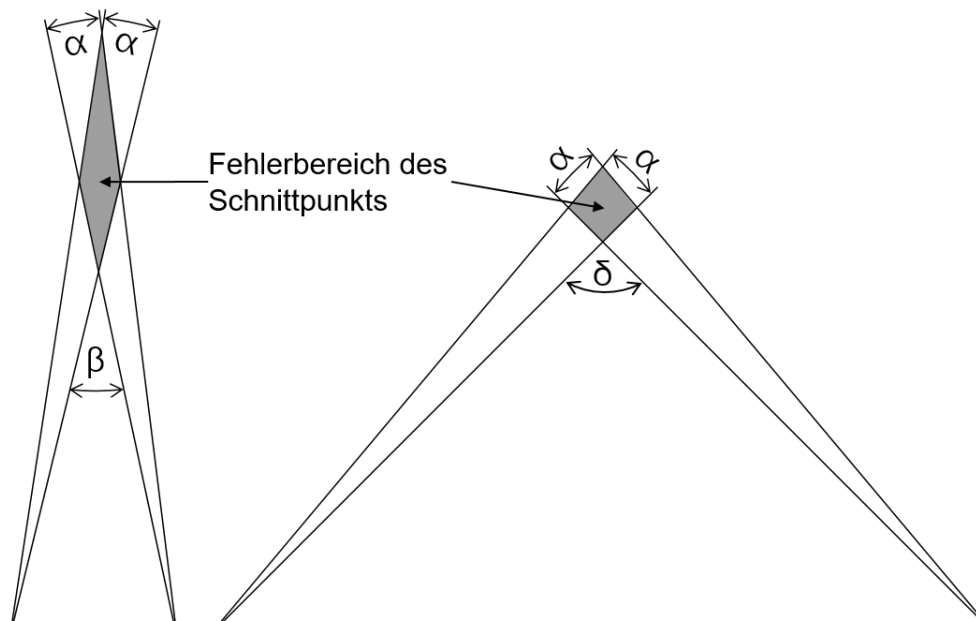


Abbildung 68: Fehlerbetrachtung bei der Berechnung des Schnittpunkts

In Abbildung 68 wird die Fehlerbetrachtung in Bezug auf den Schnittwinkel dargestellt. Darin wird aus Darstellungsgründen beispielhaft von jeweils zwei Regressionsgeraden mit der gleichen Genauigkeit von $\alpha = 5^\circ$ ausgegangen. Die beiden Regressionsgeraden je Seite stellen dabei die äußersten Geraden innerhalb der Genauigkeit je Seite dar. Schneiden sich die Regressionsgeraden wie im linken Beispiel dargestellt, in einem spitzen Winkel β , so vergrößert dies die Länge oder Breite des möglichen, grau dargestellten Fehlerbereichs des Schnittpunktes je spitzer der Winkel wird. Die Ausdehnung des Fehlerbereichs ist für das Gesamtergebnis relevant, weil die Länge und Breite des Fehlerbereichs als möglicher Fehlerbereich des Nick- und Gierwinkels angesehen werden. Schneiden sich die beiden Regressionsgeraden jedoch wie im Idealfall auf der rechten Seite dargestellt, mit $\delta \approx 90^\circ$, so wird die Länge und Breite des ebenfalls grau dargestellten Fehlerbereichs etwa gleich groß und damit verglichen mit dem linken Beispiel minimal. Nach diesem

Ansatz ist auch eine Gewichtung für die Berechnung der Schnittpunkte nach deren Schnittwinkel zur Berechnung des Fluchtpunktes möglich.

Mit den berechneten Schnittpunkten wird im Anschluss ein Histogramm gebildet und daraus das Maximum der Gauß-Verteilung bestimmt. Das Maximum der Gauß-Verteilung wird als Fluchtpunkt oder Bewegungsrichtung des Fahrzeugs in der Bildebene angenommen. Die Kalibrierwerte für den Gierwinkel Ψ und den Nickwinkel θ berechnen sich wie folgt aus der horizontalen Bildkoordinate x_{Bild} , der vertikalen Bildkoordinate y_{Bild} , der konstruktiven Soll-Lage der Kamera (x_{Soll}/y_{Soll}), der Kameraauflösung ($x_{Auflösung}/y_{Auflösung}$) und dem Öffnungswinkel ($x_{\text{Öffnungswinkel}}/y_{\text{Öffnungswinkel}}$).

$$\Psi = (x_{Bild} - x_{Soll}) * \frac{x_{\text{Öffnungswinkel}}}{x_{Auflösung}} \quad \text{Gl. 30}$$

$$\theta = (y_{Bild} - y_{Soll}) * \frac{y_{\text{Öffnungswinkel}}}{y_{Auflösung}} \quad \text{Gl. 31}$$

Liegt also beispielsweise die konstruktive Soll-Lage der Bewegungsrichtung in der Mitte des Bildes, so wird die horizontale und vertikale Differenz zwischen der ermittelten Bewegungsrichtung und der Bildmitte bestimmt und jeweils mit dem Öffnungswinkel geteilt durch die Auflösung multipliziert, um die Kalibrierwerte zu berechnen.

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts auf Basis des künstlichen Horizonts

Das Kalibrierkonzept des künstlichen Horizonts stellt eine Erweiterung des Prinzips des optischen Flusses dar und soll es ermöglichen, zusätzlich den Rollwinkel zu bestimmen. Dieser kann mit dem zuvor ausgearbeiteten Konzept des optischen Flusses nicht ermittelt werden. Ansatz dafür ist die Zerlegung der Flussvektoren in ihre horizontalen und vertikalen Komponenten relativ zur Bildebene wie in folgender Abbildung 69 an einem Flussvektor beispielhaft dargestellt.

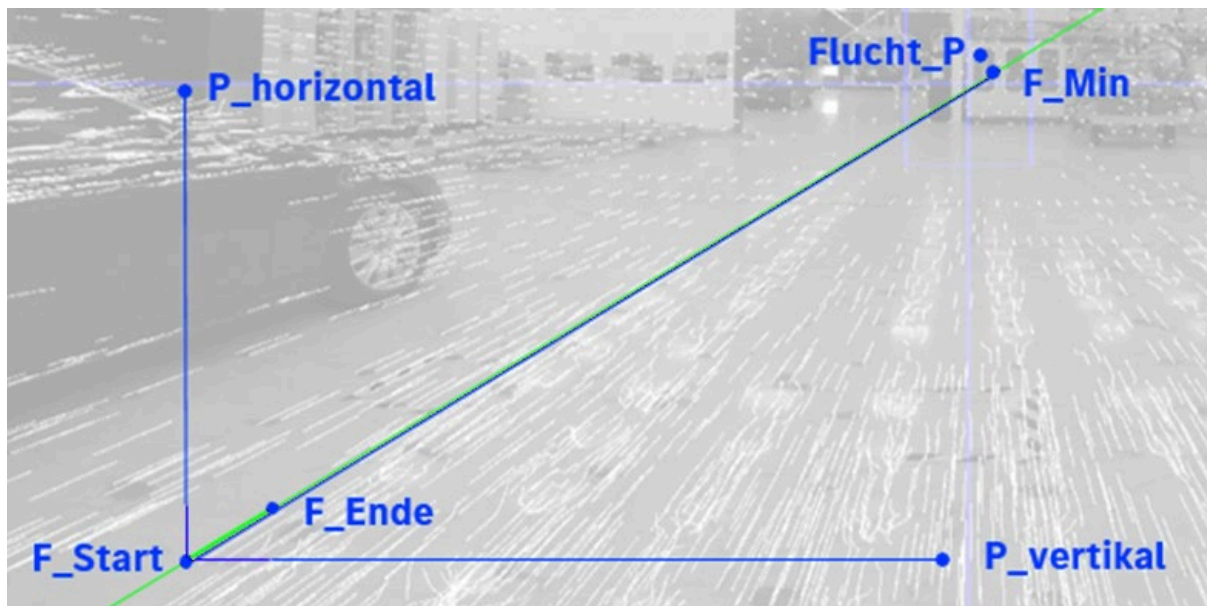


Abbildung 69: Ansatz des künstlichen Horizonts

Für die Berechnung eines künstlichen Horizonts bzw. einer künstlichen Vertikalen müssen die Komponenten des Fluchtvektors noch jeweils um einen vektorindividuellen Faktor verlängert werden. Dies ist notwendig, da die Flussvektoren in ihrer Länge je nach ihrem Abstand vom Fluchtpunkt und dem Abstand des Referenzpunkts zur Kamera variieren. Die horizontalen bzw. vertikalen Punkte (in Abbildung 69: $P_{\text{horizontal}}$ bzw. P_{vertikal}) werden anhand des nächsten Punktes (in Abbildung 69: F_{min}) des verlängerten Flussvektors zum Fluchtpunkt bestimmt. Für die Bestimmung wird jeweils ein Teil der Punktkoordinate vom Startpunkt des Flussvektors und der andere Teil vom nächsten Punkt zum Fluchtpunkt übernommen. Anschließend werden die ermittelten Punkte jeweils zu einer künstlichen Horizontalen und einer künstlichen Vertikalen gesammelt sowie aus den vielen resultierenden Punkten jeweils eine Gerade angenähert. Der Winkel zwischen den so ermittelten Geraden und der korrespondierenden Horizontalen bzw. Vertikalen des Bildes entspricht dem Rollwinkel.

Bereits bei den ersten Tests im Roboterlabor hat sich herausgestellt, dass das entwickelte Verfahren zwar wiederholgenaue Werte liefert, jedoch eine definierte Bewegung quer zur Fahrzeuglängsachse benötigt, um zu funktionieren. Leider gibt es im Bereich des Fahrwerksbandes nicht in jeder Halle eine quer zur Fahrzeuglängsachse bewegende Fördertechnik, weshalb ein anderes Verfahren für die Rollwinkel benötigt wird.

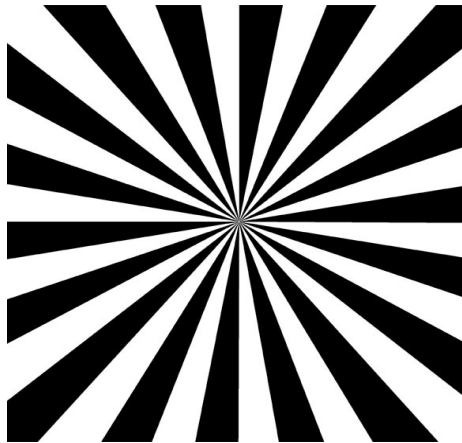


Abbildung 70: Siemensstern [Weh03]

Der Grund dafür kann mit Hilfe eines Siemenssterns wie in Abbildung 70 erklärt werden. Die Strahlen des Siemenssterns sollen dabei ideale Flussvektoren in einem Raum darstellen, wobei das Zentrum des Siemenssterns dem Bildmittelpunkt der Kamera und der Bewegungsrichtung entspricht. Wird die Kamera um den Bewegungsvektor gedreht, sieht das Bild nach wie vor gleich aus, weil es rotationssymmetrisch ist. Dies ist nicht der Fall, wenn der Fluchtpunkt nicht in der Bildmitte liegt. Deshalb kann das entwickelte Verfahren für die Onlinekalibrierung und die Kalibrierung im Aftersales beispielsweise bei einer Kurvenfahrt verwendet werden. Heutige Kalibrierverfahren stoßen dabei oft an ihre Grenzen. Außerdem kann anhand des ermittelten Faktors der Flussvektoren vermutlich auf den Abstand der Kamera zum detektierten Punkt geschlossen werden und damit eine Art Tiefenkarte mit einer Monokamera erstellt werden. Ein entsprechender Effekt wurde bei den Entwicklungen beobachtet, jedoch mangels Relevanz für diese Arbeit nicht weiterverfolgt.

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts Ebenenschätzer

Die Ausarbeitung des Konzepts des Ebenenschätzers beginnt mit der Definition der Region of Interest, wodurch fehlerhafte Detektionen am eigenen oder einem benachbarten Fahrzeug vermieden werden. Es folgt die Berechnung der Homographiematrix. Damit wird auf Basis der Annahme, dass die Bodenebene im Produktionsumfeld eben ist, der Roll- und Nickwinkel bestimmt. Dafür werden zwei Bilder verwendet. Für das Verfahren wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, um herauszufinden, in welchem zeitlichen und damit auch räumlichem Abstand die Bilder

zueinander aufgenommen werden. Die Aufnahmen wurden sowohl im Roboterlabor als auch in der Produktionslinie durchgeführt. Dabei hat die Bildfolge mit einem Abstand von zwei Bildern die besten Ergebnisse erzielt und wurde für das Verfahren verwendet [Schl21].

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts Kantendetektion

Die Ausarbeitung des Konzepts der Kantendetektion beginnt ebenfalls mit der Definition der Region of Interest. Anschließend wird das Bild in ein Binärbild konvertiert und die Parameter für die Hough Line Transformation definiert [Hou62]. Die zugehörige OpenCV-Funktion liefert die Start- und Endpunkte der Kanten, aus denen dann die Winkel der Kanten im Bild berechnet werden. Anschließend werden Kanten in einem Winkel außerhalb des Bereichs von $\pm 5^\circ$ um die Horizontale und Vertikale des Bildkoordinatensystems ausgefiltert. Dieser Filterbereich schließt noch die meisten Fälle mit ein, die durch Fehlbau entstehen können. Abschließend folgt die Berechnung des Durchschnittswinkels der horizontalen und vertikalen Kanten. Die berechneten Durchschnittswinkel werden als Horizontale bzw. Vertikale angenommen und die Abweichung zur Bildhorizontalen bzw. Bildvertikalen berechnet. Der Mittelwert aus beiden Abweichungen entspricht abschließend dem Kalibrierwert des Rollwinkels [Schl21].

Ergebnis der ausgearbeiteten Kamerakalibrierkonzepte

Abschließend eignet sich die Ausarbeitung des Kalibrierverfahrens nach dem Prinzip des optischen Flusses für den Gier- und Nickwinkel sowie die Ausarbeitung des Ebenenschätzers und der Kantendetektion für den Rollwinkel für die Anwendung als Inline Inbetriebnahmeverfahren. Lediglich das Verfahren zur Bestimmung des künstlichen Horizonts eignet sich dafür nicht, jedoch ist es für die Online Kalibrierung interessant aufgrund der Nachteile heutiger Verfahren. Die geeigneten Konzepte werden validiert und die Ergebnisse in Kapitel 9 beschrieben.

6 Inline Lidarkalibrierverfahren

6.1 Planung des Inline Lidarkalibrierverfahrens

Im Rahmen des Entwicklungsschrittes Planung und Klären werden ähnlich zum Kamerakalibrierverfahren zunächst aus den allgemein ermittelten Anforderungen, die lidarspezifischen Anforderungen des Inline Lidarkalibrierverfahrens abgeleitet.



Abbildung 71: Lidar Sensor [Lev22]

Das Lidar Kalibrierverfahren wird im Rahmen dieser Arbeit für unterschiedliche Verbaupositionen entwickelt. So wird einerseits die Verbauposition im Frontend des Fahrzeugs, andererseits auch ein Verbau im Dachbereich wie in Abbildung 71 dargestellt, untersucht. Beide Verbaupositionen stellen zum Zeitpunkt der Arbeit gängige Verbaupositionen für Lidar Sensoren dar.

Anforderungen an das Inline Lidarkalibrierverfahren

Auch für die Entwicklung des Inline Lidarkalibrierverfahrens werden aus den gesammelten Anforderungen des Gesamtverfahrens einzelne Anforderungen höher gewichtet. Hierbei sei die targetlose Kalibrierung aller drei Raumwinkel im Rahmen der relativen Genauigkeit genannt. Außerdem soll das Verfahren beide Verbaupositionen ermöglichen und mit den Störeinflüssen der Produktion sowie einem potentiell eingeschränkten Sichtfeld funktionieren. Letzteres ist speziell für Sensoren in der Front und im Heck des Fahrzeugs wichtig, weil die Sicht in der Produktionsumgebung durch benachbarte Fahrzeuge eingeschränkt ist. Abschließend wird die Übertragbarkeit in andere Produktionsumgebungen gefordert, um das Verfahren möglichst ohne Anpassungen in sämtlichen Werken verwenden zu können.

6.2 Entwurf des Inline Lidarkalibrierverfahrens

In diesem Abschnitt sollen Kalibrierkonzepte für den Lidarsensor gesammelt, weiterzuverfolgende Konzepte ausgewählt und ausgearbeitet werden. Aus diesem Grund werden im Anschluss Kalibrierkonzepte vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile erläutert. Dabei wird versucht, möglichst die Stärken des Lidarsensors für die Entwicklung des Inline Kalibrierverfahrens zu nutzen und die Schwächen des Sensors zu vermeiden. Als Stärke ist beim Lidarsensor zunächst die Möglichkeit der dreidimensionalen Umgebungswahrnehmung genannt. Außerdem kann der Lidarsensor als aktiver Sensor in seiner Konfiguration für den Verwendungszweck in der Montagelinie optimiert werden. So wird anders als im Straßenverkehr, wo hohe Geschwindigkeiten und damit eine höhere Sensorwiederholfrequenz gefordert wird, in der Produktionsumgebung eine möglichst hohe Auflösung und dafür eine niedrigere Sensorwiederholfrequenz präferiert. Die Erkenntnisse aus dem Bereich der Kamerakalibrierverfahren können aufgrund der niedrigeren Auflösung des Lidarsensors nur bedingt verwendet werden. Wichtig für die Konzeptfindung ist bezüglich des Öffnungswinkels des Lidarsensors, dass dieser selbst bei der Verbauposition im Frontend und einem Meter Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug noch die Produktionsumgebung erfassen kann.

Konzepte für das Inline Lidarkalibrierverfahren

Kalibrierkonzept Ebenenschätzer

Ähnlich wie das gleichnamige Verfahren bei den Kamerasystemen nutzt dieses Kalibrierverfahren die Bodenebene in der Produktionsumgebung zur Kalibrierung. Unter der Annahme, dass die Bodenebene weitestgehend frei von Unebenheiten ist, soll diese in der Punktwolke des Lidarsensors erkannt und anschließend der Normalenvektor zur Bodenebene berechnet werden. Abschließend wird wie in folgender Abbildung 72 dargestellt, die Lage des Sensorkoordinatensystems relativ zum Normalenvektor bestimmt, woraus Nick- und Rollwinkel bestimmt werden können.

Kalibrierkonzept Iterative Closest Point (ICP)

Seite 109

Wie in Abbildung 73 stark abstrahiert als eine Ebene der Lidarpunktwolke dargestellt, können Bereiche der Produktionsumgebung in beiden Punktwolken wiedergefunden werden. Anhand dieser Bereiche kann im Folgenden auf die Bewegung des Fahrzeugs zwischen den beiden Standorten des Fahrzeugs zwischen den Aufnahmen geschlossen werden. Durch die Anwendung des Iterative Closest Point Verfahrens werden die beiden Punktwolken durch Translation und Rotation überlagert. Dabei wird jeweils der geringste Abstand zum nächsten Punkt der anderen Punktwolke bestimmt und in Richtung des Minimums der Summe aller Abstände optimiert. Die Translation und Rotation zwischen den beiden Punktwolken entspricht der Bewegung im Band zwischen den beiden Aufnahmen. Daraus wird wie in folgender Abbildung 74 der Gierwinkel Ψ relativ zur Bewegungsrichtung bestimmt [Bey21].

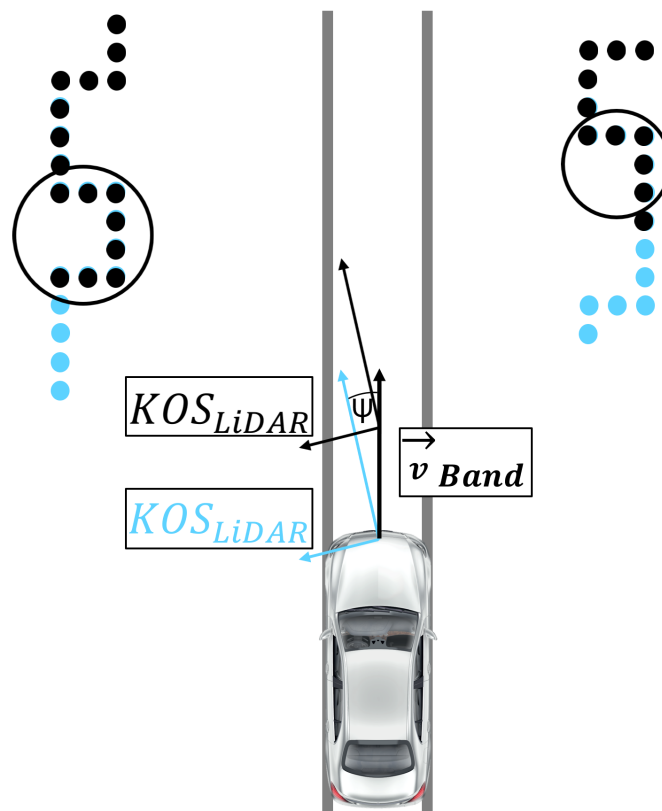


Abbildung 74: Bewegungsvektor im Montageband [vgl. Bey21]

Kalibrierkonzept Unschärfeverfahren

Die Idee des Kalibrierkonzeptes stammt aus dem Bereich der Lidarentwicklung. Dabei wird der Effekt genutzt, dass Winkelfehler in der Umgebungserkennung einen variablen absoluten Fehler in Abhängigkeit des Abstandes zum detektierten Objekt ergeben [Sch21].

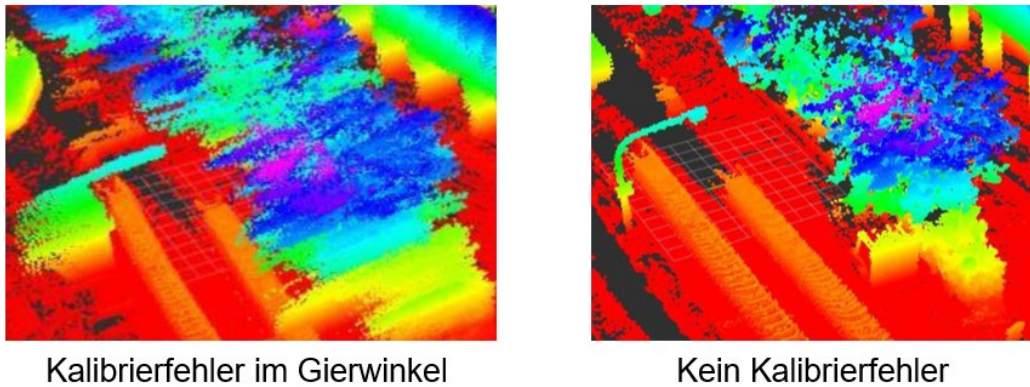


Abbildung 75: Unschärfeverfahren am Beispiel des Lidarsensors [Sch21]

In Abbildung 75 ist ein innerstädtisches Szenario abgebildet, bei dem Punktwolken aus unterschiedlichen Perspektiven akkumuliert wurden. Die unterschiedlichen Farben ergeben sich aus der Höhe über dem Boden beginnend mit rot für den Bereich der Straßenebene. Im linken Teil der Abbildung wurde künstlich ein Kalibrierfehler im Gierwinkel erzeugt. Dieser sorgt im Gegensatz zum rechten Teil der Abbildung ohne Kalibrierfehler dafür, dass große Abstände zu detektierten Objekten einen größeren absoluten Fehler und kleine Abstände einen kleineren absoluten Fehler bedeuten. Werden die Punktwolken mit unterschiedlichem Abstand zu den Objekten zu einer Punktwolke akkumuliert, so ergeben sich dadurch Effekte, die mit Unschärfe vergleichbar sind. Im Fall des simulierten Fehlers im Gierwinkel sind diese Effekte in der Horizontalen, also als Rotation um die Hochachse, ausgeprägt. Der Kalibrierprozess funktioniert in diesem Fall als Optimierungsfunktion, dessen Ziel ein möglichst scharfes Bild ist. Dies kann im Fall des Lidarsensors durch eine Unterteilung des Raumes in Teilräume geschehen. Anschließend wird die Anzahl an Teilräumen, in denen Punkte des Lidarsensors vorhanden sind, gezählt und als Zielgröße verwendet. Wenn die Anzahl durch Punkte belegter Teilräume minimal ist, liegt ein maximal scharfes Bild vor, da Unschärfe mehr Platz im Raum einnimmt. Eine weitere Möglichkeit mit diesem Effekt die Unschärfe zu minimieren, ist die Verwendung der Zielgröße der Punktedichte. Dafür kann beispielsweise die durchschnittliche Anzahl an Punkten in einem definierten Abstand um einen Punkt berechnet und die Kalibrierwerte zum Maximum hin optimiert werden, denn die Unschärfe ist minimal, wenn die Punktedichte maximal ist. Dadurch, dass dieser Ansatz ein möglichst großes Set an Umgebungsdaten aus unterschiedlichen Perspektiven benötigt, ist eine Berechnung erst nach dem Passieren der Umgebung sinnvoll. Außerdem sind Objekte, die aus

einer großen Varianz an Entfernungen detektiert wurden vorteilhaft, da sie aufgrund der Sensorgenauigkeit bestmögliche Ergebnisse erzielen. Auch lässt sich der Rechenaufwand reduzieren, indem nur die Punkte aus nahen und fernen Detektionen verwendet werden. Unsicherheiten lassen sich ebenfalls reduzieren, indem beispielsweise bewegte sowie bewegliche Objekte aus der Berechnung entfernt werden können. Dabei besteht die Möglichkeit, fehlerhafte Daten zu erhalten, die wiederum das Kalibrierergebnis verfälschen [Sch21].

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts Ebenenschätzer

Das Kalibrierkonzept Ebenenschätzer funktioniert ähnlich wie andere Kalibrierverfahren zur Ebenenschätzung der Kamera mit mehreren Iterationen i_{\max} des im Folgenden beschriebenen Ablaufs. Hintergrund ist, dass der Einfluss lokaler Unebenheiten des Hallenbodens sowie Abweichungen durch Messrauschen durch mehrere Messungen an unterschiedlichen Stellen minimiert werden. Das abschließende Ergebnis wird durch die Berechnung des Mittelwertes über die Einzelwerte bestimmt. Im Rahmen der Definition der Variablen wird zunächst die maximale Anzahl an zu durchlaufenden Iterationen festgelegt. Im Anschluss an das Verfahren wird geprüft, ob alle Iterationen erfolgreich durchlaufen wurden und Punkte enthalten waren. Anschließend wird aus der gesamten Punktwolke die gesuchte Bodenebene extrahiert. Dazu wird aufgrund der Kenntnis der Verbauhöhe und Verbautoleranzen ein Quader gebildet, in dem sich die gesuchte Bodenebene befinden sollte. Im Folgenden wird die Ebene gesucht, dafür wird ein Random Sample Consensus (RANSAC) Algorithmus verwendet. Dabei wird zufällig nach drei Punkten gesucht, daraus eine Ebene aufgespannt und ermittelt, wie viele Punkte der Punktwolke innerhalb eines bestimmten Abstandes zu dieser Ebene liegen. Aus der Anzahl von Punkten, die in der Ebene liegen, wird das Maximum gesucht. Die Ebene, in der die größte Anzahl von Punkten liegt, wird als Bodenebene angenommen. Zusätzlich wird die gefundene Ebene auf ihren Winkel zum Sensorkoordinatensystem hin überprüft, um Verwechslungen mit anderen Ebenen wie Wänden auszuschließen. Dafür wird ein Wertebereich von kleiner 10° zur Z-Achse des Sensorkoordinatensystems zugelassen. Dieser Wertebereich schließt noch Werte ein, die beispielsweise durch einen möglichen Fehlverbau entstehen. Mit dem Normalenvektor der berechneten Ebene und der Z-Achse des Sensorkoordinatensystems wird

anschließend die Transformationsmatrix T nach der Roll-, Nick- und Gierwinkel Konvention zueinander wie folgt berechnet [Bey21].

$$T = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 32}$$

Die Elemente der Transformationsmatrix ergeben sich dabei wie folgt aus den Abbildungsmatrizen der drei Raumwinkel ψ_l , Φ und Θ [Bey21].

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Phi) & \sin(\Phi) \\ 0 & -\sin(\Phi) & \cos(\Phi) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\Theta) & 0 & -\sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\Psi_l) & \sin(\Psi_l) & 0 \\ -\sin(\Psi_l) & \cos(\Psi_l) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 33}$$

$$T = \begin{pmatrix} \cos\theta * \cos\Psi_l & \cos\theta * \sin\Psi_l & -\sin\theta \\ \sin\Phi * \sin\theta * \cos\Psi_l - \cos\theta * \sin\Psi_l & \sin\Phi * \sin\theta * \sin\Psi_l + \cos\theta * \cos\Psi_l & \sin\Phi * \cos\theta \\ \cos\Phi * \sin\theta * \cos\Psi_l + \sin\Phi * \sin\Psi_l & \cos\Phi * \sin\theta * \sin\Psi_l - \sin\Phi * \cos\Psi_l & \cos\Phi * \cos\theta \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 34}$$

In der Transformationsmatrix beschreibt Ψ_l die lokale Rotation zur Ausrichtung des Lidar Koordinatensystems zum Normalenvektor des Bodens und nicht den Gierwinkel, weil der Gierwinkel mit diesem Verfahren aufgrund der Rotationssymmetrie des Lidarsensors zur Bodenebene nicht bestimmt werden kann. Mit der Transformationsmatrix kann anschließend wie folgt der Nickwinkel θ und der Rollwinkel Φ berechnet werden [Bey21].

$$\theta = -\arcsin(R_{13}) \quad \text{Gl. 35}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{R_{23}}{R_{33}}\right) \quad \text{Gl. 36}$$

Bei der Berechnung wird die Arcustangensfunktion atan2 verwendet, um die Vorzeichen einzubeziehen und das Ergebnis im korrekten Quadranten auszugeben. Abschließend wird wie eingangs beschrieben der Mittelwert beider Winkel gebildet und die Ergebnisse werden ausgegeben [Bey21].

$$\bar{\theta} = \frac{1}{i_{\max}} \sum_{i=1}^{i_{\max}} \theta_i \quad \text{Gl. 37}$$

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{i_max} \sum_{i=1}^{i_max} \Phi_i \quad \text{Gl. 38}$$

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts Iterative Closest Point (ICP)

Ähnlich wie für das zuvor beschriebene Verfahren wird für das ICP-Verfahren ebenfalls eine Mittelwertbildung über die Ergebnisse mehrerer Paare an Punktwolken durchgeführt. Zunächst werden dazu die Punktwolken eingelesen und gefiltert. Dabei werden dynamische Objekte wie beispielsweise das eigene Fahrzeug sowie benachbarte Fahrzeuge und bewegte Werker entfernt. Zusätzlich werden Ausreißer herausgefiltert, die eine geringe Auflösung aufweisen und deshalb für den Registrierungsprozess eine geringe Relevanz aufweisen. Die Auflösung wird hier durch die Anzahl benachbarter Punkte in einem bestimmten Abstand zu einem Punkt bestimmt. Mit den so gefilterten Punktwolken folgt zunächst die grobe Registrierung. Sie ist notwendig, da bei der feinen Registrierung die Gefahr besteht, zu einem lokalen statt zum globalen Minimum hin zu optimieren. Für die grobe Registrierung wird der Sample Consensus Initial Alignment Algorithm (SAC-IA) verwendet. Dieser Ansatz untersucht Korrespondenzen von lokalen Minima, um sich dem globalen Minimum anzunähern. Dabei wird die Nachbarschaft jedes Punktes verwendet, um die vorliegende Oberfläche anzunähern und den Normalenvektor jedes Punktes zu bestimmen. Dafür werden Fast Point Feature Histogram (FPFH) Deskriptoren verwendet. Anhand der Ausrichtung des Normalenvektors, der Krümmung der angenäherten Oberfläche sowie der relativen Abstände benachbarter Punkte wird die Umgebung jedes Punktes beschrieben. Der SAC-IA Algorithmus nutzt die FPFH-Deskriptoren und vergleicht zufällig gewählte Korrespondenzen in den beiden Punktwolken, wodurch eine Transformation und Fehlerfunktion berechnet werden. Um bestmögliche Korrespondenzen finden zu können, wird die maximale Distanz zweier Korrespondenzen beschränkt und ist minimal größer als die räumliche Distanz beider Punktwolken. Die Korrespondenzen, mit denen die Fehlerfunktion minimiert werden, berechnen die Transformation T_{SAC} , die in folgender Form vorliegen. Sie enthält eine 3x3 Rotationsmatrix und einen 3x1 Translationsvektor.

$$T_{SAC} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & v_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & v_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 39}$$

Die 3x3 Rotationsmatrix entspricht nahezu einer Einheitsmatrix, da unter idealen Bedingungen einer linearen Bandbewegung eine reine Translation und keine Rotation vorliegt. Mit dieser Beschreibung werden die Korrespondenzen beider Punktwolken bestimmt und als Startgröße an das ICP Verfahren weitergegeben [Bey21] [Die15] [Rus09].

Nachdem die grobe Registrierung durchgeführt wurde, wird das ICP-Verfahren angewandt, um mit dem iterativen Verfahren eine weitere Optimierung zu erreichen. Die Iterationsschritte können wie folgt beschrieben werden:

1. Bestimmung des Abstandes d_i jedes Punktes in der Ausgangspunktwolke zum nächsten Punkt der Zielpunktwolke
2. Berechnung der Transformation, um den Abstand korrespondierender Punkte zu minimieren
3. Transformation der Ausgangspunktwolke entsprechend der in Punkt 2 berechneten Ergebnisse

Das iterative Verfahren wird so lange wiederholt, bis eine optimale Überlagerung beider Punktwolken vorliegt [Bes92]. Die Abstandsbestimmung im ersten Schritt ermöglicht mehrere verschiedene Ansätze des ICP-Verfahrens.

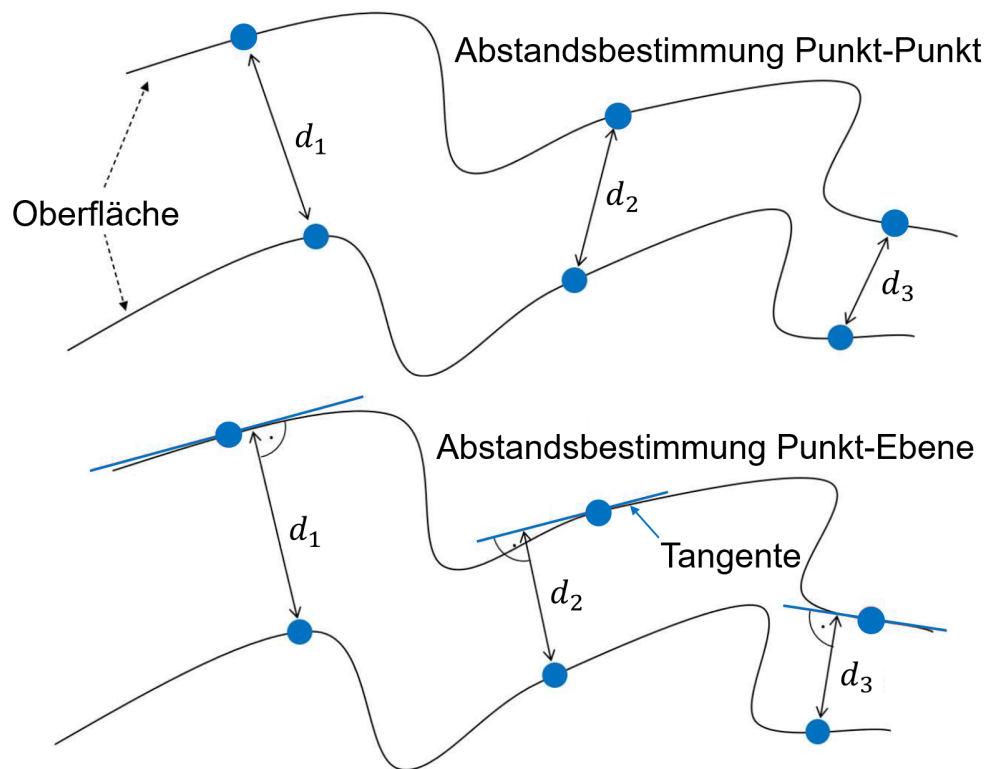


Abbildung 76: Abstandsbestimmung des klassischen ICP-Verfahrens [vgl. Bey21]

In Abbildung 76 ist wie im ursprünglichen Verfahren die Möglichkeit dargestellt, den direkten Abstand Punkt zu Punkt zu berechnen. Ebenso gibt es die Punkt zu Ebene Metrik, wobei der Abstand zur tangierenden Ebene berechnet wird [Low04]. Als logische Weiterführung der beiden Verfahren gilt das Generalized ICP (GICP). Dabei wird die Oberfläche beider Punktwolken angenähert. Dies kann als „Ebene zu Ebene“ Metrik verstanden werden. Der Ansatz dafür ist, dass die Oberflächen aufeinander angeglichen werden sollen, jedoch die gemessenen Punkte auf der Oberfläche sich in beiden Messungen in der Regel unterscheiden. Da in beiden Fällen die Oberfläche herangezogen wird, führt dieser Ansatz zur Minimierung des Messrauschens der einzelnen Punkte, weshalb der GICP Ansatz für das Inline Lidarkalibrierverfahren verwendet wird [Pan11]. Obwohl der Einfluss des Messrauschens durch das GICP Verfahren minimiert wurde, ist eine perfekte Überlagerung unmöglich. Aus diesem Grund wird das Verfahren abgebrochen, sobald entweder eine maximale Anzahl an Iterationsschritten erreicht wurde, die Änderung der Transformation unter einen festgelegten Grenzwert fällt oder die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Punktkorrespondenzen der letzten zwei Iterationsschritte geringer als der definierte Schwellwert ist [Poi22]. Ähnlich wie beim SAC-IA Verfahren werden auch für das GICP

Verfahren Grenzwerte für den Abstand der Punkte festgelegt, die aufgrund der bereits vorgenommenen groben Registrierung jedoch kleiner ausfallen. Das Ergebnis des GICP Verfahrens ist eine Matrix analog zur Matrix des SAC-IA Verfahrens und entspricht der Bandbewegung des Lidarsensors im lokalen Sensorkoordinatensystem. Aus ihr wird wie folgt der Kalibrierwert des Gierwinkels $\bar{\Psi}$ berechnet [Bey21].

$$\vec{v}_{Band} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 40}$$

$$\Psi_i = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad \text{Gl. 41}$$

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{i_{max}} \sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_i \quad \text{Gl. 42}$$

Ergebnis der ausgearbeiteten Lidarkalibrierkonzepte

Alle Lidarkalibrierkonzepte wurden erfolgreich ausgearbeitet und eignen sich für die Inline Inbetriebnahme. Die Konzepte werden anschließend validiert sowie die Ergebnisse in Kapitel 9 beschrieben.

7 Inline Radarkalibrierverfahren

7.1 Planung des Inline Radarkalibrierverfahrens

Für den Entwicklungsschritt Planung und Klären werden die spezifischen Anforderungen an das Radarkalibrierverfahren aus den allgemeinen Anforderungen abgeleitet.



Abbildung 77: Radar Sensoren [Rob22]

Ähnlich wie für das Lidar Kalibrierverfahren werden für die Kalibrierung der Radarsensoren die Verfahren für unterschiedliche Verbaupositionen im Fahrzeug entwickelt. So wird einerseits die Verbauposition in der Fahrzeugfront untersucht, welche wiederum der Verbauposition im Heck ähnelt. Andererseits werden die Verbaupositionen an den vier Ecken des Fahrzeugs in die Entwicklung mit einbezogen.

Anforderungen an das Inline Radarkalibrierverfahren

Aus den Anforderungen des Gesamtverfahrens werden zunächst einige Anforderungen an das Inline Radarkalibrierverfahren abgeleitet und höher gewichtet. Ähnlich wie für die anderen Inline Kalibrierverfahren gilt es, ein Verfahren zu entwickeln, das die Kalibrierung in der Montagelinie ermöglicht und wenn möglich ohne zusätzliche Kalibriertargets in der Montagelinie auskommt. Dabei sollen der Gier- und Nickwinkel kalibriert werden. Als Mindestanforderung an das Verfahren sind die Toleranzen des heutigen Verfahrens auf dem Fahrwerkstand genannt. Zusätzlich sollen die Kalibrierverfahren auch mit den Störeinflüssen unterschiedlicher Produktionsstandorte sowie dem durch benachbarte Fahrzeuge eingeschränkten Öffnungswinkel funktionieren.

7.2 Entwurf des Inline Radarkalibrierverfahrens

Zunächst werden in diesem Abschnitt Kalibrierkonzepte gesammelt, anschließend Kalibrierkonzepte für die Weiterentwicklung ausgewählt sowie ausgearbeitet. Begonnen wird dafür mit einer Untersuchung der Öffnungswinkel in der Produktionsumgebung.

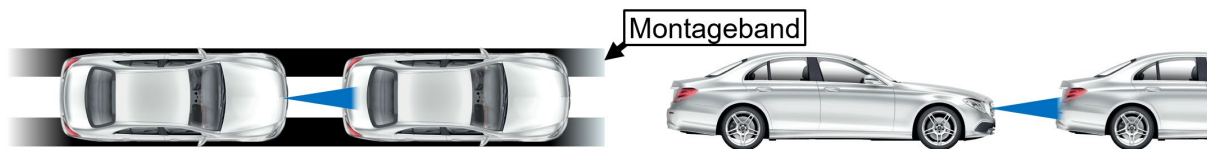


Abbildung 78: Öffnungswinkel des Radars im Produktionsumfeld [vgl. Dai18]

Der für die Kalibrierung relevante Öffnungswinkel des Radars, seine Verbauposition mittig im Frontend des Fahrzeugs und der geringe Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sorgen wie in Abbildung 78 dargestellt für einen Öffnungswinkel, der nur das Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs wahrnimmt. Folglich stellt das Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs die einzige Möglichkeit dar, ein targetloses Kalibrierverfahren für den Frontradsensor zu entwickeln ohne den heutigen Produktionsablauf zu verändern. Andere Radarsensoren, wie die Eck-Radare hingegen detektieren ausschließlich die Produktionsumgebung und ermöglichen damit andere Möglichkeiten der Kalibrierung anhand der Produktionsumgebung.

Konzepte für das Inline Radarkalibrierverfahren

Kalibrierkonzept Fahrzeugheck

Das erste Konzept bezieht sich auf die Kalibrierung des Radars anhand eines Fahrzeughecks. Um den Gier- und Nickwinkel des Radarsensors zu bestimmen, werden Leistungs- und Phasendifferenzen der Radarantennen als Eingangsgrößen verwendet. Denn Differenzwerte haben im Gegensatz zu Absolutwerten den Vorteil, dass sensorindividuelle Einflüsse wie die Antennendämpfung reduziert werden. Im Gegensatz zum Laboreinsatz ist dies für die Vielzahl Radarsensoren im Produktionseinsatz mit unterschiedlicher Antennendämpfung wichtig. Für das Kalibrierkonzept sollen Messungen aus unterschiedlichen Lagen des Sensors vor dem Fahrzeugheck aufgezeichnet und daraus Reflexionseigenschaften in Abhängigkeit der Kalibrierwinkel abgeleitet werden. Aus den Phasen- und Leistungsunterschieden sowie

den Reflexionseigenschaften soll es anschließend möglich sein, die Kalibrierwinkel zu bestimmen [Kol20].

Kalibrierkonzept Punktverfolgung

Ausgehend von den Eigenschaften eines Radarsensors soll ein Kalibrierkonzept auf Basis von Referenzen in der Produktionsumgebung entwickelt werden. Dieses Konzept soll für Radarsensoren, welche die Produktionsumgebung erkennen können, nutzbar sein. Grundsätzlich ist es möglich, mit Radarsensoren Relativgeschwindigkeiten, den Abstand zu einem Ziel, die Winkel in Azimut und Elevation zu einem Ziel sowie die reflektierte Leistung zu bestimmen. Daraus sind einige Kalibrierkonzepte denkbar. Jedoch werden die Geschwindigkeitsmessung aufgrund zu geringer Auflösung der Relativgeschwindigkeit, eine Leistungsmessung aufgrund der dafür ungeeigneten Messumgebung in der Produktion und eine Konturenverfolgung über Abstand und Winkel aufgrund zu niedriger Winkelauflösung bezüglich der Trennbarkeit von Zielen nicht weiterverfolgt [Paw22].

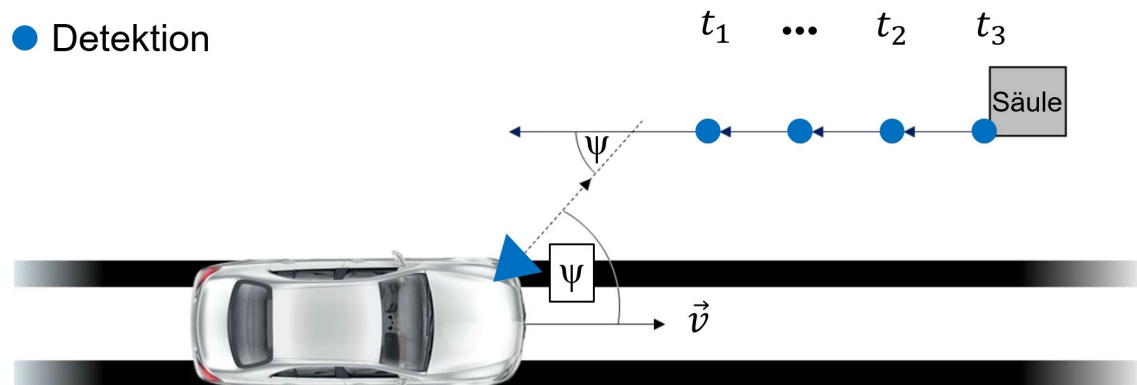


Abbildung 79: Kalibrierkonzept Punktverfolgung [vgl. Paw22]

Lediglich die in Abbildung 79 schematisch dargestellte Punktverfolgung, bei der markante Punkte über mehrere Zeitpunkte und Positionen hinweg verfolgt werden, scheint trotz der geringen Trennbarkeit von Zielen ein geeignetes Mittel für die Kalibrierung zu sein [Paw22].

Sonstige Kalibrierkonzepte

Zu den beiden oben vorgestellten Kalibrierkonzepten wurden noch weitere Konzepte wie ein Konzept auf Basis der Geschwindigkeitsmessung, Intensitätsmessung und

Konturenverfolgung untersucht, die jedoch aus unterschiedlichen Gründen nicht weiterverfolgt und aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht detailliert beschrieben wurden [Paw22].

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts Fahrzeugheck

Für die Messungen der Phasen- und Leistungsdifferenzen aus unterschiedlichen Lagen des Radarsensors zum Fahrzeugheck wurde, wie in folgender Abbildung 80 dargestellt, ein Roboterarm gewählt. Die Position des Radarsensors entspricht der Verbauposition eines Frontradarsensors und soll damit im Labor möglichst die Produktionsbedingungen in der E-Klasse Produktionslinie nachstellen.

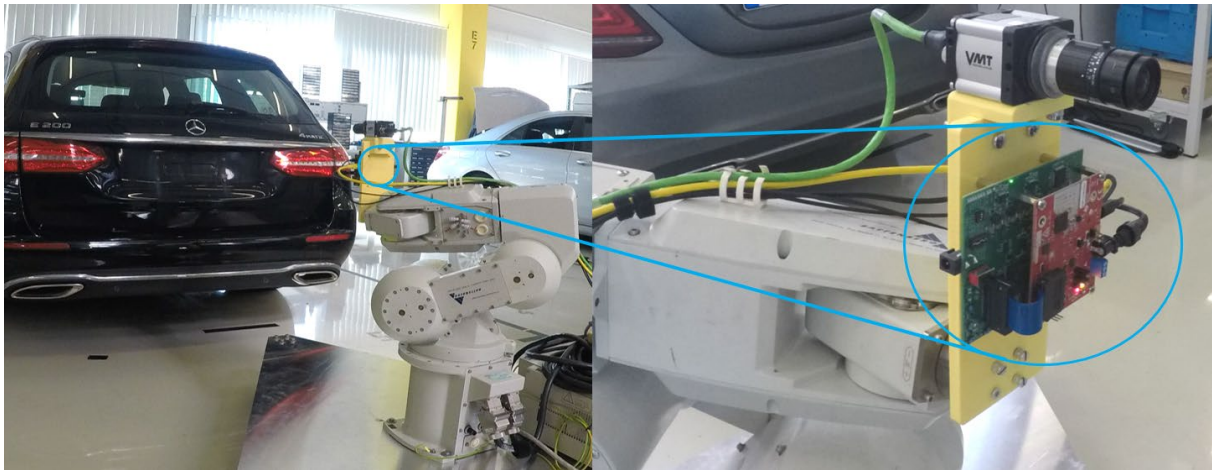


Abbildung 80: Versuchsaufbau Fahrzeugheck [vgl. Kol20]

Für sämtliche Entwicklungen wurde ein freiprogrammierbarer Radarsensor verwendet, der im Gegensatz zu Seriensensoren Zugriff auf die Radarrohdaten erlaubt und ähnliche Eigenschaften wie die Seriensensoren aufweist. Zunächst musste der Radarsensor in der konstruktiven Soll-Lage hinter dem Fahrzeugheck ausgerichtet werden. Dies wurde mit Hilfe einer Neigungssensorik in Elevation vorgenommen. In Azimut wurde dafür wie in Abbildung 81 dargestellt eine Messreihe der maximalen Leistungswerte vorgenommen. Aufgrund der symmetrischen Form des Fahrzeughecks und den damit verbundenen Reflexionseigenschaften konnte der Radarsensor parallel zum Fahrzeugheck ausgerichtet werden [Kol20].

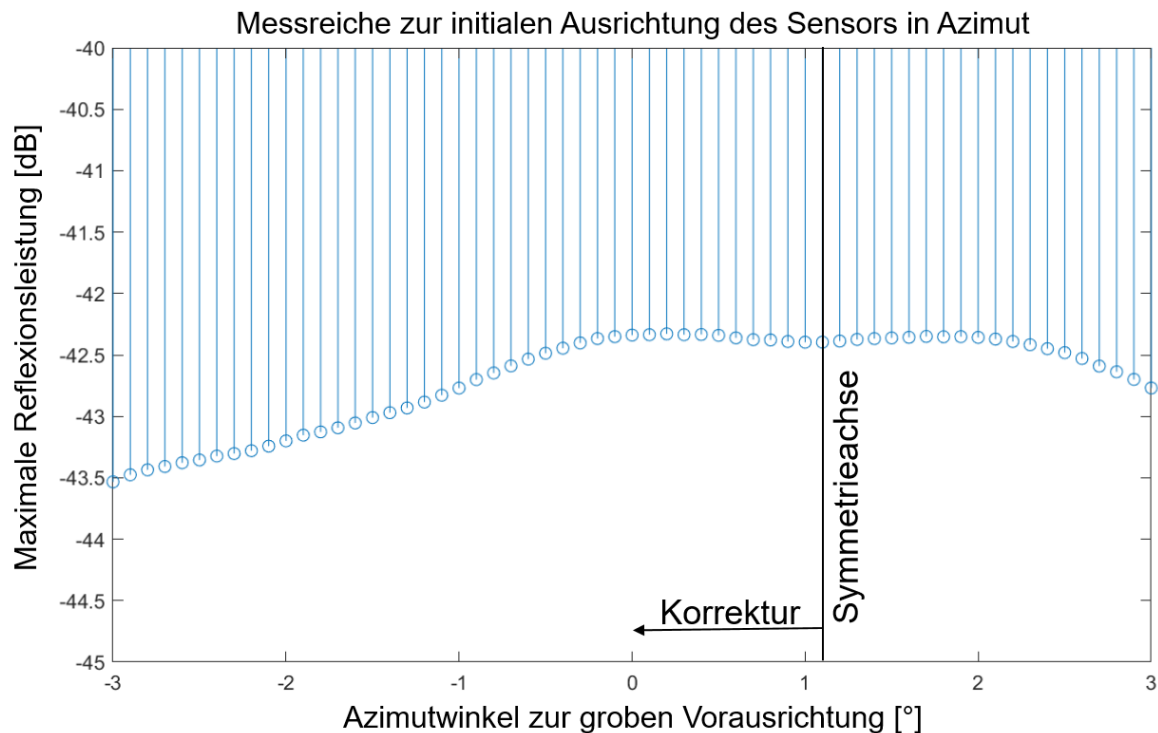


Abbildung 81: Messreihe zur initialen Ausrichtung des Sensors in Azimut [vgl. Kol20]

Um die Reflexionseigenschaften des Fahrzeughecks zu bestimmen, wurden 61 x 61 Posen auf $\pm 3^\circ$, also je $0,1^\circ$ Schritte in Azimut und Elevation angefahren. Dies deckt den möglichen Winkelbereich bei korrektem Verbau der Sensoren im Serienprozess ab. Je Pose wurden sechs Messungen aufgenommen und ähnlich wie bei anderen Kalibrierverfahren die Mittelwerte für die Weiterverarbeitung verwendet. Damit wurde eine sogenannte Kalibriermatrix gebildet. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen den Reflexionseigenschaften des Fahrzeughecks, also den Phasen- und Leistungsdifferenzen der Antennen und den Kalibrierwinkeln. Anschließend kann damit die Berechnung der Kalibrierwinkel aus den Phasen- und Leistungsdifferenzen vorgenommen werden [Kol20].

Für die Berechnung der Leistungsdifferenz wurde mit dem Signal im Frequenzbereich gerechnet und jeweils die Leistungsdifferenz zwischen den vier Antennen des Sensors bestimmt. Es wurde für jede Antenne die maximale Signalleistung berechnet und jeweils von der maximalen Signalleistung der anderen Antennen subtrahiert. Für die Berechnung der Phasendifferenz wurde das Signal im Zeitbereich verwendet. Eine Phasendifferenz liegt vor, wenn die beiden Signale versetzt zueinander sind. Um die Phasendifferenz zu bestimmen, werden die Realteile beider Signale addiert [Kol20].

$$\text{Signal1} + \text{Signal2} = \text{SummenSignal} \quad \text{Gl. 43}$$

$$a * \sin(t + \Phi_1) + b * \sin(t + \Phi_2) = c * \sin(t + \Phi) \quad \text{Gl. 44}$$

Nach dem Kosinussatz ergibt sich:

$$c^2 = a^2 + b^2 + 2ab * \cos(\Phi_1 - \Phi_2) \quad \text{Gl. 45}$$

Abschließend wurde mit Hilfe von Matlab die Phasendifferenz bestimmt, für die diese Gleichungen erfüllt sind. Mit der befüllten Kalibriermatrix wird bei der Durchführung einer Kalibrierung der Vergleich mit den im Rahmen der Kalibrierung bestimmten Differenzen und der Kalibriermatrix angestellt. Dabei wurden beste Ergebnisse erzielt, wenn für die Kalibrierung die Ergebnisse aus drei Messungen gemittelt wurden.

Ausarbeitung des Kalibrierkonzepts Punktverfolgung

Das Kalibrierkonzept soll auf Basis der Detektion eines Objekts von mehreren Positionen aus der Produktionslinie die Punktbeziehung des Objekts relativ zum Radarsensor bestimmen. Daraus wiederum ist es möglich, die Sensororientierung in Azimut und Elevation relativ zur Bandbewegung zu bestimmen. Die Bewegung eines Punktes zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 im Sensorkoordinatensystem kann wie folgt anhand von zwei Drehmatrizen beschrieben werden, wenn die Verdrehung Ψ in Azimut um die Z-Achse und θ in Elevation um die X-Achse des Sensors erfolgt [Paw22].

$$P_{2,S} = \begin{pmatrix} x_{2,S} \\ y_{2,S} \\ z_{2,S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 46}$$

$$P_{2,S} = \begin{pmatrix} x_{2,S} \\ y_{2,S} \\ z_{2,S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Psi) * x_2 - \sin(\Psi) * y_2 \\ \cos(\theta) * (\sin(\Psi) * x_2 + \cos(\Psi) * y_2) - \sin(\theta) * z_2 \\ \sin(\theta) * (\sin(\Psi) * x_2 + \cos(\Psi) * y_2) + \cos(\theta) * z_2 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 47}$$

Zusätzlich muss eine Fallunterscheidung aufgrund der Fahrzeugausrichtung auf dem Förderband vorgenommen werden. Deshalb ergeben sich folgende Bedingungen für die Koordinatendifferenzen zwischen den beiden Punktdetektionen aus dem Vergleich der Richtung der Fahrzeuglängsachse \vec{x} und der Bewegungsrichtung \vec{v} [Paw22].

$$\Delta y = \begin{cases} y_2 - y_1 & \text{für } \vec{v} \neq \vec{x} \\ 0 & \text{für } \vec{v} = \vec{x} \end{cases} \quad \text{Gl. 48}$$

$$\Delta x = x_2 - x_1, 0 = z_2 - z_1 \quad \text{Gl. 49}$$

Daraus und aus Gleichung Gl. 47 ergibt sich für die Bewegung eines Punktes P zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 im Sensorkoordinatensystem S.

$$P_{2,S} - P_{1,S} = \begin{pmatrix} \cos(\Psi) * \Delta x - \sin(\Psi) * \Delta y \\ \cos(\theta) * (\sin(\Psi) * \Delta x + \cos(\Psi) * \Delta y) \\ \sin(\theta) * (\sin(\Psi) * \Delta x + \cos(\Psi) * \Delta y) \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 50}$$

Die Bestimmung der Winkel wird durch eine Projektion der Bewegung auf zwei Ebenen, wie in Abbildung 82 dargestellt, durchgeführt.

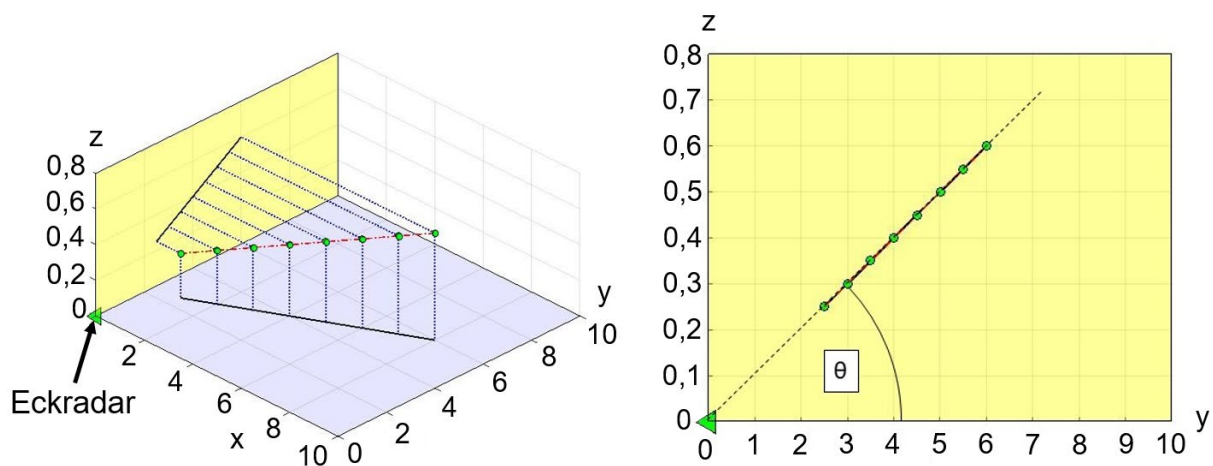


Abbildung 82: Punktprojektion und Berechnung des Azimutwinkels [vgl. Paw22]

Zur Bestimmung des Azimutwinkels Ψ wird die Punktschar auf die in Abbildung 82 blaue Ebene projiziert und eine Geradengleichung aus dem Gradienten m und der Verschiebung b wie folgt gebildet [Paw22].

$$y = mx + b \quad \text{Gl. 51}$$

Für die Bestimmung des Gradienten und der Verschiebung wird eine lineare Regression mit der Methode kleinster Fehlerquadrate durchgeführt. Dafür wird wie

folgt der Mittelwert der Koordinaten und der Azimutwinkel Ψ berechnet [Paw22] [Koh17].

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \text{ und } \tilde{y} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{Gl. 52}$$

$$\tan(\Psi) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i) * (x_i - \tilde{x}_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x}_i)^2} \quad \text{Gl. 53}$$

Der Elevationswinkel θ berechnet sich nahezu analog wie der Azimutwinkel Ψ bezogen auf die Y-Z-Ebene mit folgendem Unterschied.

$$\tan(\theta) = \frac{\tilde{z}}{\tilde{y}} \quad \text{Gl. 54}$$

Da es sich beim Radar um einen aktiven Sensor mit einer Vielzahl an Einstellmöglichkeiten handelt, werden außerdem für die Kalibrierung optimierte Sende- und Empfangseinstellungen ermittelt und für die Kalibrierung vorgenommen. Dabei ist zunächst auf der Empfangsseite die dynamische Schwellwertanpassung genannt. Durch Überlagerungen mit Signalen aus der Umgebung wird ein Schwellwert notwendig, um Radarsignale des eigenen Sensors von Störsignalen zu trennen. Die dynamische Anpassung betrachtet dabei nur die entsprechende Frequenzzelle, wie in folgender Abbildung 83 dargestellt. Die Schutzzellen tragen dabei nicht zur Berechnung des Schwellwertes bei, um bei einem schwachen Signal der Frequenzzelle unter Beobachtung den Schwellwert nicht durch ein starkes Signal in einer benachbarten Schutzzelle zu beeinflussen [Mat21].

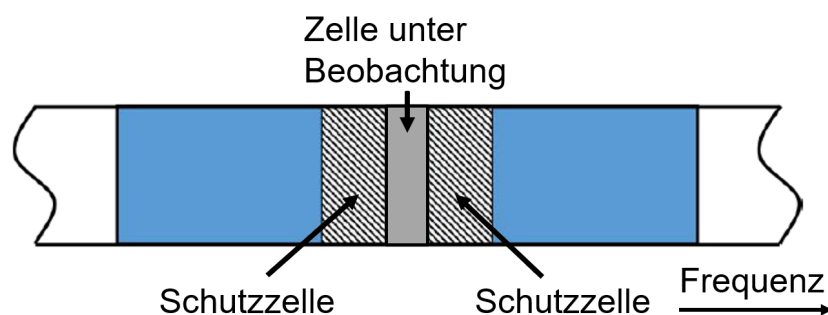
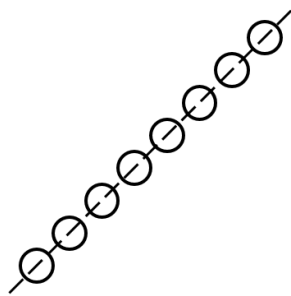


Abbildung 83: Dynamische Schwellwertanpassung [vgl. Mat21]

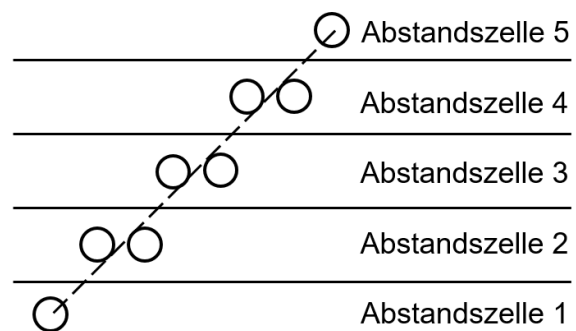
Die Parametrisierung des Radars wird zunächst im Labor mit Hilfe eines Industrieroboters erarbeitet, bevor das Verfahren später in der Produktionsumgebung getestet und validiert wird. Grund dafür ist die bessere Reproduzierbarkeit der Messungen, die in der Produktionsumgebung nicht gegeben ist. Um dennoch die Produktionsumgebung im Labor nachzustellen, werden entsprechend der Produktion Objekte als Radarziele aufgestellt.

Theoretisch bedeutet eine Objektdetektion in der Montagelinie eine geradlinige Bewegung des Objekts relativ zum Radarsensor. In der Realität wird jedoch durch die Auflösung der Abstandszellen ein stufenartiger Verlauf gebildet, sodass die Regression von der Abstandsauflösung abhängig ist. Der Zusammenhang wird in folgender Abbildung 84 dargestellt [Paw22].

Theoretische Punktbewegung



Punktbewegung mit Radarauflösung



○ Detektierter Punkt / Regressionssgerade — Abstandszellenbegrenzung

Abbildung 84: Punktbewegung in der Theorie und in Radarauflösung [vgl. Paw22]

Dieser Effekt wird mit einer möglichst hohen Abstandsauflösung mit kleinen Abstandszellen reduziert, was mit einer möglichst hohen Rampensteigung erreicht werden kann. Dadurch kann der Effekt verringert, jedoch nicht gänzlich vermieden werden. Zur Ermittlung der optimierten Kalibrierparameter wurde deshalb ein Test mit einem Radarziel in Form eines Tripelspiegels in 4 m Entfernung und drei unterschiedlichen Rampensteigungen durchgeführt. Dabei wurde, wie in folgender Abbildung 85 dargestellt zunächst festgestellt, dass sich eine höhere Rampensteigung positiv auf die Objektverfolgung auswirkt und dass bei niedrigeren Rampensteigungen das Ziel länger in einer Abstandszelle detektiert wird. Außerdem zeigt sich, dass sich eine Variation der Rampensteigung ebenfalls vorteilhaft auf die Kalibrierung auswirkt.

Wie in Abbildung 85 im Bereich von $x = -0,5$ m zu sehen ist, ergeben sich durch die Variation Abstandszellen, die nur durch eine Rampensteigung detektiert wurden. Aus diesen Gründen wird eine Variation der Rampensteigung mit hohen Rampensteigungen für die Inline Kalibrierung vorgesehen und um den Einfluss von Ausreißern verhindern zu können, zusätzlich ein Random Sample Consensus (RANSAC) Algorithmus verwendet [Paw22].

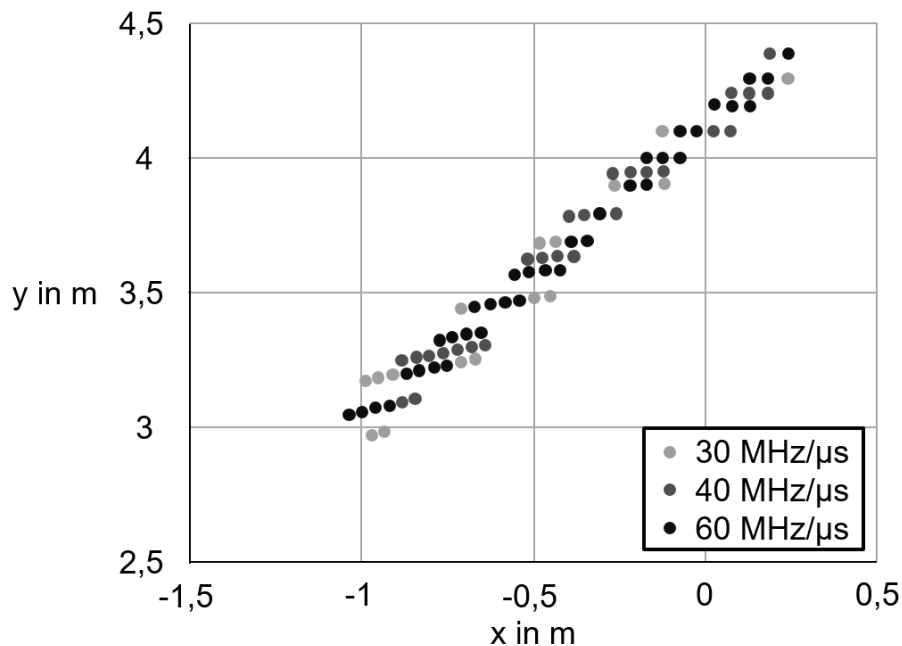


Abbildung 85: Detektion eines Tripelspiegels mit variierter Rampensteigung [Paw22]

Zusätzlich wurden Messungen zur Bestimmung zweier Ziele in unterschiedlichem radialen Abstand hintereinander platziert, um die Trennbarkeit der Ziele zu untersuchen. Hierbei zeigte sich kein eindeutiger Verlauf, der vermutlich aus der Verdeckung des hinteren durch das vordere Ziel bedingt ist. Aus diesem Grund werden für die Kalibrierung nähere Ziele den weiter entfernten Zielen vorgezogen. Abschließend wurden für die Kalibrierung in der Montagelinie folgende Einstellungen vorgenommen [Paw22].

Abtastfrequenz	Abtastwerte	Rampenzeit	Rampensteigung	Reichweitenauflösung
3 MHz	256	91,34 μ s	43,017 MHz/ μ s	0,041 m

Tabelle 9: Grundeinstellung des Entwicklungsradar in der Produktionslinie [Paw22]

Diese Einstellungen ergeben sich aus der maximalen Reichweite von 10 m, der höchsten Rampensteigung bei einer Rampenzeit von maximal 100 μ s, der Abtastfrequenz und der maximalen Bandbreite von 4 GHz [Paw22].

Um in der Produktionslinie Ziele eindeutig unterscheiden zu können, wurden Versuche mit Leistungsmessungen einiger Ziele durchgeführt. So zeigt Abbildung 86 links den Leistungsverlauf eines Tripelspiegels über eine Farbcodierung und rechts den parabelförmigen Leistungsverlauf im Diagramm. Der Leistungsabfall bei ca. $x=0,25$ m beruht vermutlich auf destruktiver Interferenz. Abschließend kann der Leistungsverlauf zur Trennung von Radarzielen und damit zur Identifikation des Tripelspiegels herangezogen werden. Bei Messungen in der Produktionsumgebung ohne Tripelspiegel konnten keine eindeutigen Leistungsverläufe zugeordnet werden, sodass die Leistungsmessungen nur für Tripelspiegel verwendet werden können.

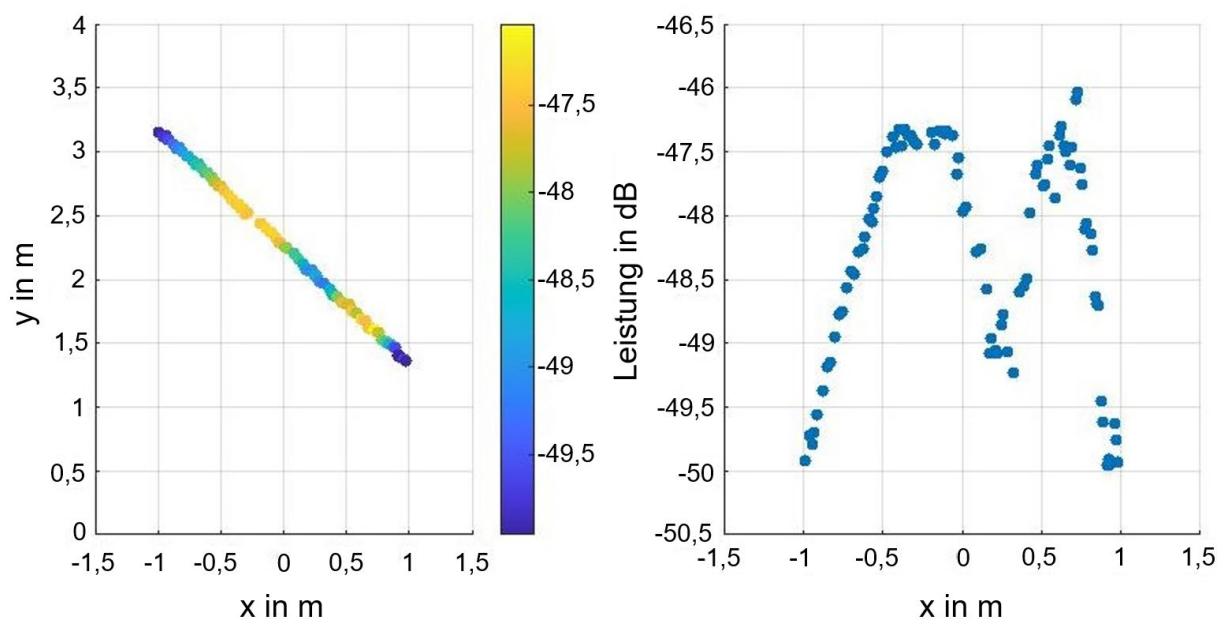


Abbildung 86: Leistungsmessung zur Detektion von Tripelspiegeln [Paw22]

Ergebnis der ausgearbeiteten Radarkalibrierkonzepte

Das Radarkalibrierkonzept Punktverfolgung und das Konzept Fahrzeugheck wurden erfolgreich ausgearbeitet und validiert. Die Ergebnisse beider Konzepte sind in Kapitel 9 beschrieben.

8 Konzept des Gesamtverfahrens

In den vorherigen Kapiteln wurden die Einzelverfahren entwickelt und getestet. Das Gesamtverfahren konnte jedoch nicht getestet werden. Daher wird an dieser Stelle das Konzept des Gesamtverfahrens beschrieben mit Änderungen, die für eine Umsetzung der Einzelkonzepte in der Produktion heute notwendig wären.

Vorbedingungen für die Inline Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme sind neben der Möglichkeit, die Nick- und Rollwinkeldifferenz zwischen der Produktionslinie und dem Fahrwerkstand in ausreichender Genauigkeit zu messen, die Diagnosefähigkeit, eine Fremdspannungsversorgung, der Zugang zu Sensorrohdaten, die Möglichkeit der Parametrisierung von aktiven Sensoren sowie die Möglichkeit, Kalibrieralgorithmen berechnen zu können. Eine Änderung im Produktionsablauf betrifft das Schließen der Haube und des Kofferraumdeckels im automatischen Teil des statischen IS-Tests. Heute ist die Haube zur Versorgung mit Fremdspannung geöffnet und der Heckdeckel öffnet und schließt sich dort heute selbstständig für dessen Normierung. Beide sollten jedoch während des Kalibrierablaufs für die freie Sicht der Sensorik hinter der Windschutzscheibe, im Heckdeckel und ggf. auf dem Dach sorgen. Dies ist jedoch laut der Mitarbeiter in der Produktion möglich, indem die Fremdspannungsversorgung zukünftig aus Gründen des Lackschutzes im Bereich der Windschutzscheibe durchgeführt und die Haube auf das Schloss gelegt sowie die Heckdeckelnormierung zu einem Zeitpunkt vor oder nach der Kalibrierung durchgeführt wird. Die Berechnung der Kalibrieralgorithmen sollte, wenn möglich, auf dem Fahrzeug selbst gerechnet werden. Ausreichend Rechenleistung dürfte im Fahrzeug vorhanden sein, da die Funktionen im späteren automatisierten Fahrbetrieb rechenintensiver sind. Jedoch muss die Rechenleistung auch in der Zeit zwischen automatisiertem Bereich des statischen IS Tests und dem Fahrwerkstand verfügbar sein. Aus Datenschutzgründen dürfen keine Kameradaten gespeichert werden, jedoch ist es empfehlenswert, Zwischenwerte wie beispielsweise die Anzahl Flussvektoren bei der Kamera-kalibrierung, die Varianz der Beschleunigungswerte, die Umgebungslichtstärke, die zurückgelegte Kalibrierdistanz sowie die Varianz der Kalibrierwerte zu speichern und im Nacharbeitsfall für die Fehlersuche bereit zu stellen. Mit dem Inline Referenziersystem wird die Fahrwerksymmetrieachse zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs vermessen und mit der Inline Kalibrierung die Sensorausrichtung zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs bestimmt, wodurch der Zielbezug für die meisten

Sensoren bereits hergestellt wird. Die Inline Kalibrierung ist auf die Strecke des automatischen Teils des statischen IS Tests ausgelegt, sollte jedoch, sofern sinnvoll und möglich noch länger im manuellen Teil des IS Tests laufen, sofern keine für die Kalibrierung kritischen Änderungen am Fahrzeug vorgenommen werden. Dies kann unter anderem durch die Überwachung des Beschleunigungssensors im ORC erfolgen. Anschließend werden im Fahrwerkstand nachdem die Fahrwerkarbeiten durchgeführt wurden, der fahrfertige Nick- und Rollwinkel gemessen und der Offset zum Zustand im Bandbereich auf die Kalibrierergebnisse berechnet. Außerdem wird der Zusammenhang zwischen der Fahrwerksymmetrieachse sowie der geometrischen Fahrachse gemessen und dieser Offset für die Sensoren mit der geometrischen Fahrachse als Referenz berücksichtigt.

Stand heute ist es jedoch nicht für alle Sensoren sinnvoll, eine Inline Kalibrierung durchzuführen. Wie am Beispiel des Frontradars dargestellt, ist eine Inline Kalibrierung zwar möglich, jedoch nicht sinnvoll und im Fahrwerkstand eine funktionierende Kalibriereinrichtung vorhanden. In diesem Fall ist Inline eine Art Freizug, also eine Vergrößerung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug oder eine Kalibrierung am Ende des Bandes zum Motorerststart denkbar, so dass ausreichend Sicht auf die Produktionsumgebung vorliegt. Die Berechnung der Kalibrierwerte muss auf dem Fahrwerkstand abgeschlossen sein, um beispielsweise falsch verbaute oder fehlerhafte Sensoren in der Nacharbeit korrigieren bzw. tauschen zu können.

Auch für den Nacharbeitsfall und den darauffolgenden Bedarf einer erneuten Kalibrierung außerhalb des Bandes muss eine Lösung gefunden werden. Denkbar wäre hier eine langsame Fahrt mit gerader Lenkung im Nacharbeitsbereich, um die Inline Verfahren zu verwenden, wobei die Referenzierung durch die Geradeausfahrt wegfallen würde. Alternativ ist auch eine targetbasierte Lösung wie mit einem universellen Target für mehrere Sensoren auf dem Nacharbeitsfahrwerkstand denkbar.

9 Validierung und Ergebnisse

Die entwickelten Konzepte sollen im Rahmen dieses Kapitels einzeln validiert und die Ergebnisse dargestellt werden. Dafür werden zunächst die Grundlagen der Validierung beschrieben, bevor auf das Referenzier- sowie die Kalibrierverfahren eingegangen wird.

Grundlagen der Validierung

Die Herausforderung der Validierung entwickelter Verfahren liegt in der Ermittlung von Referenzwerten bzw. der jeweiligen Ground Truth. Die Referenzwerte können nur angenähert werden. Es ist zum Zeitpunkt der Arbeit aufgrund der notwendigen Voraussetzungen nicht möglich, den genauen Referenzwert zu bestimmen oder eine Messsystemanalyse für die entwickelten Verfahren durchzuführen. Denn ein Produktionstest und der Vergleich mit aktuellen Kalibrierverfahren ist nur bedingt möglich, da Kundenfahrzeuge keine Sensorrohdaten zur Nachverarbeitung ausgeben, eigene Kalibrierverfahren nicht auf die Kundenfahrzeuge angewendet werden können sowie die heutigen Kalibrierverfahren Eigentum der Zulieferer sind und nicht für eine Validierung eigener Verfahren vorliegen. Entwicklungsfahrzeuge, die eine Messtechnik und damit den Zugriff zu Sensorrohdaten erlauben, werden erst nach deren Produktionsprozess dazu befähigt, Rohdaten zu extrahieren. Demnach sind sie bereits fertig produziert und müssen für Validierungstests in die Produktion eingeschleust werden. Somit kann der Zielprozess auch damit nur angenähert werden. Außerdem ist nicht für jeden Sensor ein Entwicklungsfahrzeug mit Messtechnik und Rohdatenzugang verfügbar. Auch die Inline Referenzierung kann nicht mit genauen Referenzdaten validiert werden, da kein Referenzmesssystem in der Produktion vorliegt. Ein Zuverlässigkeitstest wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da dieser Test zu großen Produktionsausfällen führen würde.

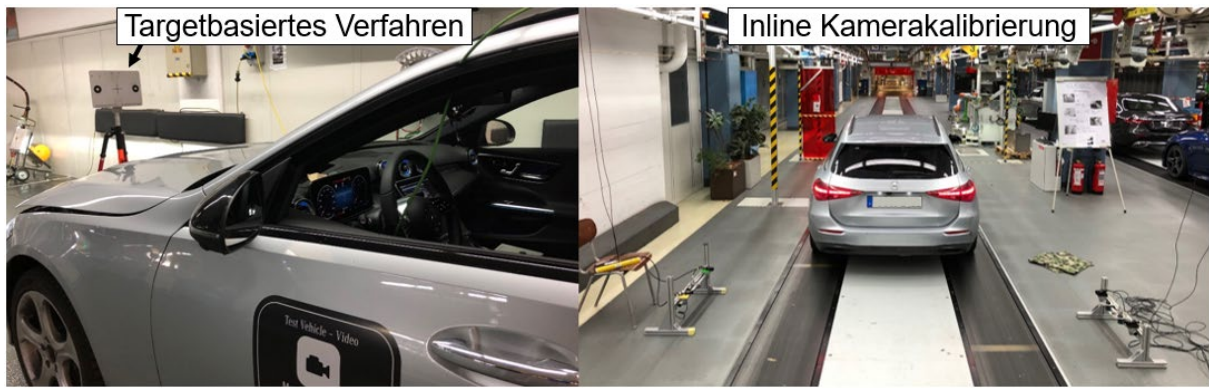


Abbildung 87: Verfahrenvalidierung für Kamerakalibrierverfahren

Aus diesen Gründen wird, wie im linken Teil von Abbildung 87 dargestellt, ein Entwicklungsfahrzeug mit Messtechnik in die Produktion eingeschleust und die eigenen Verfahren im Nachgang anhand der aufgezeichneten Messdaten durchlaufen. Damit sollen reale Produktionsprozesse möglichst nah angenähert werden. Als Referenz werden direkt davor und danach die heutigen statischen und dynamischen Kalibrierverfahren durchlaufen. Dies ist nur für die Kamerakalibrierverfahren möglich. Für die anderen Verfahren werden wie in folgender Abbildung 88 dargestellt, Sensoren mit Rohdatenzugang auf einer Rotationsplatte an Erprobungsfahrzeugen montiert, die möglichst nah einen zukünftigen Seriensensor annähern.



Abbildung 88: Validierung Lidar- und Radarverfahren

Mit der Rotationsplatte ist es möglich während der Bandfahrt den Sensor um eine Achse im Rahmen der Genauigkeit des Schneckengetriebes in Stufen von 0,6 Winkelminuten zu verdrehen und somit Relativwerte ohne den Einfluss durch das Referenziersystem zu analysieren. Die Verfahren werden wie in folgender Abbildung 89 dargestellt neben der Validierung im Produktionsumfeld außerdem im Roboterlabor entwickelt und validiert.



Abbildung 89: Validierung im Roboterlabor

Im Roboterlabor können entgegen dem Aufbau in der Produktionslinie im Rahmen der Roboter Genauigkeit wiederholgenaue Messungen durchgeführt und die Sensorik um alle drei Raumachsen gedreht werden. Außer der Validierung der Kalibrierverfahren, kann dort auch eine Validierung des Referenzierverfahrens durchgeführt werden. Dazu wird wie in Abbildung 90 dargestellt, ein Fahrzeug zum Roboter positioniert und ein Referenziersystem mit Bandgeschwindigkeit relativ dazu bewegt. Mit diesem Aufbau ist es ebenfalls möglich, Effekte wie die Bandbeschleunigung oder einen Nothalt näherungsweise zu simulieren ohne damit die Produktionsabläufe zu beeinflussen.

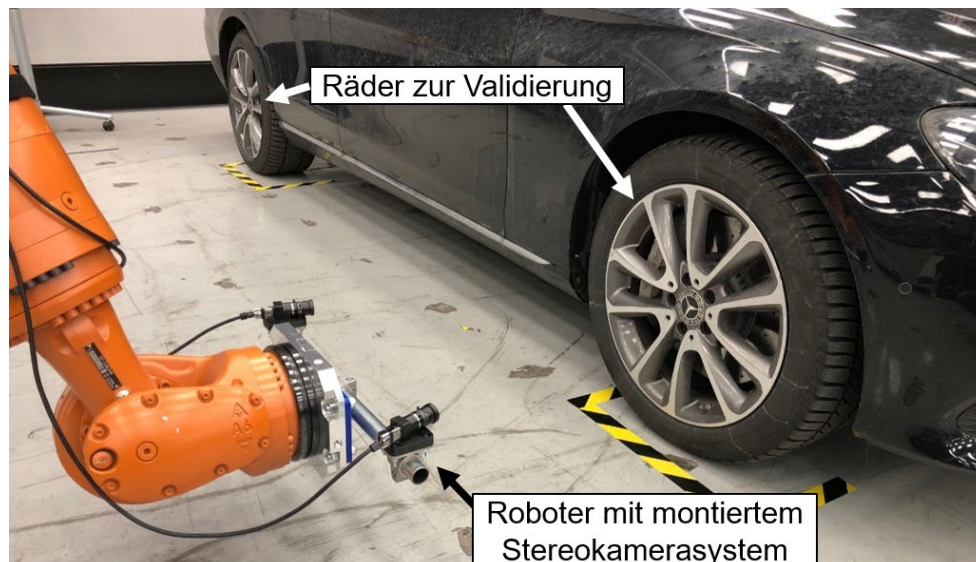


Abbildung 90: Validierung Inline Referenziersystem

Als Leistungskennzahlen wurden somit die Wiederholgenauigkeit, die relative Genauigkeit und der Absolutvergleich zu etablierten Verfahren bei den Kameras ermittelt.

Ergebnisse des Inline Referenzierverfahrens

Das Inline Referenzierverfahren wird mit Hilfe eines Industrieroboters im Labor validiert. Eine Validierung in der Montagelinie ist nicht möglich, da die wahre Lage des Fahrzeugs während der Bandbewegung mit den verfügbaren Mitteln nicht bestimmt werden kann. Außerdem passiert jedes Fahrzeug nur einmal das Referenziersystem, bevor es wieder erneut auf das Band gestellt werden muss. Der Industrieroboter ist nicht absolut wiederholgenau, jedoch genauer als manuelle Positionierungen des Fahrzeugs auf dem Montageband. Zunächst wird die Wiederholgenauigkeit des Referenziersystems geprüft. Dafür werden insgesamt 30 dynamische Messungen durchgeführt und die Abstände sowie die Winkel entsprechend dem beschriebenen Verfahren ermittelt [Paw21].

	Standardabweichung
Vorderachse	0,191 mm
Hinterachse	0,151 mm
Seitenwinkel	0,00467°

Tabelle 10: Wiederholgenauigkeit des Inline Referenziersystems [Paw21]

Die Ergebnisse in Tabelle 10 zeigen Standardabweichungen von 0,151 bzw. 0,191 mm, was eine Standardabweichung im Seitenwinkel von $0,00467^\circ$ bedeutet. Dabei ist zu beachten, dass die Wiederholgenauigkeit des Roboters von $\pm 0,06$ mm laut Herstellerangabe die Ergebnisse beeinflusst. Im nächsten Schritt werden die relativen Abstände des Stereokamerasystems zum Fahrzeug verändert, um die relative Genauigkeit des Systems zu überprüfen. Diese Ergebnisse sind in folgender Tabelle 11 dargestellt [Paw21].

	Verschiebung zum Fahrzeug [mm]	Ermittelter Abstand [mm]	Differenz zur Verschiebung [mm]
Vorderachse	0	679,526	-
	10	689,519	0,007
	20	699,495	0,031
Hinterachse	0	675,132	-
	10	685,126	0,006
	20	695,131	0,001

Tabelle 11: Relative Abstandsgenauigkeit des Inline Referenziersystems [Paw21]

Außer den Messungen zur Bestimmung der relativen Abstandsgenauigkeit wurden ebenfalls Messungen zur Bestimmung der Winkelgenauigkeit durchgeführt.

	Winkeldifferenz $[\circ]$	Gemessener Winkel $[\circ]$	Differenz zur Referenzmessung $[\circ]$
Referenzmessung	0	0,583	-
Differenzwinkel	1	1,601	0,017
	2	2,681	0,098
	-3	-2,681	-0,264

Tabelle 12: Relative Winkelgenauigkeit des Inline Referenziersystems [Paw21]

Bei den Ergebnissen in Tabelle 12 fällt auf, dass die Differenzen zur Relativmessung eine lineare Abhängigkeit zur Winkeldifferenz aufweisen. Ein großer Anteil dieses Einflusses wird vermutlich durch die Montage des Stereokamerasystems beeinflusst.

Wird die Basis des Stereokamerasystems nicht horizontal, sondern um die Blickrichtung der Kameras verdreht verbaut, verändert sich bei einer Drehung um die Hochachse nicht nur die horizontale Komponente. Der vertikale Einfluss muss deshalb bei der Berechnung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde eine weitere Messung durchgeführt, welche die vertikale Komponente berücksichtigt [Paw21].

	Winkeldifferenz [°]	Gemessener Winkel [°]	Differenz zur Referenzmessung [°]
Referenzmessung	0	0,492	-
Differenzwinkel	2	2,481	0,011

Tabelle 13: Winkelgenauigkeit unter Einbezug der vertikalen Abweichung [Paw21]

Die nahezu um Faktor 10 reduzierte Differenz zur Referenzmessung in Tabelle 13 bestätigt die Vermutung der Ursache des Einflusses. Deshalb sollte das Inline Referenzverfahren ebenfalls die vertikale Komponente des Radmittelpunktes einbeziehen. Abschließend kann aus den Versuchen zum Lenkwinkелеinfluss, der Wiederhol- und Relativgenauigkeit sowie des Fehlers des eichmeisterlosen Verfahrens die Gesamtgenauigkeit des Referenziersystems durch Addition der Einzelwerte abgeschätzt werden. Dabei wurde konservativ gerechnet, indem keine Korrektur des Lenkwinkels, ein großer Lenkwinkel von 10° und eine Schiefstellung des Fahrzeugs auf dem Band von 3° sowie der ungünstigste Fall mit der größten Abweichung durch das Inline Referenzverfahren angenommen wurde.

	Inline Referenziersystem [°]
Wiederholgenauigkeit	0,0047
Relative Winkelgenauigkeit	0,0011
Eichmeisterloses Verfahren	0,0003
Lenkwinkелеinfluss	0,0086
Gesamt	0,0147

Tabelle 14: Abschätzung Gesamtgenauigkeit Inline Referenziersystem [Paw21]

Tabelle 14 zeigt trotz des nicht korrigierten Einflusses durch den Lenkwinkel die Gesamtgenauigkeit von $0,0147^\circ$. Damit werden heutige Anforderungen an die Fahrwerkvermessung unterschritten und Toleranzspielraum für die Kalibrierverfahren geschaffen. Außerdem zeigt sich durch den Anteil an der Gesamtgenauigkeit, welches Potential in der Korrektur des Lenkwinkeleinflusses steckt. Im Rahmen einer Industrialisierung sollte die Abweichung mit Korrektur des Lenkwinkels deutlich niedriger ausfallen.

Ergebnisse der Inline Kamerakalibrierverfahren

Für das Verfahren nach dem Prinzip des optischen Flusses werden zunächst für die Wiederholgenauigkeit 25 nacheinander folgende Messungen in der Produktionslinie aufgezeichnet. Dabei wurde im Gierwinkel eine Standardabweichung von $0,1417^\circ$ für den optischen Fluss mit 5 Folgebildern und im Nickwinkel eine Standardabweichung von $0,1085^\circ$ für den optischen Fluss mit 6 Folgebildern bestimmt. Anschließend folgte der Vergleich des Inline Kalibrierverfahrens mit dem statischen, targetbasierten Kalibrierverfahren, das ähnlich im Servicebereich verwendet wird und dem Onlinekalibrierverfahren, das die Systeme fortlaufend während der Fahrt kalibriert.

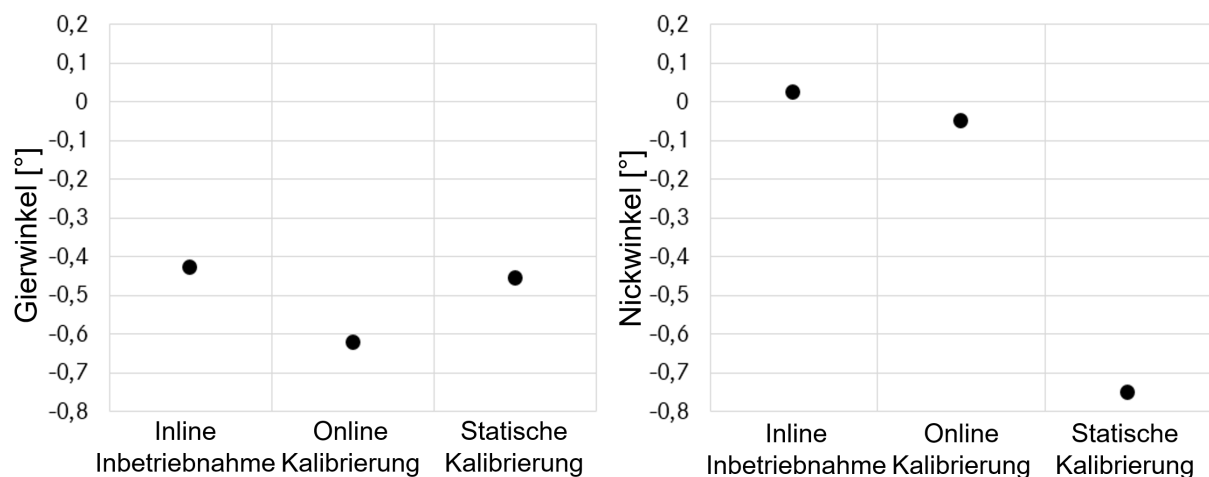


Abbildung 91: Vergleich der kamerabasierten Kalibrierverfahren

Abbildung 91 zeigt den Vergleich kamerabasierter Kalibrierverfahren für den Gier- und Nickwinkel. Die angegebenen Werte sind Durchschnittswerte, die direkt nacheinander bestimmt wurden. Dabei ist beim Gierwinkel der Inline Kalibrierung ebenfalls der Einfluss durch das Inline Referenziersystem und bei den Werten der statischen Kalibrierung der Einfluss durch die Positionierung des Targets enthalten. Speziell im

Nickwinkel weicht die statische Kalibrierung von den beiden anderen Kalibrierverfahren ab, was wahrscheinlich aufgrund des verwendeten Kameraerprobungsträgers der Fall ist. In diesem Fahrzeug wurde die Kamera nachträglich manuell an die Frontscheibe geklebt, so dass die translatorische Lage im Fahrzeug nicht so genau wie im Fall einer Serienmontage bekannt ist. Die translatorische Höhe der Kamera im Fahrzeug hat bei der statischen Kalibrierung einen Einfluss auf den Nickwinkel. Dieser Einfluss ist bei den anderen Verfahren nicht vorhanden. Abschließend zeigt das Ergebnis, dass das entwickelte Inline Kalibrierverfahren nur geringfügig von den anderen etablierten Verfahren abweicht sowie plausible und nutzbare Kalibrierwerte liefert [Que20].

Im Roboterlabor und der Produktionsumgebung wurden außerdem die Ergebnisse des Ebenenschätzer- und Kantendetektionsverfahrens ermittelt. So wurden zunächst im Roboterlabor ähnlich zum Verfahren nach dem Prinzip des optischen Flusses Wiederholmessungen durchgeführt, um die Standardabweichung der Verfahren zu bestimmen. Außerdem wurden im Anschluss Roboterfahrten mit definierten Differenzwinkeln durchgeführt, um einen Vergleich zu den relativen Fehlern der Verfahren anstellen zu können. In der Montagelinie hingegen wurde mit einem Fahrzeugkamarasystem gegen den Kalibrierwert der statischen Kalibrierung gemessen, der als Referenz angesehen wurde.

Verfahren	Ebenenschätzer	Kantendetektion
Standardabweichung	0,104°	0,015°
Relativer Fehler Roboterlabor	0,678°	0,157°
Relativer Fehler Montagelinie	-	0,182°

Tabelle 15: Ergebnisse Ebenenschätzer und Kantendetektion [Schl21]

Wie in Tabelle 15 beschrieben, konnten für den Ebenenschätzer keine Daten in der Montagelinie bestimmt werden. Grund dafür ist die fehlende Struktur des Bodens in der Montagehalle. Diese kann beispielsweise durch das Aufbringen von Zufallsmustern angepasst werden. Dies würde zwar zusätzliche Hardware in die Montagelinie bedeuten, jedoch müsste diese nicht wie ein Target im klassischen Sinne eingemessen werden. Die Zufallsmuster würden eine gut geeignete Struktur für dieses und andere kamerabasierte Kalibrierverfahren darstellen. Abschließend liefert das

Konzept der Kantendetektion Ergebnisse im Bereich der geforderten Genauigkeitsanforderungen und damit vielversprechende Ergebnisse [Schl21].

Ergebnisse der Inline Lidarkalibrierverfahren

Für die Validierung der Lidarkalibrierverfahren wurden ebenfalls die KPIs der Wiederholgenauigkeit und relativer Genauigkeit bestimmt. Dabei werden die zwei Einstellungen des Öffnungswinkels 360° , also voller Öffnungswinkel und 120° inklusive Okklusion durch benachbarte Fahrzeuge und Verbauposition im Frondend für die Tests eingestellt. Im letzteren Szenario soll die Kalibrierung im heutigen Bandendebereich nachgebildet werden. Außerdem muss der räumliche Abstand zwischen den beiden Punktwolken definiert werden. Die Entscheidung wird hauptsächlich durch das Sensorrauschen und die Veränderung der Umgebung beeinflusst. Denn wird der Abstand gering gewählt, lassen sich zwar mehr Objekte für die Registrierung nutzen, jedoch steigt der Einfluss der Ungenauigkeit durch das Sensorrauschen. Wählt man den Abstand groß, reduziert sich der Einfluss des Sensorrauschens, jedoch unterscheiden sich die beiden Punktwolken stärker, so dass weniger Objekte für die Registrierung genutzt werden können. Um diesen Zielkonflikt zu klären, wurde eine Messreihe durchgeführt, deren Ziel es war, die räumliche Distanz zu verändern und die Standardabweichung von fünf Messungen als Entscheidungsgröße zu verwenden [Bey21].

Räumlicher Abstand	$\Delta x \approx 25 \text{ cm}$	$\Delta x \approx 50 \text{ cm}$	$\Delta x \approx 75 \text{ cm}$	$\Delta x \approx 100 \text{ cm}$
Standardabweichung	0,20°	0,09°	0,12°	0,20°

Tabelle 16: Bestimmung des optimalen Abstandes zweier Punktwolken [vgl. Bey21]

Aufgrund der geringsten Standardabweichung nach Tabelle 16 bei einem räumlichen Abstand von 50 cm wird dieser Abstand im Folgenden für das Verfahren genutzt. Der gewählte Abstand ist kein optimaler Wert, weil spätere Anpassungen an den Programmparametern sowie ein geringerer Öffnungswinkel ebenfalls Einflüsse auf die Ergebnisse der Registrierung haben und der Abstand zwischen den Aufnahmen nur näherungsweise bestimmt werden kann. Dennoch wird das ermittelte Ergebnis als Anhaltswert für den Proof of Concept verwendet.

Für die Bestimmung der Wiederholgenauigkeit wurden jeweils 30 Messungen mit je 8 Punktwolken pro Messung durchgeführt und folgende Ergebnisse ermittelt.

	Gierwinkel	Nickwinkel	Rollwinkel
Standardabweichung 360°	0,024°	0,027°	0,018°
Standardabweichung 120°+ Okklusion	1,935°	0,099°	0,021°

Tabelle 17: Ergebnisse Wiederholgenauigkeit Lidarkalibrierverfahren [Bey21]

Im Vergleich wird der Einfluss durch den verringerten Öffnungswinkel sichtbar. Speziell das SAC-IA sowie GICP Verfahren für den Gierwinkel liefert im 120° Fall inklusive Okklusion eine vergleichsweise hohe Standardabweichung. Dies liegt voraussichtlich daran, dass, wie in folgender Abbildung 92 dargestellt, sich innerhalb 50 cm Abstand die sichtbare Umgebung so stark verändert, dass kaum überlappende Punkte zugeordnet werden können, die für die korrekte Funktion des Verfahrens notwendig sind. Dafür spricht auch die reduzierte Anzahl an Punkten von ca. 55 000 Punkten bei 360° Öffnungswinkel auf nur ca. 9 000 Punkten bei 120° Öffnungswinkel und Okklusion.

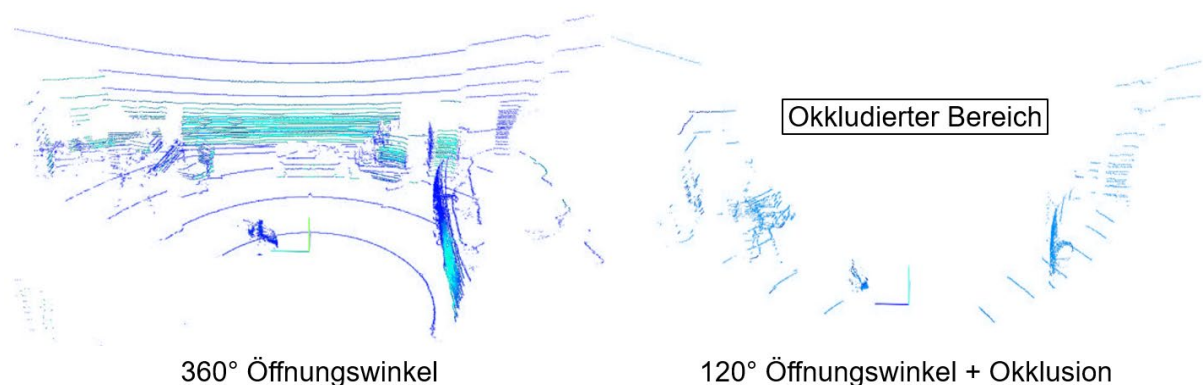


Abbildung 92: Darstellung beider Öffnungswinkelszenarien [vgl. Bey21]

Außerdem wurden die Inline Kalibrierverfahren mit der End-of-Line Kalibrierung des aktuellen Seriensensors verglichen und diese lagen für den vollen Öffnungswinkel innerhalb der gleichen Größenordnung. Aufgrund der hohen Standardabweichung der 120° und Okklusionsmessung im Gierwinkel soll ein alternatives Kalibrierverfahren untersucht werden. Dafür wurde das Unschärfeverfahren gewählt, weil durch das Überlagern einzelner Punktwolken der Öffnungswinkel des Sensors künstlich vergrößert wird. Mit dem Unschärfeverfahren wurde eine Standardabweichung von

0,152° bestimmt, was zwar verglichen mit den anderen Werten der 360° Öffnungswinkel bezüglich der Standardabweichung einen vergleichsweise großen Wert darstellt, jedoch im Vergleich zu den Ergebnissen des GICP Ansatzes, deutlich bessere Ergebnisse liefert. Außer den Ergebnissen zur Standardabweichung wird zusätzlich die relative Genauigkeit bewertet. Dafür werden ausgehend von einer Referenzmessung drei Winkeldifferenzmessungen sowie je Winkeldifferenz fünf Einzelmessungen durchgeführt. Außerdem werden auch hier die beiden Fälle des vollen und reduzierten Öffnungswinkels inklusive Okklusion unterschieden [Bey21].

	Gierwinkel	Nickwinkel	Rollwinkel
Relativgenauigkeit 360°	0,132°	0,102°	0,112°
Relativgenauigkeit 120°+ Okklusion	0,233°	0,145°	0,180°

Tabelle 18: Ergebnisse der Untersuchung zur Relativgenauigkeit [Bey21]

In Tabelle 18 wurde eine Worst-Case Betrachtung durchgeführt. Hierbei wurde jeweils der größte relative Fehler jedes Winkels und Betrachtungsszenarios gewählt. Dabei wird ersichtlich, dass der verkleinerte Öffnungswinkel und die Okklusion ebenfalls zu ungenaueren Relativgenauigkeiten führen. Abschließend wurden die Kalibrierverfahren noch in der Produktionslinie und mit unterschiedlichen Verbaupositionen des Lidarsensors validiert. Sowohl bei der Verbauposition im Kühlergrill als auch beim Verbau am Dach wurden relative Genauigkeitswerte von 0,057° bzw. 0,079° im Gierwinkel ermittelt. Somit liefern die entwickelten Inline Kalibrierverfahren für Lidar Sensoren ebenfalls vielversprechende Ergebnisse.

Ergebnisse der Inline Radarkalibrierverfahren

Verfahren zur Kalibrierung anhand des Fahrzeughecks

Zunächst wurden die statischen Ergebnisse ein und desselben Fahrzeugs unter Laborbedingungen in einem zweiten separaten Durchlauf, also unabhängig der Datenerhebung für die Kalibriermatrix, ermittelt. Dabei wurden die Ergebnisse einer Pose von Einzelmessungen und gemittelte Ergebnisse von drei Messungen betrachtet. In Summe waren es 61 x 61 Posen im $\pm 3^\circ$ Bereich in Azimut und Elevation. Bei den Einzelmessungen wurde eine scheinbar systematische Abweichung aller Ergebniswerte festgestellt, die wahrscheinlich aufgrund eines Fehlers der initialen

Validierung und Ergebnisse

Ausrichtung im zweiten Durchlauf zustande kam. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Einzelmessungen in Tabelle 19 mit und ohne Korrektur um den anscheinend systematischen Fehler angegeben [Kol20].

	Azimut	Elevation
Standardabweichung je einer Messung ohne Korrektur	0,172°	0,564°
Standardabweichung je einer Messung mit Korrektur	0,146°	0,275°
Standardabweichung über drei Messungen gemittelt	0,015°	0,020°

Tabelle 19: Ergebnisse ohne Veränderung des Laboraufbaus [Kol20]

Die Standardabweichung über drei Messungen gemittelt zeigt deutlich bessere Ergebnisse und wird daher im Folgenden gegenüber den Einzelmessungen präferiert. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass eine Kalibrierung des Frontradars am Heck eines vorausfahrenden Fahrzeugs prinzipiell möglich ist. Dennoch entspricht der Laboraufbau nicht den Bedingungen in der Produktion, weshalb weitere Untersuchungen durchgeführt wurden. So wurden Tests mit dem Roboter durchgeführt, wobei die translatorische Lage des Radarsensors relativ zum Fahrzeugheck verändert, jedoch das gleiche Fahrzeugheck verwendet wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

	Azimut	Elevation
Standardabweichung bei Veränderung in X-Richtung	0,447°	0,459°
Standardabweichung bei Veränderung in Y-Richtung	0,794°	0,847°
Standardabweichung bei Veränderung in Z-Richtung	0,935°	0,479°

Tabelle 20: Ergebnisse mit translatorischer Veränderung [Kol20]

Die translatorischen Verfahrenswege des Roboters zur Referenzposition bei der Ermittlung der Kalibriermatrix lagen entsprechend der translatorischen Positionierungstoleranz des Fahrzeugs auf dem Montageband sowie der Verbautoleranz des Sensors im Fahrzeug im kleineren Millimeterbereich. Diese geringfügigen Veränderungen reichen aus, dass die Ergebnisse nicht mehr für eine Kalibrierung herangezogen werden können. Und dabei wurden Einflüsse des

Fahrzeughecks am Zielfahrzeugs noch nicht betrachtet. Änderungen am Zielfahrzeug durch verändertes Spaltmaß, Ausstattungsmerkmale, die einen Einfluss auf die Radarreflektivität haben, wie die Anhängervorrichtung oder andere Karosserietypen, haben möglicherweise ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse. Da die Kalibriermatrix auf ein Fahrzeugheck aus einer Position ermittelt wurde, liefert es nur in diesem Fall geeignete Kalibrierwerte. Aus diesen Gründen ist das Verfahren nicht für einen Produktionseinsatz geeignet und eine Weiterentwicklung scheint aufgrund der Vielfalt möglicher Veränderungen und Einflüssen nicht sinnvoll.

Verfahren zur Kalibrierung anhand der Produktionsumgebung

Zunächst wurde das Verfahren im Labor mithilfe eines Roboters und Tripelspiegeln validiert. Dabei wurden sowohl in Azimut als auch Elevation Referenz- und Differenzmessungen mit variabler Rampensteigung sowie bevorzugten nahen Radarzielen durchgeführt und die Ergebnisse in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

	Referenz R	R+1°	R+2°	R-1°	R-2°
Gemessener Azimutwinkel	45,26°	44,17°	43,40°	46,08°	47,25°
Winkeldifferenz	-	1,09°	1,86°	-0,82°	-1,99°
Abweichung	-	0,09°	-0,14°	0,18°	0,01°

Tabelle 21: Laborergebnisse Azimutwinkel [Paw22]

	Referenz R	R+2°
Gemessener Elevationswinkel	-0,08°	1,88°
Winkeldifferenz	-	1,96°
Abweichung	-	0,04°

Tabelle 22: Laborergebnisse Elevationswinkel [Paw22]

Um die Messungen im Labor für den Elevationswinkel durchführen zu können, wurde der Radarsensor um 90° gedreht. So sind die Empfangsantennen vertikal ausgerichtet, entsprechen jedoch nicht dem Antennenlayout eines aktuellen Fahrzeugradars. So zeigen die Ergebnisse zwar, dass beide Winkel innerhalb der geforderten Toleranzen

kalibriert werden können, jedoch sollte speziell der Elevationswinkeltest mit dem Antennenlayout eines Serienradarsensors wiederholt werden [Paw22].

Abschließend wurde ein Test zur Bestimmung des Kalibrierwinkels in Azimut in der Produktionslinie durchgeführt. Hierfür wurde der Radarsensor über eine Saugnapfhalterung am Fahrzeug angebracht. Ähnlich wie im Roboterlabor wurden Differenzwinkel eingestellt. In der Produktionslinie wurde der Winkel während einer Fahrt verändert, um für beide Messungen die gleiche Fahrzeuglage auf dem Band zu nutzen und die Ergebnisse nicht durch Einflüsse des Referenziersystems zu verfälschen. Es wurde ein Test mit unveränderter Produktionsumgebung sowie zu Vergleichszwecken ein Test mit Tripelspiegeln in der Produktion durchgeführt.

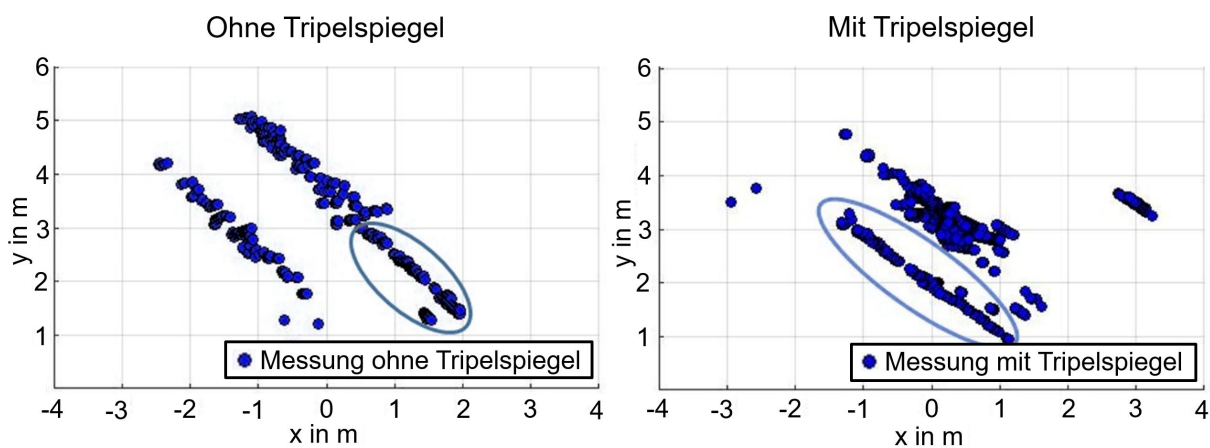


Abbildung 93: Vergleich von Messungen mit und ohne Tripelspiegel [vgl. Paw22]

Im direkten Vergleich ist, wie in Abbildung 93 markiert dargestellt, der Tripelspiegel über eine längere Distanz erkennbar. Außerdem lässt sich der Tripelspiegel besser von seiner Umgebung unterscheiden. Die Messung ohne Tripelspiegel zeigt trotz einer Streuung der erkannten Objekte, dass es dennoch möglich ist, Objekte über eine längere Distanz zu detektieren. In der Produktionslinie wurden jeweils zwei Messungen zur Validierung der Kalibrierung des Azimutwinkels durchgeführt und folgende Ergebnisse ermittelt. Der Elevationswinkel wurde aufgrund des dafür nicht geeigneten Antennenlayouts in der Produktionslinie nicht bestimmt.

	Ohne Tripelspiegel	Mit Tripelspiegel
Abweichung im Azimutwinkel	0,291°	0,258°

Tabelle 23: Ergebnisse der Messungen in der Produktionslinie [Paw22]

Die Ergebnisse zeigen, dass der Durchlauf mit Tripelspiegeln bessere Ergebnisse als ohne Tripelspiegel und dennoch schlechtere Ergebnisse als im Labor liefert. Ein Grund dafür können die Vibrationen des Radarsensors während der Messung sein. Denn der Messrechner und auch der Radarsensor wurden vom 12 Volt Bordnetz des Fahrzeugs gespeist, wofür anders als im normalen Montageprozess mangels Fremdspannungsversorgung der Verbrennungsmotor laufen musste. Die Aufhängung des Radarsensors durch Saugnäpfe und ein langes Gestänge bewegte sich sichtlich, was im Serienverbau hinter dem Stoßfänger nicht der Fall wäre. Jedoch können die Eigenschaften des Stoßfängers wie Brechungsunterschiede zu bisher unbekannten Effekten führen. Dies kann jedoch gegenüber der statischen Kalibrierung vorteilhaft bezüglich der Ermittlung der individuellen Eigenschaften des Stoßfängers über einen größeren Bereich des Öffnungswinkels sein. Des Weiteren sorgt die höhere Anzahl an Objekten im Raum im Vergleich zur Validierung im Labor für eine Streuung der Objektdetektionen. Dies führt dazu, dass eine eindeutige Detektion nicht mehr möglich ist, weil diese Eigenschaft durch die Anzahl an Empfangsantennen begrenzt wird. Die Trennfähigkeit benachbarter Ziele ist mit dem Tripelspiegel verbessert, so dass deshalb vermutlich die Ergebnisse damit besser ausfallen. Aus diesem Grund wird für eine mögliche Umsetzung des Verfahrens in der Produktionslinie die Verwendung von Tripelspiegeln empfohlen. Abschließend liegen dennoch alle ermittelten Kalibrierwerte innerhalb der geforderten Toleranzwerte [Paw22].

10 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend folgt eine Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte sowie der technischen Umsetzung dieser Konzepte und die Antwort auf die eingangs gestellte Forschungsfrage. Außerdem werden im Ausblick Ansätze für eine mögliche Weiterentwicklung, Hinweise für eine Industrialisierung sowie sonstige Folgethemen beschrieben.

10.1 Zusammenfassung

Im Automobilbereich sorgen derzeit der Trend zu Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen sowie strengere funktionale Anforderungen durch die Gesetzgeber für einen steigenden Bedarf an umgebungserkennender Sensorik im Fahrzeug. Diese Entwicklung sorgt für zusätzliche Herausforderungen an die Prüf- und Inbetriebnahmeumfänge der Sensorik in der Produktion. Im Produktionsbereich der Fahrtechnik sind diese Auswirkungen heute bereits unter anderem durch erhöhte Prozesszeit und Prozesskosten sowie durch die Zunahme der benötigten Betriebsmittel ersichtlich, so dass die Kapazitäten dort bereits heute schon teilweise an ihre Grenzen stoßen. Hinzukommt, dass ein Ende dieser Trends für die nähere Zukunft nicht prognostiziert wird.

Die Prüfung und Inbetriebnahme umgebungserkennender Sensorik wird heute statisch im parallelisiert ausgeführten Fahrwerkstand und Dichtheitsprüfbereich durchgeführt. Eine Vorverlagerung der Prozesse Inline, also in die Montagelinie, ermöglicht Vorteile durch den Wegfall der Parallelisierung und leistet einen Beitrag zur Einlinigkeit der Produktionslinie. Zusätzlich erfolgt die Prüfung und Inbetriebnahme heute mit jeweils einem Kalibriernormal je Sensor. Bei der Neuentwicklung der Inline Kalibrierverfahren wurde deshalb neben Anforderungen, die beispielsweise eine präzise Kalibrierung fordern, zusätzlich das Ziel verfolgt, ohne zusätzliche Hardware in der Produktionslinie auszukommen. Damit soll es vereinfacht werden, die entwickelten Verfahren in bereits existierende Produktionsanlagen integrieren zu können.

Begonnen wird dafür mit der Referenzierung zur Bestimmung der Fahrzeugposition zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs auf dem Montageband. Die Messung wird seitenweise mittels zweier Stereokamerasysteme sowie fahrzeugeigener Sensorik durchgeführt. Die Bewegungsrichtung wird dabei nicht nur als Übertragungsmerkmal zur Kalibrierung der Sensoren, sondern auch zur Kalibrierung der beiden

Stereokamerasysteme zueinander verwendet. Somit wird kein Kalibriernormal zur Bestimmung der gegenseitigen Lage der Stereokamerasysteme auf dem Montageband benötigt. Außerdem ist es mit dem neuen Referenziervorgang ohne die Notwendigkeit zur Vermessung der Stereokamerasysteme zueinander möglich, diese ohne größeren Aufwand zu tauschen, wodurch Stillstandzeiten im Falle eines Defekts reduziert werden.

Sämtliche entwickelten Kalibrierverfahren nutzen die bereits vorhandene Produktionsumgebung oder benachbarte Fahrzeuge als Kalibrierreferenz und damit keine zusätzlichen Kalibriernormale. Für die Kalibrierung anhand der Produktionsumgebung werden aufgrund von Sensorunterschieden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Bewegungsrichtung im jeweiligen Sensorkoordinatensystem verwendet. Aufgrund von Okklusion benachbarter Fahrzeuge werden speziell die Öffnungswinkel von Sensoren im Front- und Heckbereich eingeschränkt. Dies erschwert die Kalibrierung, ist jedoch durch ein Verfahren mittels Akkumulation von Umgebungsdaten oder durch benachbarte Fahrzeuge als Kalibrierreferenzen lösbar. Letzteres ist zwar technisch möglich, jedoch unter anderem aufgrund der Variantenvielfalt nicht sinnvoll. Obwohl in der technischen Umsetzung alle entwickelten Verfahren ohne zusätzliche Betriebsmittel Ergebnisse innerhalb der geforderten Toleranzen erzielt haben, wird für eine Industrialisierung dennoch empfohlen, die Produktionsumgebung mit für die Sensoren sichtbarer Struktur anzureichern. Damit sind beispielsweise Zufallsmuster für Kameras oder Radarreflektoren gemeint, die kein Kalibriernormal im klassischen Sinne darstellen, da ihre Position und Struktur unbekannt sind. Jedoch sorgen sie dafür, dass ausreichend erkennbare Ziele für die Sensoren im Bandbereich sichtbar sind. Dadurch ist es entweder möglich, eine Verkürzung der Kalibrierstrecke vorzunehmen oder mehr Messungen durchzuführen, welche beispielsweise den statistischen Einfluss von Ausreißern reduzieren.

Abschließend kann demnach die Forschungsfrage positiv beantwortet werden. Die für diese Arbeit gesetzten Ziele wurden erreicht, denn die vorgestellten Konzepte haben gezeigt, dass es möglich ist die Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen ohne zusätzliche Betriebsmittel innerhalb der geforderten Genauigkeit im automatisierten Teil des intelligenten Schnittstellentests auszuführen und für die Inline Referenzierung den Betriebsmittelbedarf im Vergleich zu aktuellen Referenziervorgängen zu reduzieren.

10.2 Ausblick

Allgemeines

Die Inline Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme ermöglicht Verbesserungen zum heutigen Verfahren in Bezug auf Platz-, Zeit-, Werker- und Betriebsmittelbedarfen. Eine Bewertung der Verbesserungen anhand der vorgestellten Konzepte ist jedoch nicht möglich, da die Konzepte mit heutigen Assistenzsystemgenerationen nicht sinnvoll in der Produktion umgesetzt werden können. Hauptgrund dafür sind die Kalibrieralgorithmen der einzelnen Sensoren, die in den aktuellen Assistenzsystemgenerationen nur mit großem Aufwand geändert werden können. Eine Bewertung der Verbesserungen ist demnach erst in zukünftigen Generationen sinnvoll, weshalb dies bei der Entwicklung von Folgegenerationen berücksichtigt werden sollte. In jedem Fall stellt das Gesamtkonzept einen Beitrag zur Vision der Einlinigkeit der Endmontage dar. Diese Vision besitzt nachgewiesen einen positiven finanziellen Einfluss auf die Produktion und Teile dafür werden auch von Anlagenlieferanten mit den genannten Prämissen beworben [Gol22] [Dür21]. Die Infrastruktur und Entwicklung dieser Arbeit kann dafür genutzt werden, zusätzlich andere Inbetriebnahmeumfänge in die Produktionslinie vor zu verlagern. Ein Beispiel stellt die Inbetriebnahme von Aktivfahrwerken dar. Eine entsprechende zusätzliche Funktionalität kann in das Referenzierverfahren implementiert werden.

Referenzierung

Der Ansatz der Referenzierung für den Gierwinkel bestimmt die Fahrwerksymmetrieachse und funktioniert mithilfe der Eigenbewegung des Fahrzeugs als Übertragungsreferenz. Manche Assistenzsysteme fordern jedoch eine Referenzierung zur geometrischen Fahrachse. Damit der Zusammenhang zwischen der Fahrzeugeigenbewegung und der geometrischen Fahrachse hergestellt werden kann, muss dafür eine Umrechnung anhand der ermittelten Differenzwerte zwischen der geometrischen Fahrachse und der Fahrwerksymmetrieachse vorgenommen werden. Als Differenzwerte dafür können beispielsweise jene Werte herangezogen werden, die auf dem Fahrwerkstand ermittelt wurden. Jedoch sollte im Rahmen einer Ausarbeitung grundsätzlich hinterfragt werden, warum es keine einheitliche Referenz, sondern je nach Sensor die geometrische Fahrachse oder die Fahrwerksymmetrieachse als Referenz verwendet wird.

Außerdem sollte der Einfluss durch die Schiefstellung des Fahrzeugs in der Montagelinie zum späteren fahrfertigen Zustand aufgrund von Aktivfahrwerken oder durch das Einstellen des Fahrwerks untersucht werden. Mit dem Beschleunigungssensor im ORC Steuergerät sollte es möglich sein, diese Einflüsse zu reduzieren, jedoch sind dazu weitere Entwicklungstätigkeiten zu planen. Außerdem sollten Fehlerszenarien geklärt werden, weil diese sich zur Inbetriebnahme im Fahrwerkstand grundlegend unterscheiden. Ein Beispiel wäre der Fall, dass ein Fahrzeug nicht referenziert werden kann. Ein Fremdkörper oder eine Verschmutzung an der Radkante kann beispielsweise dafür sorgen, dass die Referenzierung fehlschlägt.

Ausgehend vom automatischen Teil des statischen IS Tests als Ort für die Inline Inbetriebnahme der Fahrerassistenzsysteme, sollte geprüft werden, inwiefern eine Kalibrierung auch in den benachbarten Bereichen möglich ist. Denn eine längere Kalibrierstrecke sorgt für mehr Daten aus unterschiedlichen Umgebungen, wodurch beispielsweise Einflüsse durch lokale Unebenheiten oder nicht vertikale bzw. horizontale Strukturen reduziert werden. Außerdem sollte grundlegend für die Annahme der Linearität des Montagebandes eine Untersuchung durchgeführt werden. Diese Annahme wurde für alle Konzepte getroffen, jedoch konnte im Rahmen dieser Arbeit mit einem Lasertracker nur die Bewegung eines Punktes am Fahrzeug und nicht die Linearität der Fahrzeugbewegung nachgewiesen werden. Zwar reduziert das Zusammenführen mehrerer Messfahrten an unterschiedlichen Punkten am Fahrzeug die Unsicherheit, jedoch kann damit nur eine Abschätzung und keine valide Untersuchung auf Linearität durchgeführt werden. Zusätzlich sollte die Positioniergenauigkeit der Fördertechnik untersucht werden. Je nach Genauigkeit der Anlagen ist es ebenfalls denkbar, auf eine Inline Referenzierung des Gierwinkels verzichten zu können oder die Positionierungsgenauigkeit zu verbessern.

Abschließend sollte eine automatisierte Anpassung der Helligkeits- und Kontrastwerte für das Inline Referenziersystem bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen vorgenommen werden. Bisher werden die Helligkeits- und Kontrastwerte auf den jeweiligen Einsatzort in der Produktion manuell ermittelt und angepasst. Dies sollte im Rahmen der Weiterentwicklung vorgenommen werden, um eine vereinfachte Inbetriebnahme und eine verbesserte Robustheit gegenüber Helligkeitsänderungen zu ermöglichen.

Kalibrierung

Neben dem Inline Kalibrierverfahren werden auch Verfahren für die Nacharbeit und für den Aftersales benötigt. Beide Anwendungen werden in ähnlicher Umgebung durchgeführt und speziell für die Nutzung im Aftersales ist ein betriebsmittellooses Verfahren wichtig, da sonst die Betriebsmittel weltweit in Servicewerkstätten vorgehalten werden müssten. Folglich liegt es nahe, für Nacharbeit und Aftersales ein abgewandeltes Inline Verfahren zu entwickeln, das ähnlich der Online Kalibrierung auf eigenen Rädern gefahren werden kann. Jedoch soll das Verfahren mit dem Unterschied zur Online Kalibrierung nicht mit mehreren Kilometern, sondern wenigen Metern Fahrt auskommen.

Aktive Sensorik im Fahrzeug wie Radar und Lidar können dafür sorgen, dass sich die Sensoren gegenseitig beeinflussen bzw. stören. Aus dem Straßenbetrieb sind hierfür bereits Konzepte wie „Listen before talk“ bekannt, bei dem zunächst nach aktiv ausgesandten Signalen gesucht wird, um unbeeinflusst versetzt dazu senden und empfangen zu können. Die Verfahren sollten entsprechend auf solche Beeinflussung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Die Okklusion durch benachbarte Fahrzeuge stellt für Sensoren im mittleren Front- und Heckbereich die größte Herausforderung der Kalibrierung dar. Denn eine betriebsmittellose Kalibrierung ist in diesem Fall teilweise nur anhand des benachbarten Fahrzeug möglich, jedoch nicht sinnvoll umsetzbar. Ansätze hierfür sind die beschriebenen Verfahren, bei denen durch ein minimales freies Sichtfeld die Umgebung akkumuliert wird. Für manche Sensoren wie den Frontradarsensor wurden in dieser Arbeit keine praktikablen Inline Verfahren entwickelt. Der Freizug stellt einen Ansatz dar, bei dem der Abstand benachbarter Fahrzeuge vergrößert und dadurch die Okklusion benachbarter Fahrzeuge reduziert wird. Jedoch ist dies nur begrenzt möglich und bedarf entsprechender Möglichkeiten in der Fördertechnik und im Produktionsablauf. Deshalb wird in diesem Fall der Ansatz einer Kalibrierung zum Motorerststart empfohlen, weil sich hier kein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem Förderband befindet.

In der Produktionslinie werden die Fahrzeuge meist in deren Längsrichtung gefördert, wodurch manche entwickelten Konzepte, wie der künstliche Horizont, nicht verwendet werden können. Es gibt jedoch auch Stationen in der Produktion, in denen die Fahrzeuge in einer Kurve oder quer zur Fahrzeuglängsachse transportiert werden. Diese Abschnitte können für die Verfahren verwendet werden, allerdings stellt in

diesen Bereichen meist die Möglichkeit einer Referenzierung die nächste Herausforderung dar.

Abschließend stellt der Ansatz der Sensorfusion von Umgebungsdaten eine Möglichkeit dar, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurde. Die Fusion von Sensordaten ermöglicht ein Gesamtbild der Umgebung und kann genutzt werden, um die Schwächen eines Sensors durch die Stärken eines anderen Sensors zu kompensieren. So können beispielsweise Geisterziele des Radars durch hochauflösende Kameras kompensiert werden. Dieser Ansatz sollte bei einer Weiterentwicklung deshalb berücksichtigt werden.

Weiterentwicklung und Industrialisierung

Für eine Weiterentwicklung oder Industrialisierung wird empfohlen, zunächst Daten von unterschiedlichen Produktionsstandorten mit Seriensorik zu sammeln, um darauf basierend die Verfahren auszuarbeiten und die Ergebnisse der neuen Inline Verfahren anhand der etablierten Serienverfahren vergleichen zu können. Damit können parallel zur heutigen Produktion Verfahren seriennah entwickelt und gleichzeitig der Einfluss auf die Produktionswerke möglichst geringgehalten werden. Da während des automatischen und manuellen Teils des statischen IS-Tests auch Prüfungen durchgeführt werden, welche die Sicht der Sensorik einschränken oder die Fahrzeuglage und damit die Kalibrierung verändern, sollte eine Art Kalibrierbit festgelegt werden. Dieses zeigt an, welche Zeitabschnitte im Montageband für eine Kalibrierung herangezogen werden können und welche nicht. Außerdem können Zeitbereiche, welche nur bedingt geeignet sind, schwächer gewichtet in das Gesamtergebnis einbezogen werden. Als Eingangsgröße dafür können beispielsweise neben den Sensorsignalen selbst für die Erkennung von Okklusion, die Signale der Tür-, Sitzerkennungs- und Klappensensoren, die aktuell laufenden Prüfabläufe, der Betriebszustand der Fördertechnik und die Beschleunigungswerte des Fahrzeugs für die Erkennung einer Änderung der Fahrzeuglage herangezogen werden. Auch die Lichtverhältnisse bei optischen Messverfahren, wie für die Inline Referenzierung oder Inline Kalibrierung der Kamerasysteme, sind wichtig für eine korrekte Durchführung und sollten Eingang in das Kalibrierbit und in die Fehlerbeschreibung finden. Entsprechende Verfahren zur Erkennung von Blendungseffekten oder Lichtschwertern sind für die Fahrfunktion vorhanden und sollten für die Produktion herangezogen werden. Die Anforderungen dafür sind ebenfalls in Tests zu ermitteln. Ähnlich einer

heutigen Kalibrierung sollte besonders in der Linie rechtzeitig auf Fehler beispielsweise durch Sensorblockage hingewiesen werden, um noch ausreichend Möglichkeiten für die Inline Kalibrierung vorzuhalten und Nacharbeitsfälle zu verhindern.

Das Thema Bandstopp bzw. die Veränderung der Bandgeschwindigkeit ist ebenfalls ein wichtiges Thema, das in Bezug auf die Veränderung der Fahrzeuglage näher untersucht werden sollte.

Weiter sollte bei einer Industrialisierung die Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen geschaffen werden. Die Verfahren sollten flexibel ausgeführt sein, um Änderungen einfach testen und umsetzen zu können. So beispielsweise für das Thema der prädiktiven Kalibrierung. Um aus dem Kundenbetrieb Kalibrierdaten zurückspielen zu können, sollte beispielweise ein Speicherstein bzw. Speicherblock vorgehalten werden.

Abschließend wird die Umsetzung des Verfahrens zur Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen ohne die Verwendung von Kalibriernormalen empfohlen, da es einige Vorteile gegenüber den heutigen Verfahren bedeutet und einen in der Zukunft weiter zunehmenden Wettbewerbsvorteil darstellt.

VII. Literaturverzeichnis

- [ACE18] ACEA, European Automobile Manufacturers Association Tax Guide, 2018.
- [Aut22] Automeia. (2022, Mai) DRIVE PILOT Sensors on the new Mercedes-Benz S-Class. [Online].
<https://www.youtube.com/watch?v=OZHqzqWmqgo>
- [Bes92] Paul J. Besl und Neil D. McKay. (1992, Februar) A Method for Registration of 3-D Shapes. Paper. [Online].
<https://ieeexplore.ieee.org/document/121791>
- [Bey12] Jürgen Beyerer, Fernando Puente León, und Christian Frese, Automatische Sichtprüfung, 1st ed. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer-Verlag, 2012.
- [Bey21] Felix Beyer. (2021) Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeuglidarsystemen in der Montagelinie. Masterarbeit.
- [BNP18] BNP Paribas und Center of Automotive Management (CAM). (2018, März) Studie: Finanzierung und Sicherung neuer Mobilitätskonzepte. Studie. [Online].
https://www.bnpparibascardif.de/documents/28628/159881/180321+Studie+-+Finanzierung+und+Absicherung+neuer+Mobilita%CC%88tskonzepte_fin+al.pdf/82178336-40f4-4955-8d1d-2937fe70e1a7
- [Bos21] Bosch Mobility Solutions. Front-Radarsensor. [Online].
<https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/fahrerassistenzsysteme/automatische-notbremsung/front-radarsensor/>
- [Bun19] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019) Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Studie. [Online].
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.html>

- [Con14] Continental. (2014, Mai) Continental: Plädoyer für die Stereokamera. Artikel. [Online]. <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/fahrerassistenz/continental-plaedoyer-fuer-die-stereokamera/6590958>
- [Con21] Continental AG. (2021, Dezember) Advanced Radar Sensor ARS540. Webseite. [Online]. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Radars/Long-Range-Radar/ARS540>
- [Con22] Continental Engineering Services. (2022, März) Restraint Control System. [Online]. <https://conti-engineering.com/technology-systems/systems-functions/restraint-control-system/>
- [Dai] Daimler AG. Abbildung Presswerk. [Online]. <https://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/10013153>
- [Dai18] Daimler AG. (2018) Darstellung E-Klasse. Abbildung.
- [Dai21] Daimler AG. Abbildung Rohbau. [Online]. <https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/1459359905000/7544636v1tv3m3/D216272.jpg>
- [Dai211] Daimler AG. Abbildung Lackierung. [Online]. <https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/1459356441000/7525890v1tv3m3/D208280.jpg>
- [Dai212] Daimler AG. Endmontage. Abbildung. [Online]. <https://media.daimler.com/marsMediaSite/scr/1459362695000/7557129v1tv3m3/D221528.jpg>
- [Deu13] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN ISO 8855 - Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe, 2013.
- [Deu92] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 70027 Fahrwerkvermessung, 1992.
- [DFS17] Mercedes-Benz AG. (2017) DfSS-Training - Design for Six Sigma. Schulungsunterlage.
- [Die15] Ferran Roure, Xavier Llado, Joaquim Salvi Yago Diez. (2015, Februar) A Qualitative Review on 3D Coarse Registration Methods. Paper. [Online]. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2692160>

- [Dre19] Dreamstime. (2019, September) Car door icon. [Online].
<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-car-door-icon-simple-style-white-background-vector-illustration-image79580303>
- [Dür21] Dürr System AG. (2021, Dezember) NEXT.assembly webinar series | Testing Innovative solutions for EoL testing from passenger to commercial vehicles. Bericht.
- [Dür211] Dürr Assembly Products GmbH. (2021, Dezember) Multi-Sensor-Kalibrier-Prüfstand x-around – Innovativ, flexibel, zuverlässig. [Online].
<https://www.durr.com/de/produkte/endmontage/prueftechnik/autonomes-fahrenpkw/multi-sensor-kalibrier-pruefstand-pkw>
- [Egg19] T. Egger, Anforderungen des Radarsensors an die Kalibrierung, 2019.
- [Eur19] Europäisches Parlament. (2019, April) Sicherer Straßenverkehr: Lebensrettende Technik für Neufahrzeuge. Pressemitteilung. [Online]. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20190410IPR37528/sicherer-strassenverkehr-lebensrettende-technik-fur-neufahrzeuge>
- [Eur20] Euro NCAP. (2020) Assistenzsysteme. [Online].
<https://www.euroncap.com/de/fahrzeugsicherheit/die-bedeutung-der-bewertungen/assistenzsysteme/>
- [Eur95] Europäisches Parlament , Richtlinie 95/46/EG des europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten und zum freien Datenverkehr, 1995.
- [fka19] fka GmbH. (2019) Tendenzielle Sensorausstattung nach Automatisierungslevel. Abbildung in Studie. [Online].
https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16
- [FKr15] F. Kröger, Das automatisierte Fahren im gesellschaftlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext. Paris: Springer Verlag, 2015.
- [Fra14] Fraunhofer-Allianz Vision, Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, Fraunhofer Geschäftsbereich Vision Michael Sackewitz, Ed. Stuttgart, Deutschland: Fraunhofer Verlag, 2014.

- [Gol22] Sebastian Goldschmid. (2022) Wirtschaftlichkeitsanalyse von Prüf- und Inbetriebnahmeverfahren in der Fahrzeugproduktion im Kontext der Elektrifizierung der Produktpalette. Masterarbeit.
- [Gor22] Dr. rer. nat. Hannes Gorniaczyk. (2022) Kalibrierverfahren für 360 Grad Parkkamarasysteme. Befragung.
- [Got15] Georg Geduld Heinrich Gotzig, "LIDAR-Sensorik," in Handbuch Fahrerassistenzsysteme, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer H. Winner, Ed. Wiesbaden, Deutschland: Springer Fachmedien, 2015, ch. 18, p. 1221.
- [Gül87] E. Gülch und W. Förstner. (1987, Juni) A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Point, Corners and Centres of Circular Features. Paper. [Online].
<https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp02/cse252/foerstner/foerstner.pdf>
- [Ham01] Helmut Hamfeld. (2001, September) Aktive Stereoskopie, neue Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten. Dissertation. [Online].
<http://ag-vp-www.informatik.uni-kl.de/Projekte/Smaragd/Dissertation.pdf>
- [Har88] Chris Harris und Mike Stephens. (1988) A combined corner and edge detector. Paper. [Online]. <http://www.bmva.org/bmvc/1988/avc-88-023.pdf>
- [Her19] Rainer Hering, Anforderungsliste der Fahrtechnik, Juli 03, 2019.
- [Hes22] Hesai. (2022, Juni) Hesai Pandar128. [Online].
<https://www.hesaitech.com/en/Pandar128>
- [Hou62] P. V. C. Hough, "Method and means for recognizing complex patterns," U. S. Patent, 3,069,654, 1962.
- [HWi15] S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer H. Winner, Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg Verlag, 2015.
- [IDS21] I.D.S. GmbH. (2021) UI-3080CP-C HQ Rev. 2 (AB00849). Produktbeschreibung. [Online]. <https://de.ids-imaging.com/store/ui-3080cp-rev-2.html>
- [Jan13] Christian Janssen, Hartmut Presting, Klaus Jostschulte, und Rainer Müller, "Optimierung der Fahrwerkeinstellung durch Nutzung der

- Fahrzeugsensorik," <https://docplayer.org/136669298-Optimierung-der-fahrwerkeinstellung-durch-nutzung-der-fahrzeugsensorik.html>, 2013.
- [JHe20] E. Ulven J. Henley. (2020, April) Das Elektroauto-Wunder von Norwegen. [Online]. <https://edison.media/verkehr/das-elektroauto-wunder-von-norwegen/25204810/>
- [Jon19] Martin Jonas. (2019) Neue Ansätze zur Umsetzung und Durchführung von Kalibrierumfängen bei der PKW-Inbetriebnahme. Dissertation. [Online]. <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/handle/20.500.11880/29333>
- [Jon20] Marcel Schäper, Martin Jonas, und Erich Goller, "Kalibrierkörper zum Kalibrieren einer Umgebungserfassungssensorik eines Fahrzeugs," Measurement DE 10 2020 004 822 A1, Okt. 01, 2020.
- [Kan81] Takeo Kanade und Bruce D. Lucas. (1981, April) An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. Paper. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/215458777_An_Iterative_Image_Registration_Technique_with_an_Application_to_Stereo_Vision_IJCAI
- [Kei20] Dr.-Ing. Dan Keilhoff. (2020) Automatisiertes und Vernetztes Fahren I+II. Vorlesungsskript.
- [Koh17] R. Ö. W. Kohn, Statistik für Ökonomen.: Springer-Verlag, 2017.
- [Kol20] Elgin Ulrike Petra Kollnig. (2020) Entwicklung von Inbetriebnahme- und Kalibrierverfahren von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Radarsystemen. Praktikumsbericht.
- [Kön21] Simone König, Vergleich von Rechenverfahren zur Bestimmung der Fahrwerksymmetrieachse, 2021.
- [Lev22] Level Five Supplies Ltd. (2022) Luminar's Iris LiDAR. [Online]. <https://levelfivesupplies.com/wp-content/uploads/2022/01/luminar-iris-lidar-roof-integration.png>
- [Low04] Kok-Lim Low. (2004, Februar) Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration. Paper. [Online]. https://www.comp.nus.edu.sg/~lowkl/publications/lowk_point-to-plane_icp_techrep.pdf

- [Lud02] Albrecht Ludloff, Radar und Radarsignalverarbeitung, 3rd ed.
Braunschweig/Wiesbaden, Deutschland: Friedr. Vieweg & Sohn
Verlagsgesellschaft mbH, 2002.
- [Mar15] Stefan Menzel, Boris Werhessen, Nicolaj Stache, Maximilian Höpfl Martin
Punke, "Kamera-Hardware," in Handbuch Fahrerassistenzsysteme,
ATZ/MTZ-Fachbuch, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer H. Winner, Ed.
Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg, 2015, ch. 20, p. 1221.
- [Mar16] Markus Jordan. (2016, Dezember) Abbildung Fahrwerke. [Online].
<https://blog.mercedes-benz-passion.com/2016/12/die-fahrwerke-von-mercedes-benz/>
- [Mat21] MathWorks. (2021, Juli) Phased Array System Toolbox. [Online].
<https://de.mathworks.com/help/phased/ug/constant-false-alarm-rate-cfardetection>.
- [McK19] McKinsey & Company. (2019) Automotive software and electronics 2030.
Report. [Online]. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/mapping-the-automotive-software-and-electronics-landscape-through-2030>
- [Mei20] Alexander Meisterknecht, Kamerakalibrierverfahren, 2020.
- [Mer16] Mercedes-Benz AG. (2020) Parking Package with 360° Camera. [Online].
<https://www.la.mercedes-benz.com/en/passengercars/mercedes-benz-cars/models/e-class/estate-s213-fl/safety.pi.html/mercedes-benz-cars/models/e-class/estate-s213-fl/safety/safetypackages/parkpackage360>
- [Mer18] Mercedes-Benz AG, Prüf- und Inbetriebnahmevorschrift Radar, 2018.
- [Mer181] Mercedes-Benz AG, Prüf- und Inbetriebnahmevorschrift Multi Purpose
Camera, 2018.
- [Mer22] Mercedes-Benz AG. (2022, März) Funktion des Aktiven Spurhalte-
Assistenten. [Online]. https://moba.i.daimler.com/baix/cars/213.0_comand_2017_a/de_DE/page/ID_3147d127c0139009354ae36519d17831-6fb8260fc0139009354ae3657dd8f404-de-DE.html#

- [Mül12] Rainer Müller, Martin Esser, Christian Janßen, Matthias Vette, und Stefan Quinders. (2012) Tolerance Management for Assembly – Not a Matter of Product Size. Paper.
- [Mül18] Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller. (2018) Montage und Inbetriebnahme von Kraftfahrzeugen. Vorlesungsskript.
- [MVT15] MVTec Software GmbH. (2015) Solution Guide III-C: 3D Vision. Handbuch. [Online]. <http://download.mvtec.com/halcon-12.0-solution-guide-iii-c-3d-vision.pdf>
- [MVT16] MVTec Software GmbH. (2016, März) Synchroner Bildeinzug. [Online]. <https://de.ids-imaging.com/application-notes-details/app-note-synchronizing-image-acquisition.html>
- [MVT20] MVTec Software GmbH. (2020, Mai) Integrierte Entwicklungsumgebung für Machine Vision. [Online]. <https://www.mvtec.com/de/produkte/halcon/arbeiten-mit-halcon/hdevelop/>
- [MVT201] MVTec Software GmbH. (2020, Mai) gen_caltab (Operator). [Online]. https://www.mvtec.com/doc/halcon/1805/de/gen_caltab.html
- [Now20] Nadine Nowak. (2020) Entwickeln einer Bewertungsmethode für Kalibrier- und Inbetriebnahmeverfahren von Fahrerassistenzsystemen. Bachelorarbeit.
- [OIC20] OICA. (2020) Entwicklung der weltweiten Automobilproduktion 2020. [Online]. <https://sta.cir-mcs.e.corpintra.net/statistik/daten/studie/151749/umfrage/entwicklung-der-weltweiten-automobilproduktion/>
- [Pah05] W. Beitz, J.Feldhusen, K. H. Grote G. Pahl, Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung. Berlin, Deutschland: Springer-Verlag, 2005.
- [Pan11] Gaurav Pandey, Silvio Savarese, James R. McBride, und Ryan M. Eustice. (2011, Mai) Visually Bootstrapped Generalized ICP. Paper. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5980322>
- [Paw21] Marcel Pawletta. (2021) Weiterentwicklung eines Verfahrens zur dynamischen Referenzierung eines Fahrzeugs in der Montagelinie. Forschungsarbeit.

- [Paw22] Marcel Pawletta. (2021) Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeugradarsystemen in der Montagelinie. Masterarbeit.
- [Pfa14] Christian Pfaundler, Komplexes Verfahren zur Prüf- und Inbetriebnahmevorschrift Steuergerät/System LRR3, 2014.
- [Poi22] Pointclouds.org. (2022, Juni) pcl:registration:ConvergenceCriteria Class Reference. [Online]. https://pointclouds.org/documentation/classpcl_1_1registration_1_1_convergence_criteria.html
- [Que20] Joshua Quenzer-Hohmuth. (2020) Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeugkamarasystemen in der Montagelinie. Masterarbeit.
- [Ric11] Richard Szeliski, Computer Vision Algorithms and Applications. London: Springer Verlag, 2011.
- [Rob21] Robert Bosch GmbH. (2019, Dezember) Bosch und Mercedes-Benz starten mit San José Pilotprojekt für automatisierten Mitfahrerservice. [Online]. <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-und-mercedes-benz-starten-mit-san-jose-pilotprojekt-fuer-automatisierten-mitfahrerservice-204032.html>
- [Rob211] Bosch Mobility Solutions. Sense, Think, Act: Was ein automatisiertes Fahrzeug können muss. [Online]. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/mobility-themen/automatisiertes-fahren-sense-think-act/>
- [Rob22] Robert Bosch GmbH. (2022, Juli) Front radar sensor. [Online]. https://www.bosch-mobility-solutions.com/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/multi-camera-system/front-radar-plus/front-radar_stage_v2.jpg
- [Rob221] Robert Bosch GmbH. (2022) Die Zukunft des Fahrens. Webseite. [Online]. <https://www.bosch.com/de/stories/die-zukunft-des-fahrens/>
- [Rog86] Roger Y. Tsai. (1986) A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. Paper. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1087109>

- [RSc15] R. Schmitt und T. Pfeiffer, Qualitätsmanagement - Strategien - Methoden - Techniken, 5th ed. München, Deutschland: Hanser Verlag, 2015.
- [Rus09] Nico Blodow, Michael Beetz Radu Bogdan Rusu, Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration, 2009.
- [Sch14] Kristiaan Schreve. (2014, September) How accurate can a Stereovision Measurement Be? Paper. [Online].
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6920229>
- [Sch17] Wassili Buerakov Michael Schuth, Handbuch Optische Messtechnik. Trier, Deutschland: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [Sch21] Manuel Schäfer. (2021) Kalibrierkonzept für Lidarsensoren. Befragung.
- [Schl21] Max Schlender. (2021) Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeugkamarasystemen in der Montagelinie. Masterarbeit.
- [Sec21] M. Secker. (2021) Messfähigkeit des ORC. Befragung.
- [Shi94] Jianbo Shi Carlo Tomasi. (1994, Juni) Good Features to Track. Paper. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/323794>
- [Sie20] Samuel Siegel. (2020) Entwicklung eines Verfahrens zum Referenzieren eines Fahrzeugs in der Montagelinie. Masterarbeit.
- [Soc14] Society of Automotive Engineers (SAE). (2014, Januar) SAE J3016 Norm. [Online]. http://standards.sae.org/j3016_201401/
- [Süd21] Süddeutsche Zeitung. (2021, September) Der Chipmangel trifft die Autoindustrie mit voller Wucht. Zeitungsartikel. [Online].
<https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/chipmangel-autoindustrie-halbleiter-absatzrueckgang-1.5419456>
- [Tag22] Tagesschau. (2022, Juni) Wie groß ist die Gefahr einer Rezession? Artikel. [Online]. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/rezession-bip-wirtschaftswachstum-101.html>
- [Tes20] Inc. Tesla. (2020, Apr.) Tesla Gigafactory 3 Shanghai | Official Video. Video. [Online]. <https://youtu.be/-Ds1xV7M2gl>
- [TEX21] TEXA Deutschland GmbH. (2021, September) TEXA RCCS 3: DIE GROSSE NEUHEIT FÜR DIE WELT DER FAHRERASSISTENZ-SYSTEME ADAS. [Online].

- <https://www.texadeutschland.com/news/2021-09-21/texa-rccs-3--die-grosse-neuheit-fur-die-welt-der-fahrerassistenzsysteme-adas>
- [Tos20] Toshiba Teli Corporation. (2020, Juni) BU Series: Bus Synchronization Mode. Technical Information. [Online]. https://www.toshiba-teli.co.jp/products/industrial/info/t/files/t0003_BusSync.pdf
- [TWi15] T. Winkle, "Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung," in Autonomes Fahren. Berlin und Heidelberg, Deutschland: Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2015, ch. 17, pp. 351-376. [Online]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45854-9_17
- [VDI19] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik. (2019) VDI 2221 - Entwicklungstechnischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Richtlinie.
- [Vel21] Velodyne. (2021, März) Puck. [Online]. <https://velodynelidar.com/products/puck/>
- [Ver14] Verband der Automobilindustrie und Society of Automotive Engineers International (SAE International). (2014) Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. VDA Magazin. [Online]. <https://docplayer.org/8522457-Automatisierung-von-fahrerassistenzsystemen-zum-automatisierten-fahren.html>
- [Ver15] Verband der Automobilindustrie (VDA). (2015) Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Studie.
- [Vis21] VisiCon Automatisierungstechnik GmbH. (2021, Dezember) Kalibrierung Fahrerassistenzsysteme. [Online]. <https://www.visicon.eu/hersteller/kalibrierung-fahrerassistenzsysteme/>
- [Vog22] Automobil Industrie Vogel. (2022, Mai) Mercedes bietet Drive Pilot für S-Klasse und EQS an. [Online]. <https://www.automobil-industrie.vogel.de/mercedes-bietet-drive-pilot-fuer-s-klasse-und-eqs-an-a-1115962/>
- [VWL02] Universität Trier - Volkswirtschaftslehre. (2002) Methodische Überlegungen zu qualitativen Befragungsmethoden. Studie. [Online].

<https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb4/prof/VWL/APO/4207ws0102/efstudien.pdf>

[Weh03] Frank Wehmeyer. (2003, November) Siemensstern. Abbildung. [Online].
<http://www.frank-wehmeyer.de/frank/unterricht/vorlagen-hilfsmittel/Siemensstern.htm>

[Win15] Hermann Winner, "Radarsensorik," in Handbuch
Fahrerassistenzsysteme, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer H. Winner, Ed.
Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg, 2015, ch. 17, p. 1221.

VIII. Im Rahmen dieser Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten

Nadine Nowak: Entwickeln einer Bewertungsmethode für Kalibrier- und Inbetriebnahmeverfahren von Fahrerassistenzsystemen, Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik, 2020

Samuel Siegel: Entwickeln eines Verfahrens zum Referenzieren eines Fahrzeugs in der Montagelinie, Universität Stuttgart, Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik, 2020

Elgin Kollnig: Entwicklung von Inbetriebnahme- und Kalibrierverfahren von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Radarsystemen, RWTH Aachen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2021

Joshua Quenzer-Hohmuth: Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeugkamarasystemen in der Montagelinie, Hochschule Reutlingen, Fakultät für Regelungstechnik, 2021

Marcel Pawletta: Weiterentwicklung eines Verfahrens zur dynamischen Referenzierung eines Fahrzeugs in der Montagelinie, Universität Stuttgart, Institut für Fahrzeugtechnik, 2021

Felix Beyer: Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeuglidarsystemen in der Montagelinie, Technische Hochschule Köln, Fakultät für Fahrzeugsysteme und Produktion, 2021

Marcel Pawletta: Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeugradarsystemen in der Montagelinie, Universität Stuttgart, Institut für Fahrzeugtechnik, 2021

Max Schlander, Entwicklung eines Verfahrens zum Kalibrieren von Fahrzeugkamarasystemen in der Montagelinie, Hochschule Kempten, Fakultät für Informatik, künstliche Intelligenz und Computer Vision, 2021